



Laskentatyökalun luominen haalauspalkkien suunnitteluun

Jani Asikainen

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2019

Konetekniikan koulutus
Tuotekehitys

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikan koulutus
Tuotekehitys

ASIKAINEN, JANI:

Laskentatyökalun luominen haalauspalkkien suunnitteluun

Opinnäytetyö 58 sivua, joista liitteitä 5 sivua
Huhtikuu 2019

Valmet Technologiesin palvelut-liiketoimintalinjan suunnitteluosastolla on tarve laskentatyökalulle, jolla voidaan suunnitella ja mitoittaa haalauspalkkeja. Opinnäytetyönä tehtiin Mathcad-pohjainen laskentatyökalu, jolla suunnittelija voi vaadittuja arvoja muuttamalla tarkistaa, että suunniteltu teräsrakenne on vaatimustenmukainen. Laskentatyökalulla tarkistetaan Eurokoodissa asetetut vaatimukset nosturiratapalkille, jota käytetään sisätilaksi luokiteltavassa ympäristössä. Aiemmin haasteena on ollut todentaa rakenteen kestävyys niin, että kaikki vaatimustenmukaiset kriteerit otetaan huomioon. Erityisesti nosturia kantavan alalaipan kestävyys todentaminen on osoittautunut haasteelliseksi joissain tapauksissa.

Työn lopputuloksena luotiin laskentatyökalu, jolla voidaan mitoittaa nosturiratapalkki, jota kuormittaa yksi nosturista aiheutuva pystysuuntainen kuorma sekä rakenteen omasta painosta aiheutuva tasan jakautunut kuorma. Ohjelma toteutettiin niin, että loppudokumentissa näkyvä osuus sisältää mitoittamistiedot, kuten rakenteen mitat, kuormitukset ja lopulliset laskentatulokset. Loppudokumentin ulkopuolelle jätettiin ehtojen tarkistukset sekä osa laskennan välivaiheista.

Laskentatyökalun käyttäminen vaatii suunnittelijalta asiaan perehtymistä esimerkiksi tämän opinnäytetyön perusteella, mutta joissain tapauksissa myös työssä käytettyjen standardien tarkasteleminen voi osoittautua tarpeelliseksi. Haalauspalkin suunnitteluun tarkoitettua laskentapohjaa voidaan kehittää tulevaisuudessa huomioimaan ulkotiloissa tehtävien nostojen tapauksissa mahdolliset tuuli- ja lumikuormista aiheutuvat kuormitukset.

Asiasanat: eurokoodi, nosturiratapalkki, nosturi, teräsrakenne

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Product Development

ASIKAINEN, JANI:
Creating a Calculation Tool for Crane Girder Design

Bachelor's thesis 58 pages, appendices 5 pages
April 2019

There is a need for calculation tool for designing crane girders in the engineering department of the business services unit at the Valmet Technologies. The purpose of this thesis was to create a Mathcad based calculation tool that design engineer can use to verify that the planned steel structure is compliant with the regulations. The calculation tool is used to verify the requirements set in Eurocode for a crane girder that is classified to be used indoors. Previously there has been a challenge with verifying the structure in a way that all the relevant criteria are observed. In particular, verification of the durability of the flange that supports the crane loads has proven to be challenging in some instances.

As an end result of this study, a calculation tool was created. The tool can be used to design a crane girder that is affected by one vertical point load caused by the crane and the continuous load caused by the steel beam. The calculation tool's structure was implemented so that the end document includes only the most essential information about the calculation. Some of the calculation steps and design criteria condition checks were excluded from the end document.

Using the calculation tool requires the design engineer to get acquainted with the subject, for example, by reading this thesis. In some cases, it may be necessary to read the standards that have been used in the creation of this work. This crane girder calculation tool may be developed further in the future by including the possible wind and snow loadings that may be present in the lifting work done outdoors.

Key words: eurocode, crane girder, crane, steel structure

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	9
2	YRITYS JA TUOTTEET	10
2.1	Yrityskonserni.....	10
2.2	Energiateollisuus.....	10
2.3	Tuotteet.....	11
2.3.1	CYMIC-kattila	11
2.3.2	HYBEX-kattila.....	12
2.3.3	RECOX-kattila	13
3	YLEISTIETOA EUROKOODISTA.....	16
3.1	Eurokoodi-järjestelmä	16
3.2	Eurokoodissa asetetut materiaaliveaaimukset	17
4	NOSTURIRATAPALKIN POIKKILEIKKAUS	19
4.1	Poikkileikkaus yleisesti.....	19
4.2	Poikkileikkausluokan määrittelemine.....	20
5	RAKENTEESEEN KOHDISTUVAT KUORMITUKSET JA NIIDEN YHDISTELY	23
5.1	Haalausalkkiin vaikuttavat kuormat.....	23
5.2	Kuormitusyhdistely Eurokoodin mukaisesti	26
5.2.1	Murtorajatilayhdistely.....	26
5.2.2	Käyttöraajatilayhdistely.....	29
6	RAKENTEEN MURTO- JA KÄYTTÖRAJATILAMITOITUS	31
6.1	Rakenteen mitoitustarkastelu	31
6.2	Taivutuskestävyys.....	31
6.2.1	Kimmoiteorian mukainen taivutuskestävyys.....	32
6.2.2	Taivutusmomenttien mitoitusarvot	32
6.2.3	Reikien vaikutus	34
6.2.4	Uuman mitoitus perustuen laipan taipumiseen	35
6.2.5	Pystysuuntainen taipuma	36
6.3	Kiepahduskestävyys	37
6.3.1	Epäsymmetrisen profiilin kiepahdukseen liittyvät tekijät	40
6.3.2	Kaksoissymmetrisen profiilin kiepahdukseen liittyvät tekijät.....	41
6.4	Alalaipan kestävyys.....	41
6.4.1	Palkin keskialueella vaikuttava pyöräkuorma	43
6.4.2	Palkin tuetussa päädyssä vaikuttava pyöräkuorma	43
6.5	Pyöräkuormista aiheutuvat paikalliset taivutusjännitykset.....	44
6.6	Rakenteen kimmoinen käyttäytymine.....	47

6.7 Ruuviliitos.....	48
7 POHDINTA	51
LÄHTEET	52
LIITTEET	54
Liite 1. Eurokoodi 3:ssa sallitut kuumavalssatut rakenneteräkset (SFS 1993-1-1 2005, 26).....	54
Liite 2. Nosturityyppejä vastaavat nostoluokat (SFS 1991-3 2007, 72)	55
Liite 3. Kriittisen kiepahdusmomentin määrittämisessä tarvittavat C_1 , C_2 ja C_3 sekä niitä vastaavat k ja k_w kertoimet (Ruukki 2010, 145, muokattu)	56
Liite 4. Pyöräkuormien aiheuttamien taivutusjännitysten laskennassa käytettävien c_x ja c_y kertoimien määrittely (SFS 1993-6 2007, 21, muokattu)	57
Liite 5. Eurokoodi 3:n mukaiset hyväksytyt standardiryhmät ruuviliitosten komponenteille (SFS 1993-1-8 2005, 9–10)	58

LYHENTEET JA TERMIT

A_f	vedetyn laipan pinta-ala, m ²
A_{fc}	puristetun laipan pinta-ala, m ²
$A_{f.net}$	vedetyn laipan nettopinta-ala, m ²
A_s	ruuvin jännityspoikkipinta-ala, m ²
A_w	uuman pinta-ala, m ²
C_1, C_2 ja C_3	kuormituksesta riippuvia kertoimia
E	kimmokerroin, MPa
e_c	puristetun laipan äärietäisyys neutraaliakselista, m
e_t	vedetyn laipan äärietäisyys neutraaliakselista, m
f_u	materiaalin vetomurtolujuus, MPa
f_{ub}	ruuvin vetomurtolujuus, MPa
f_y	materiaalin myötöraja, MPa
f_{yf}	puristetun laipan myötöraja, MPa
$F_{f.Rd}$	alalaipan kestävyys, N
$F_{t.Rd}$	ruuvin vetokestävyys, N
$F_{z.Ed}$	pyöräkuorman mitoitusarvo, N
$F_{\phi,k}$	nosturikuorman ominaisarvo, N
G	liukukerroin, MPa
G_k	epäedullisen pysyvän kuorman ominaisarvo, N
h_f	ylä- ja alalaipan painopisteiden etäisyys toisistaan, m
h_w	uuman korkeus, m
h_1	ylälaipan keskilinjan etäisyys poikkileikkauksen painopisteestä, m
h_2	alalaipan keskilinjan etäisyys poikkileikkauksen painopisteestä, m
I	jäyhyysmomentti, m ⁴
I_{eff}	pyöräkuormaa kannattavan laipan tehollinen pituus, m
I_{fc} ja I_{ft}	puristetun ja vedetyn laipan jäyhyysmomentit
	heikomman taivutussuunnan suhteen, m ⁴
I_t	vääntöneliömomentti, m ⁴
I_w	käyristymisjäyhyys, m ⁶

$I_{z.1}$ ja $I_{z.2}$	ylä- ja alalaipan jäyhyysmomentit poikkileikkauksen heikomman taivutussuunnan suhteen, m^4
K_{FI}	kuormakerroin
k_{net}	taivutuskestävyyden pienennystekijä
k ja k_{ω}	tehoolliseen pituuteen liittyvät tekijät
L	palkin jänneväli, m
m	pyörän keskilinjan ja laipan juuren välinen momenttivarsi, m
$M_{b.Rd}$	kiepahduskestävyyden mitoitusarvo, Nm
M_{cr}	kriittinen kiepahdusmomentti, Nm
$M_{c.Rd}$	taivutuskestävyyden arvo, Nm
M_{Ed}	taivutusmomentin mitoitusarvo, Nm
$M_{net,c,Rd}$	pienennetty taivutuskestävyyden arvo, Nm
n	pyörän keskilinjan ja laipan vapaan reunan välinen etäisyys, m
Q_c	nosturin omasta painosta aiheutuva kuormitus, N
Q_h	nostettavasta kuormasta aiheutuva kuormitus, N
Q_k	epäedullisen muuttuvan kuorman ominaisarvo, N
t_f	kuormaa kantavan laipan paksuus, m
t_w	uuman paksuus, m
$W_{el,min}$	suurin kimmoteorian mukainen taivutusvastus, m^3
x_e	pyörän keskilinjan ja palkin pään välinen etäisyys, m
x_w	pyörien välinen etäisyys palkin pituussuunnassa, m
z_g	kuorman vaikutuspisteen etäisyys vääntökeskiöstä, m
z_s	vääntökeskiön etäisyys painopisteestä, m
z_j	poikkileikkauksen symmetrisyyteen liittyvä tekijä, m
ν	poissonin luku
φ_i	nosturikuorman dynaaminen suurennuskerroin
v_h	nosturin vakionostonopeus, m/s
γ_F	koekuorman osavarmuusluku
γ_G	pysyvän kuorman osavarmuusluku
$\gamma_{M,ser}$	käyttörajan mukainen osavarmuusluku
γ_{M0}	poikkileikkauksen kestävyys osavarmuusluku
γ_{M1}	sauvan stabiiliuteen liittyvä osavarmuusluku
γ_{M2}	poikkileikkauksen vetomurtumisen osavarmuusluku

γ_Q	muuttuvan kuorman osavarmuusluku
ψ_i	muuttuvien kuormien yhdistelykerroin
ξ	epäedullisten pysyvien kuormien pienennyskerroin
δ_z	pystysuuntainen taipuma, m
χ_{LT}	kiepahduskestävyyden pienennystekijä
λ_{LT}	muunnettu hoikkuus
α_{LT}	epätarkkuustekijä
$\sigma_{f,Ed}$	palkin sisäisestä momentista kuormaa kantavan laipan keskilinjalle aiheutuva normaalijännitys, MPa
$\sigma_{ox,Ed}$	pyöräkuormasta aiheutuva paikallinen pituussuuntainen taivutusjännitys, MPa
$\sigma_{oy,Ed}$ ja $\sigma_{oy,end,Ed}$	pyöräkuormasta aiheutuva paikallinen poikittaissuuntainen taivutusjännitys, MPa
$\sigma_{Ed,ser}$	käyttörajatilan mukainen paikallinen yhdistetty jännitys, MPa

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on luoda Valmet Technologies Oy:n Palveluliiketoimintalinjan käyttöön haalauspalkkien suunnittelua varten laskentatyökalu. Haalauspalkkeja käytetään kattilatyömailla, joissa täytyy nostaa raskaita taakkoja. Haalauspalkin etuina ovat esimerkiksi sen pieni koko ja siirrettävyys paikasta toiseen. Laskentatyökalu pohjautuu Eurokoodi 3:n mukaisiin ohjeisiin ja vaatimuksiin teräsrakenteisiin liittyen. Standardin eri osissa annetaan yleisten teräsrakenteita koskevien ohjeiden lisäksi myös erillisiä määräyksiä nostureita kannattelevien rakenteiden suunnittelulle ja mitoitukselle.

Tälle työlle on syntynyt tarve yhä enemmän kasvaneista vaatimuksista koskien sekä turvallisuutta että vaatimustenmukaisia toimintatapoja. Tämän lisäksi aiemmin käytetyt haalauspalkit ovat olleet joissain tapauksissa ylimitoitettuja, johtuen puutteellisesta laskennasta, mikä toisaalta aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia materiaalihävikin myötä. Laskentapohjasta saadaan työn lopputuotoksen myötä kirjallinen dokumentti, joka voidaan esittää sitä vaativille tahoille heidän niin vaatiessa.

Työstä saadun laskentapohjan tarkoituksena on helpottaa suunnittelijoiden työtä haalauspalkkien mitoituksessa. Laskentapohjan toimintaperiaate pyritään pitämään mahdollisimman yksinkertaisena ja automatisoituna, jotta käyttäjän ei tarvitse opetella koko laskentaprosessin kulkua. Suunnittelijan tehtäväksi jää syöttää vaaditut parametrit liittyen kuormituksiin ja palkin mitoitukseen. Tämän lisäksi suunnittelijan täytyy määritellä joitain standardien asettamia muuttujia laskennan eri vaiheissa. Suurin osa muuttujien määrittelyistä pyritään kuitenkin saada toimimaan erilaisten ehtolauseiden pohjalta, jotta virheiden mahdollisuutta saadaan vähennettyä. Ohjelmaan luodaan ehdot Eurokoodi 3:n vaatimusten mukaisesti liittyen rakenteen kestävyys- sekä toimintaan murto- ja käyttörajatiloissa, mikäli ehto ei toteudu, ohjelma huomauttaa siitä suunnittelijaa.

2 YRITYS JA TUOTTEET

2.1 Yrityskonserni

Valmet Technologies Oy on maailmanlaajuisesti palveluita ja teknologioita toimittava monikansallinen yritys sellu-, paperi- ja energiateollisuuden alalla. Valmet työllistää noin 12 000 ammattilaista ympäri maailmaa, joista Suomessa työskentelee vähän alle 5 000 henkilöä. (Valmet, N.d.)

Yhtiön liiketoiminta koostuu neljästä liiketoimintalinjasta, joita ovat

- palvelut
- automaatio
- sellu ja energia
- paperi.

Liiketoiminnan markkina-alueet on jaoteltu maantieteellisesti viiteen eri alueeseen: Pohjois- sekä Etelä-Amerikka, EMEA (Eurooppa, Lähi-Itä ja Afrikka), Kiina sekä Aasian ja Tyynenmeren alue. (Valmet, N.d.)

Yhtiön liikevaihto on kasvanut tasaisesti siitä lähtien, kun se aloitti toimintansa nykyisen yritysnimen alla vuonna 2014. Vuonna 2018 Valmetin liikevaihto oli noin 3,3 miljardia euroa. Liikevaihdosta suurimman osan tuotti EMEA:n alueella tehdyt kaupat, jotka kerryttivät noin 43 % kokonaisliikevaihdosta. Liiketoimintalinjoista suurimman liikevaihdon tuotti Palvelut-liiketoimintalinja, joka on seurausta jälkimarkkinoiden myötä syntyneistä tilauksista liittyen esimerkiksi myytyjen tuotteiden kunnossapitoon sekä vanhojen laitosten modernisointiin. (Valmet, N.d.)

2.2 Energiateollisuus

Valmetilla on maailmanlaajuinen kärkipaikka sekä sellua että energiaa käsittelevillä teollisuudenaloilla. Vuonna 2015 Valmetilla oli sellu- ja energiateollisuudessa noin 40 %:n ja 20 %:n markkinaosuudet edellä mainituille aloille menevien tuotteiden kokonaistarjonnasta. (Valmet, N.d.)

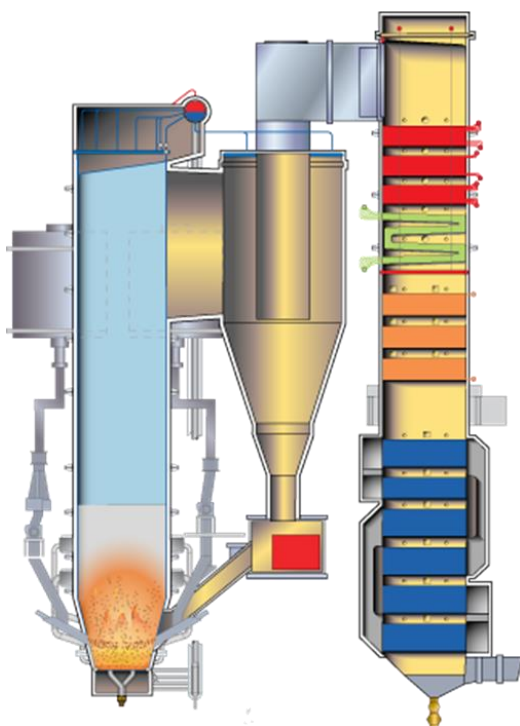
Energiateollisuuden tuotteet koostuvat pääasiassa biomassakattiloiden toimituksesta, mikä on seurausta maailman kasvavaan energiantarpeeseen ja samanaikaiseen kestävästi tuotetun energian kysyntään. Tämän lisäksi ikääntyneiden laitosten modernisointi biomassalla toimiviksi laitoksiksi edistää Valmetin asemaa energiateollisuuden kilpailluilla markkinoilla. (Valmet, N.d.)

Energialiiketoiminnan tämän hetkiset asiakkaat ovat pääasiassa julkiset laitokset, kunnat sekä erilaiset yksityiset toimijat, joiden asema on energia-, prosessi-, sellu- ja paperiteollisuudessa. Markkinat sijoittuvat pääasiassa Pohjois-Eurooppaan sekä muualle EMEA:n alueelle. (Valmet, N.d.)

2.3 Tuotteet

2.3.1 CYMIC-kattila

Valmetin tuotenimellä CYMIC, tarkoitetaan CFB- eli kiertoleijukattilaa (Circulating Fluidized Bed). CYMIC-kattilan etuna on sen kyky toimia laajalla kirjolla erilaisia polttoaineita, kuten hiili ja biomassa sekä niiden sekoitus, ilman erillisiä muutoksia laitoksen rakenteeseen. Tämä perustuu kyseisen kattilan tasaiseen polttolämpötilaprofiiliin. CYMIC-kattilan lämpöteho vaihtelee 30:sta 1200:aan MW_{th}, mikä takaa erilaisiin tarpeisiin soveltuvan laitoksen. Kuviossa 1 esitetään CFB-kattilan poikkileikkaus, jossa näkyy vasemmassa reunassa tulipesä sekä siitä oikealla sykloni, jonka tarkoituksena on eritellä kiinteä aine savukaasuista, jotka menevät lopulta savukaasukanavaan kuvion 1 oikeassa reunassa. (Valmet, N.d.)



KUVIO 1. CYMIC-kattilan poikkileikkaus (Valmet intranet, N.d)

CYMIC-kattilan toimintaperiaate perustuu suureen leijutusnopeuteen sekä tulipesään syötetyn ja sieltä poistuvan ilman paine-eroon, mikä aiheuttaa pyörteiden synnyn tulipesässä. Leijuva materiaali kulkeutuu tulipesän yläosan kautta sykloniin, jossa palamatta jäänyt materiaali erkaantuu savukaasuista putoamalla takaisin sen pohjalle. Sieltä palamatta jäänyt materiaali kulkeutuu takaisin tulipesän pohjalle hiekkatulistimen kautta. (Valmet, N.d.)

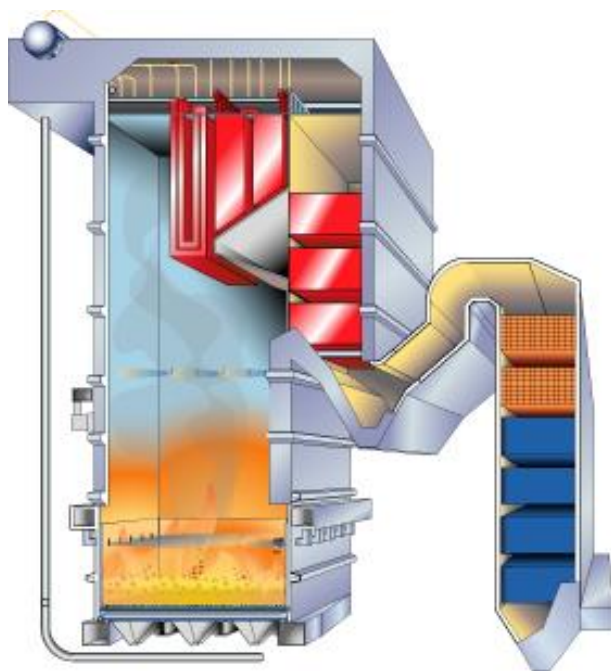
2.3.2 HYBEX-kattila

HYBEX-kattila on Valmetin käyttämä tuotenimi BFB- eli leijupetikattilalle (Bubbling Fluidized Bed). Tämän kattilatyypin eräinä etuina ovat palamisprosessin korkea hyötysuhde, joka on noin 99 %, sekä kokonaishyötysuhteen arvo, joka on lähellä 90 %:ää riippuen käytetystä polttoaineesta ja sen laadusta. Kattiloiden lämpöteho vaihtelee 20:sta 400:ään MW_{th}. Kyseistä kattilatyyppeä käytetään sekä lämmön että sähkön tuotantoon polttamalla eri tyyppisiä polttoaineita tulipesässä. (Valmet, N.d.)

HYBEX-kattilalla on mahdollista polttaa monipuolisesti erilaisia polttoaineita, tosin CYMIC-kattilalla tämä variaatio on kuitenkin laajempi. Polttoaineeksi sopii

optimaalisesti palavien biomassojen lisäksi myös korkean kosteuspitoisuuden ja matalan lämpöarvon sisältävät materiaalit, kuten erilaiset jätepolttoaineet. (Valmet, N.d.) Esimerkiksi jätepolttoaineena käytettävä RDF-jäte voidaan valmistaa yhdyskuntajätteen kuivajakeesta, sekä puu- ja teollisuusjätteestä (VTT, 2002).

Kuviossa 2 esitetään BFB-kattilan leikkauskuva, josta näkee vasemmassa reunassa kattilan tulipesän sekä sen oikealla puolella olevan savukaasukanavan, johon palamisesta syntyneet kaasut kulkeutuvat. Savukaasujen lämpöenergia pyritään siirtämään pääasiassa kuviossa 2 näkyviin punaisella merkattuihin tulistimiin. Osa jääneestä lämpöenergiasta saadaan hyötykäytettyä lopullisesti veden esilämmittimien avulla savukaasukanavan loppuosassa. (Valmet, N.d.)

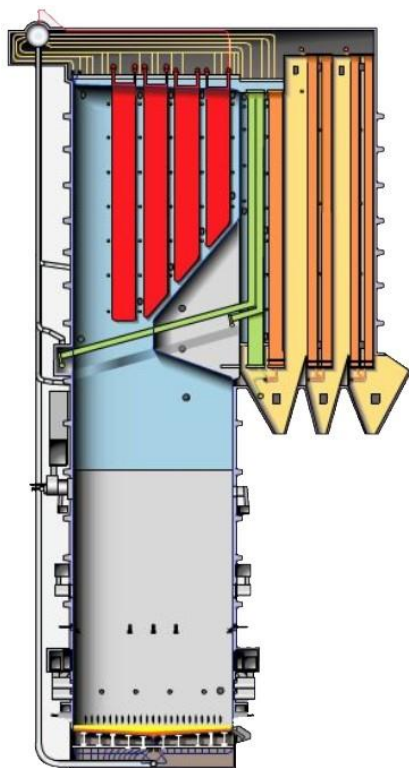


KUVIO 2. HYBEX-kattilan poikkileikkaus (Valmet intranet, N.d)

2.3.3 RECOX-kattila

Valmet käyttää valmistamalleen soodakattilalle tuotenimeä RECOX. Kyseistä kattilatyyppeä käytetään sellutehtaiden yhteydessä, johtuen sen käyttötarkoituksesta polttaa sellun valmistusprosessissa syntynyttä mustalipeää sekä ottaa talteen prosessissa syntyneet kemikaalit. Kuviossa 3 esitetään soodakattilan poikkileikkaus, josta ilmenee yleiskuva siitä, minkälainen kattilan

rakenne on sisäpuolelta. Soodakattiloiden korkeussuuntainen koko on huomattavasti suurempi verrattuna CFB- ja BFB-kattiloihin. (Valmet, MyAcademy.)



KUVIO 3. RECOX-kattilan poikkileikkaus (Valmet, MyAcademy)

Kattilan primäärinen tarkoitus on keittokemikaalien talteenotto, johon viittaa myös kattilan englannin kielinen nimitys Recovery Boiler. Soodakattilan sekundäärisenä tarkoituksena on tuottaa palamisprosessissa syntyneen lämpöenergian avulla höyryä, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi sähköenergian tuotannossa. (Valmet, MyAcademy.)

Soodakattilan energiantuotannollinen toiminta perustuu samaan tapaan polttoaineen polttamiseen, kuin aiemmin esitellyissä kattilatyypeissä, mutta palamisprosessi tapahtuu leijuttamisen sijaan tulipesän pohjalla. Mustalipeä syötetään pohjalle ruiskuttamalla sitä matalalla paineella, mikä muodostaa siitä pisaramaista sumua. (Valmet, MyAcademy.)

Mustalipeä on sellunkeitossa syntyvä sivutuote, jota muodostuu, kun puuta keitetään valkolipeää käyttämällä, joka koostuu natriumhydroksidista NaOH ja natriumsulfidista Na₂S. Puusta irtoaa valkolipeään ligniiniä, joka aiheuttaa lipeän

väriin muuttumisen mustaksi, ja muita orgaanisia aineita. Mustalipeästä muodostetaan vahvalipeää poistamalla siitä vettä haihduttamossa, jotta sen kuiva-ainepitoisuus saadaan noin 60-80 %. (Valmet, MyAcademy.)

Mustalipeän polttoprosessissa pyritään redusoimaan mahdollisimman suuri osa natriumsulfaattista Na_2SO_4 natriumsulfidiksi. Natriumsulfidi syötetään tulipesän pohjalta liuotinsäiliöön, jossa siitä muodostetaan viherlipeää. Kemikaalisten käsittelyiden jälkeen viherlipeä voidaan syöttää takaisin selluprosessiin. (Valmet, MyAcademy.)

3 YLEISTIETOA EUROKOODISTA

3.1 Eurokoodi-järjestelmä

Eurokoodi-järjestelmän kehittämisen aloittamisesta päätettiin vuonna 1975 Euroopan yhteisön komission toimesta. Järjestelmän tarkoituksena oli helpottaa EU-alueella tehtävää kaupankäyntiä poistamalla tekniset esteet sekä yhdenmukaistamalla rakenteiden suunnittelua koskevat tekniset vaatimukset. Tällä pyrittiin parantamaan alueen kilpailukykyä kansainvälisillä markkinoilla. Eurokoodi on levinnyt hyvin laajasti ympäri maailmaa, ainoana poikkeuksena mainittakoon Pohjois-Amerikka. Euroopan lisäksi standardi on hyväksytty virallisesti Singaporessa, mutta muualla se on hyväksytty käyttöön pääasiassa projektikohtaisesti. (SFS 1990 2006, 10; Kaitila, Kumar, Martikainen, Saarinen, Leskelä, Heinisuo, Inha, Kemppi, Yrjölä, Jyrkäs, Pekkinen & Ilveskoski 2014, 9.)

Eurokoodi-järjestelmä sisältää 58 eri osaa, jotka on luokiteltu 10 eri osa-alueeseen (Kouhi 2006, 405). Eurokoodi 3:ssa annetaan ohjeistuksia koskien teräsrakenteiden yleistä suunnittelua. Eurokoodi sisältää myös kansallisia liitteitä NA (National Annex), joita on sovellettava sen mukaisesti mihin maahan kyseinen rakenne on tulossa käyttöön (Kaitila ym. 2014, 9). Standardia sovelletaan yhdessä seuraavien standardien kanssa:

- EN 1990 Rakenteiden suunnittelu
- EN 1991 Rakenteiden kuormat
- EN 1090 Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus (SFS 1993-1-1 2005, 8).

SFS 1993 standardi jaetaan yhä kuuteen eri osaan, jotka käsittelevät erilaisia kantavia teräsrakenteita. Tämän opinnäytetyön pääasiallisena standardina käytetään Eurokoodi 3:n kuudennetta osaa, joka käsittelee nostureita kannattavia rakenteita. SFS 1993-6 standardissa annetaan erillisiä määräyksiä koskien rakenteen mitoitus, mutta se sisältää myös viittauksia SFS 1993-1-1 standardin yleisiin mitoitus- ja suunnittelusääntöihin. Haalausalkkiin kohdistuvien nosturista aiheutuvien kuormien määrittely tehdään standardin osan *SFS 1991-3 Nostureista ja muista koneista aiheutuvat kuormat* mukaisesti.

Eurokoodin asianmukainen käyttö edellyttää, että muita standardeja ja määräyksiä ei käytetä keskenään samassa mitoituksessa, vaan suunnittelu on tehtävä vain ja ainoastaan Eurokoodissa asetettujen vaatimusten mukaisesti. Mikäli esimerkiksi kuormitukset määritellään Suomen rakentamismääräyskokoelmaan perustuvilla ohjeistuksilla ja rakenteiden kestävyys lasketaan Eurokoodin mukaisesti, niin siitä saattaa seurata epävarmoja tai toisaalta huomattavasti ylimitoitettuja rakenteita suhteessa vaadittuun kestävyYTEEN. (Kaitila ym. 2014, 9.)

3.2 Eurokoodissa asetetut materiaalivaatimukset

Oikeaoppinen teräsrakenteiden suunnittelu edellyttää Eurokoodi 3:n mukaisten teräslajien käyttämistä. Liitteessä 1 esitetään eräät sallituista rakenneteräslajeista ja niiden lujuudellisista ominaisuuksista.

Eurokoodi 3 sallii myös muiden kuin liitteessä 1 esitettyjen terästen käyttämisen, mikäli kansallisessa liitteessä on maininta siitä (SFS 1993-1-1 2005, 25). Haalausalkia suunniteltaessa teräksen lujuusluokan kasvattamisella ei saavuteta merkittävää hyötyä, joten materiaalina käytetään pääasiassa aina S235 tai S355 lujuusluokan rakenneteräksiä. Palkin lujuusluokan korotus mahdollistaisi rakenteellisesti kevyemmän palkin käyttämisen, mutta samalla se johtaisi suurempaan taipumaan, joka on haalausalkilla eräs mahdollisesti mitoittavista tekijöistä sekä se nostaisi kiepahtamisen mahdollisuutta (Kaitila ym. 2014, 29).

Käytettäville rakenneteräksille on annettu myötörajan f_y ja vetomurtolujuuden f_u , lisäksi erillisiä vaatimuksia liittyen: sitkeyteen, murtumissitkeyteen, paksuussuuntaisiin ominaisuuksiin, toleransseihin sekä kiinnitysmenetelmiin kuten hitsaamiseen ja muuhun kiinnittämiseen. Kiinnitysmenetelmille asetetut vaatimukset on määritetty standardissa SFS 1993-1-8. (SFS 1993-1-1 2005, 25–28.)

Myötörajan ja vetomurtolujuuden arvoina voidaan käyttää liitteen 1 mukaisia yksinkertaistuksia tai kyseisen teräsvalmistajan ilmoittamia tuotestandardin

mukaisia nimellisarvoja. Eurokoodissa määritetään materiaalin sitkeysvaatimukseksi, että vetomurtolujuuden ja myötörajan suhteen on oltava suurempi kuin 1,10 sekä murtovenymän arvon on oltava vähintään 15 %. Kokonaisvenymän arvoksi on määritetty, että murtovenymän arvon on oltava vähintään 15-kertaa suurempi kuin myötövenymän arvon, joka on kimmokertoimen E suhde ja myötörajaan. (SFS 1993-1-1 2005, 25.)

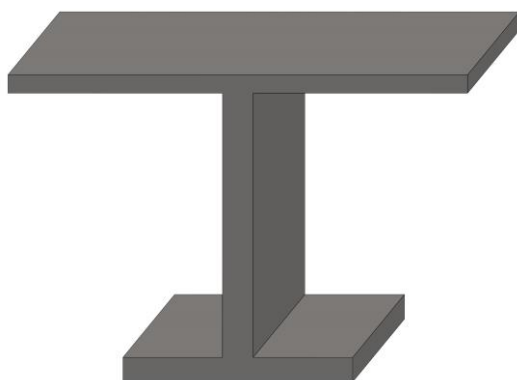
Eurokoodin vaatimusten mukaisesti tehtävässä laskennassa käytettävät materiaalivekiot annetaan standardin osassa SFS 1993-1-1. Materiaalivakioina käytetään seuraavia arvoja:

- Kimmokerroin E on arvoltaan $210\,000\text{ N/mm}^2$.
- Liukukerroin G on arvoltaan likimääräisesti $81\,000\text{ N/mm}^2$.
- Poissonin luku ν on kimmoisella alueella 0,3. (SFS 1993-1-1 2005, 28.)

4 NOSTURIRATAPALKIN POIKKILEIKKAUS

4.1 Poikkileikkausgeometria

Nosturiradan palkkia suunniteltaessa pitää ottaa huomioon monia tekijöitä, jotka voivat vaikuttaa valitun poikkileikkauksen toimivuuteen kyseisessä kohteessa. Vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi suurin sallittu pystysuuntainen taipuma sekä alalaipan kestävyys pyöräkuormille. Nosturiratojen palkkeina käytetään yleensä epäsymmetrisiä I-profiileja, mikä tarkoittaa sitä, että toisen laipan leveys eroaa toisesta, millä vääntökeskiö saadaan siirtymään lähemmäksi ylälaippaa (Ruukki 2010, 31). Yleisesti alalaippa on huomattavasti kapeampi kuin ylälaippa, mutta samalla sen paksuus on joko yhtä suuri tai jopa hieman paksumpi. Nosturin aiheuttamat kuormitukset siirtyvät alalaipan yläpuoliselle pinnalle nosturivaunun pyöristä. Kuviossa 4 havainnollistetaan epäsymmetrisen nosturiratapalkin poikkileikkaus.



KUVIO 4. Nosturiratana käytettävä epäsymmetrinen I-palkki

Haalauspalkkina voidaan käyttää myös kaksoissymmetristä I-palkkia. Kaksoissymmetrisen I-palkin molempien laippojen mitoitus voidaan joutua tekemään alalaippaan kohdistuvien pyöräkuormien perusteella, mikä toisaalta nostaa rakenteen painoa. Kaksoissymmetristen palkkien käyttöä voidaan tosin perustella niiden hyvällä saatavuudella.

4.2 Poikkileikkausluokan määrittäminen

Eurokoodi 3:ssa poikkileikkaukset jaotellaan neljään eri poikkileikkausluokkaan. Poikkileikkausluokitus tehdään, koska sen tarkoituksena on selvittää, mikäli mahdollinen paikallinen lommahdus alentaa rakenteen kestävyyttä sekä sen kiertymiskykyä (SFS 1993-1-1 2005, 42).

Ensimmäinen poikkileikkausluokitus on kaikista yksinkertaisin laskennallisesti, koska siinä sauvaan oletetaan muodostuvan plastinen nivel ilman, että kestävyyttä tarvitsee alentaa paikallisen lommahtamisen takia. Toisessa poikkileikkausluokassa sauvan kestävyys mitoitetaan samoin kuin poikkileikkausluokassa yksi, mutta paikallinen lommahtaminen alentaa rakenteen kiertymiskykyä. Kolmannessa poikkileikkausluokassa rakenteeseen pääsee syntymään myötörajan suuruinen jännitys, mutta plastisuusteorian mukaisen jännityksen syntyminen estyy paikallisen lommahtamisen takia. Neljännen poikkileikkausluokan sauvaa kuormitettaessa, rakenteeseen ei pääse syntymään myötörajan mukaista jännitystä ennen kuin paikallinen lommahdus tapahtuu. (SFS 1993-1-1 2005, 42.)

Poikkileikkausluokitus tehdään sauvan kaikille taso-osille erikseen. Poikkileikkausluokitus määritetään yleensä koko poikkileikkaukselle määräävimmän taso-osan mukaisesti, paitsi lukuun ottamatta joitain poikkeustapauksia. Määritykseen vaikuttaa rakenneosaan kohdistuva kuormitustapaus, eli onko kyseessä taivutus vai tasainen puristus. Mikäli kuormitustapaukseksi valitaan puristus, niin sillä saavutetaan aina varmallalla puolella oleva poikkileikkausluokitus. (Ruukki 2010, 81–82). Haalauspalkin levyosien poikkileikkausluokitus tehdään Eurokoodi 3:ssa annettujen ohjeiden perusteella (taulukko 1 ja 2). Uuman poikkileikkausluokitus määritellään sen tehollisen korkeuden ja paksuuden suhteen avulla. Laippojen luokitus tehdään laskemalla sen tehollisen pituuden ja paksuuden suhdeluku.

TAULUKKO 1. Uuman poikkileikkausluokituksen määrittely (SFS 1993-1-1 2005, 45)

Poikkileikkausluokka	Taivutetut taso-osat	Puristetut taso-osat	Taivutetut ja puristetut taso-osat
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)			
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	$\text{kun } \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ $\text{kun } \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	$\text{kun } \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ $\text{kun } \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)			
3	$c/t \leq 124\varepsilon$ ¹⁾	$c/t \leq 42\varepsilon$ ²⁾	$\text{kun } \psi > -1: c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ ³⁾ $\text{kun } \psi \leq -1^* : c/t \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y ε	235 1,00	275 0,92
			355 0,81
			420 0,75
			460 0,71

TAULUKKO 2. Laipan poikkileikkausluokituksen määrittely (SFS 1993-1-1 2005, 46)

Poikkileikkausluokka	Puristetut taso-osat	Puristetut ja taivutetut taso-osat	
		Vapaa reuna on puristettu	Vapaa reuna on vedetty
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)			
1	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)			
3	$c/t \leq 14\varepsilon$ ⁴⁾	$c/t \leq 21\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ ⁵⁾ k_σ ks. EN 1993-1-5	
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y ε	235 1,00	275 0,92
			355 0,81
			420 0,75
			460 0,71

Laskentatyökaluun määriteltiin Eurokoodin määräysten mukaiset ehdot, joilla ohjelma tarkistaa mihin poikkileikkausluokkaan valittu nosturiratapalkki kuuluu. Uuman poikkileikkausluokan määrittelyminen tehdään taulukon 1 ensimmäisen sarakkeen ehtojen mukaisesti. Laippojen määrittelyminen tehdään taulukon 2 ensimmäisen sarakkeen mukaisesti, koska sillä saavutetaan yleisesti varmallalla puolella oleva tulos. Ehtojen tarkistus tehdään laskentatyökalussa ylhäältä alaspäin, jotta kaikki ehdot käydään läpi. Laskentatyökaluun luotiin ehto, joka kieltää suunnittelijaa käyttämästä palkkiprofiilia, jonka poikkileikkausluokitus on 4. Standardi palkkiprofiilit kuuluvat yleensä poikkileikkausluokkiin 1 ja 2, kun taas hitsatut palkkiprofiilit luokkiin 3 ja 4.

5 RAKENTEESEEN KOHDISTUVAT KUORMITUKSET JA NIIDEN YHDISTELY

5.1 Haalauspalkkiin vaikuttavat kuormat

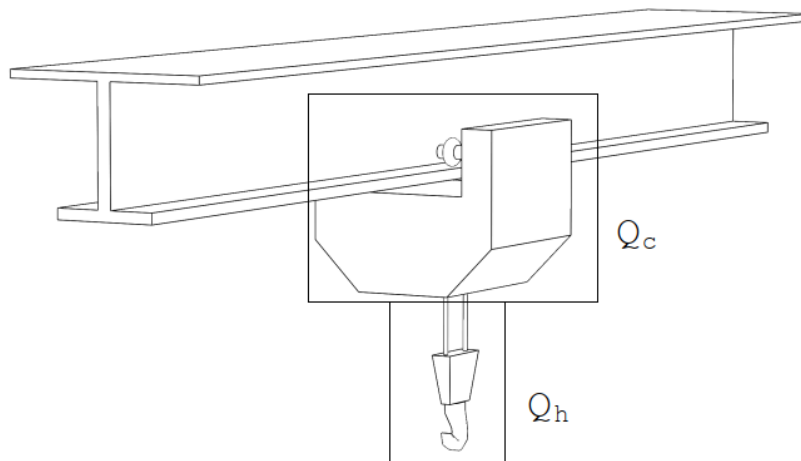
Rakenteen omasta painosta aiheutuva kuormitus on pysyvä kiinteä kuorma (SFS 1990 2006, 58). Omasta painosta aiheutuva kuorma lasketaan poikkileikkauksen nimellismittojen ja materiaalin nimellisen tiheyden avulla (SFS 1991-1-1 2002, 24). Opinnäytetyön myötä syntyneellä laskentatyökalulla suunniteltavaa haalauspalkkia käytetään suunnitellusti sisätiloissa, joten laskennassa voidaan jättää huomioimatta sekä tuuli- että lumikuormitusten vaikutus (SFS 1991-3 2007, 66).

Haalauspalkkiin kohdistuu ulkoisia kuormituksia sekä nostettavasta massasta että nostinvaunusta ja siihen kuuluvista apuvälineistä. Nosturista aiheutuvat kuormat luokitellaan muuttuviksi kuormiksi niiden luonteen takia (SFS 1991-3 2007, 22). Taakan nostamisesta aiheutuvat dynaamiset vaikutukset määritellään Eurokoodi 1:n nosturikuormia käsittelevän osan mukaisesti.

Nosturikuormat luokitellaan seuraavasti:

- Nosturin omasta painosta aiheutuva kuormitus Q_c .
- Kokonaiskuormasta aiheutuvat kuormitukset Q_n , jotka sisältävät kuormauselinten, nostoketjujen ja -köysien painon sekä hyötykuorman. (SFS 1991-3 2007, 14)

Kuviossa 5 havainnollistetaan nosturikuormien luokitteluperusteet. Kuvion 5 mukainen rakenne vastaa alalaipasta kuormitettua nosturirataa.



KUVIO 5. Nosturikuormien havainnollistaminen

Nosturikuormien edustavina arvoina käytetään kuorman staattisen ja dynaamisen komponentin yhteisvaikutusta, jota kutsutaan nosturikuorman ominaisarvoksi $F_{\varphi,k}$. Dynaaminen osuus huomioidaan kuormitusten määrittelyssä kertomalla staattista osuutta Eurokoodi 1:n kolmannessa osassa ilmoitetuilla dynaamisilla suurennuskertoimilla φ_i . (SFS 1991-3 2007, 22.)

Nosturilla tehtävät työsuoritukset eivät aiheuta vaakasuuntaisia kuormituksia rakenteeseen, vaan rakenteen kestävyys ja toimivuuden kannalta merkityksellisimmät kuormitukset esiintyvät ainoastaan pystysuunnassa. Näitä pystysuuntaisia vaikutuksia vastaavat dynaamiset suurennuskertoimet ovat taulukon 3 mukaisia. Dynaamiset suurennuskertoimet määritellään standardin SFS 1991-3 ohjeiden mukaisesti kertoimien φ_1 ja φ_2 osalta, mikäli nosturin toimittaja ei ole määritellyt niitä erikseen käytettävälle nostinvaunulle (SFS 1991-3 2007, 34).

TAULUKKO 3. Dynaamiset suurennuskertoimet φ_i (SFS 1991-3 2007, 24, muokattu)

Dynaamiset suurennuskertoimet	Huomioon otettava vaikutus	Vastaava staattinen komponentti
φ_1	Kokonaiskuorman maasta nostosta nosturirakenteeseen aiheutuva herätekuorma	Nosturin oma paino
φ_2	Kokonaiskuorman nosturille siirtymisestä aiheutuvat dynaamiset vaikutukset maasta nostosta	Kokonaiskuorma
φ_6	Koekuorman staattiset vaikutukset	Koekuorma

Nosturin omaan painoon liittyvän dynaamisen suurennuskertoimen φ_1 arvo voidaan valita väliltä 0,9–1,1, jossa arvot edustavat värähtelypulssien ala- ja ylärajan arvoja nostotilanteessa. Mitoituksen kannalta varmalle puolelle päästään valitsemalla ylärajan mukainen arvo. Kokonaiskuorman vaikuttava φ_2 arvo määritellään kaavan (1) mukaisesti

$$\varphi_2 = \varphi_{2,\min} + \beta_2 \cdot v_h, \quad (1)$$

jossa v_h on nosturin vakionostonopeus sekä $\varphi_{2,\min}$ ja β_2 ovat taulukon 5 mukaisia kertoimia, jotka määräytyvät nosturityyppiä vastaavan nostoluokan mukaisesti. (SFS 1991-3 2007, 34.) Taulukossa 4 olevat nostoluokat ja niitä vastaavat nosturityypit esitetään liitteessä 2. Laskentatyökalussa on määritelty, että haalausalkki luokitellaan asennusnosturiksi.

TAULUKKO 4. Nostoluokkaa vastaavat arvot $\varphi_{2,\min}$ ja β_2 (SFS 1991-3 2007, 34, muokattu)

Nostoluokka	β_2	$\varphi_{2,\min}$
HC1	0,17	1,05
HC2	0,34	1,10
HC3	0,51	1,15
HC4	0,68	1,20

Nosturirakenteille määrätään, että koekuormitus on tehtävä standardissa SFS 1991-3 määrättyjen koekuorma arvojen mukaisesti (SFS 1993-6 2007, 11). Haalauspalkkia eli asennusnosturia vastaavan nosturirakenteen tapauksessa ainoastaan staattinen koekuormitustilanne on merkittävä, joten kuormitus tehdään nosturin ollessa paikallaan (SFS 1991-3 2007, 48). Staattisessa koekuormitustilanteessa dynaamisen suurennuskertoimen arvoksi valitaan 1,0. Koekuormituksen arvona on käytettävä vähintään 125 % nimellisestä kokonaiskuormasta Q_h eli suurimmasta nostettavasta taakasta (SFS 1991-3 2007, 48).

5.2 Kuormitusyhdistelyt Eurokoodin mukaisesti

Rakenteet, jotka toteutetaan Eurokoodi 3:n mukaisesti, on suunniteltava käyttämällä standardissa SFS 1990 määritettyjä kuormitusyhdistelmiä. Kuormitusyhdistelmissä otetaan huomioon kuormien yhdistelyyn sekä vaikuttaviin kuormiin liittyvät yhdistelykertoimet ja osavarmuusluvut (SFS 1990 2006, 80). Nostolaitteista syntyviin kuormituksiin annetaan erilliset osavarmuusluvut Eurokoodi 1:n kolmannessa osassa (SFS 1991-3 2007, 68).

Eurokoodissa esitetään erilaisia kuormitusyhdistelyitä sekä murto- että käyttörajatiloja varten (Gardner, L. & Nethercot, D.A. 2011, 152). Rajatilalla tarkoitetaan tilaa, jossa rakenteelle määritetyt toimintaan liittyvät kriteerit ylitetään. Tilat liittyvät sekä rakenteen toimivuuteen että kestävyys.

5.2.1 Murtorajatilayhdistely

Murtorajatilamitoituksen avulla tarkastellaan, mikäli rakenteeseen syntyy pysyvä vaurio, joka aiheuttaa esimerkiksi rakenteen romahtamisen (Gulvanessian, H., Calgaro, J-A. & Holický, M. 2012, 33.) Murtorajatilassa samanaikaisesti vaikuttavien kuormien mitoitusarvon E_d vaikutusta verrataan rakenteen kestävyys R_d arvoon (SFS 1990 2006, 78). Murtorajatilassa, jossa tarkastellaan rakenteen kestävyyttä, kuormitusyhdistely tehdään standardissa SFS 1990 esitetyn kuormitusyhdistelykaavan (2) mukaisesti

$$E_d = \gamma_{G,j,\text{sup}} \cdot K_{\text{FI}} \cdot G_{k,j,\text{sup}} + \gamma_{Q,1} \cdot K_{\text{FI}} \cdot Q_{k,1} + K_{\text{FI}} \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}, \quad (2)$$

jossa $\gamma_{G,j,\text{sup}}$ on epäedullisen pysyvän kuorman osavarmuusluku, K_{FI} on luotettavuuden tasoluokitukseen liittyvä kuormakerroin, $G_{k,j,\text{sup}}$ on epäedullisen pysyvän kuorman ominaisarvo, γ_Q on muuttuvien kuormien osavarmuusluku, $Q_{k,1}$ merkityksellisin muuttuva kuorma, $\Psi_{0,i}$ on muun muuttuvan kuorman yhdistelykerroin ja $Q_{k,i}$ on muu muuttuva kuorma. Kuormitusyhdistelyssä plusmerkki ei tarkoita vaikutusten lineaarista summaamista yhteen, vaan niiden yhtäaikaisen vaikutuksen huomioimista. Kaavan (2) mukaisella yhdistelmällä voidaan tarkastella myös lujuudellista kestävyyttä. (SFS 1990 2006, 80; Gulvanessian, H., Calgaro, J-A. & Holický, M. 2012, 152.)

Murtorajatilatarkasteluun on myös kaavat (3) ja (4), joilla saadaan taloudellisesti kannattavampia rakenteita, koska niillä saadaan yleensä pienempi rakenteeseen vaikuttava kuormitusyhdistelmä. Kuormitusyhdistelyt voidaan määritellä vaihtoehtoisesti kaavoilla (3) ja (4)

$$E_d = \gamma_{G,j,\text{sup}} \cdot K_{\text{FI}} \cdot G_{k,j,\text{sup}} + \gamma_{Q,1} \cdot \Psi_{0,1} \cdot K_{\text{FI}} \cdot Q_{k,1} + K_{\text{FI}} \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (3)$$

ja

$$E_d = \xi \cdot \gamma_{G,j,\text{sup}} \cdot K_{\text{FI}} \cdot G_{k,j,\text{sup}} + \gamma_{Q,1} \cdot K_{\text{FI}} \cdot Q_{k,1} + K_{\text{FI}} \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}, \quad (4)$$

joissa $\Psi_{0,1}$ on määräävän muuttuvan kuorman yhdistelykerroin ja ξ on epäedullisten pysyvien kuormien pienennyskerroin. (SFS 1990 2006, 80; Ruukki 2010, 72.) Mitoitus tehdään laskentatyökalulla molempien kaavojen (3) ja (4) mukaisesti, joista valitaan automaattisesti määräävämmän mitoitusarvon tuottava vaihtoehto.

Kuormitusyhdistelykaavoissa (2), (3) ja (4) käytettävä kuormakerroin määritellään taulukosta 5, jossa kuormakerroin valitaan seuraamusluokkaa (CC) vastaavasti (SFS 1990 2006, 136, 138). Haalauslaskelmissa suunniteltaessa voidaan käyttää

yleisesti seuraamusluokkaa CC1 vastaavaa arvoa, koska rakenteella ei ole muun kantavan rakenteen kannalta merkityksellistä vaikutusta.

TAULUKKO 5. Kuormakertoimen K_{FI} määrittäminen (SFS 1990 2006, 136,138)

Seuraamusluokka	Kuvaus	Kuormakerroin K_{FI}
CC3	Suuret seuraamukset hengenmenetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	1,1
CC2	Keskisuuret seuraamukset hengenmenetysten tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	1,0
CC1	Vähäiset seuraamukset hengenmenetysten tai pienien tai merkityksettömien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	0,9

Kuormitusten osavarmuuslukuina käytetään Eurokoodin osien SFS 1990 ja SFS 1991-3 kansallisissa liitteissä määriteltäviä arvoja. Kaavan (4) mukaisessa kuormitusyhdistelyssä käytettävä epäedullisten pysyvien kuormien pienennyskerroin annetaan standardin SFS 1990 kansallisessa liitteessä. Taulukossa 6 esitetään kuormitusyhdistelmissä käytettävät aiemmin mainitut kertoimet ja niitä vastaavat arvot.

TAULUKKO 6. Kuormitusyhdistelmissä käytettävät kertoimet (SFS 1990 2006, 90; SFS 1991-3 2007, 68; SFS 1993-6 2007, 11–12)

	Arvo	Selitys
$\gamma_{G,j,\text{sup}}$	1,35	Epäedullinen pysyväkuorma
$\gamma_{Q,1,\text{sup}}$ tai $\gamma_{Q,i,\text{sup}}$	1,50	Muu muuttuva kuorma
ξ	0,85	Epäedullisen pysyvän kuorman pienennyskerroin
$\gamma_{G,\text{sup}}$	1,35	Epäedullinen pysyvä nosturikuorma
$\gamma_{Q,\text{sup}}$	1,35	Epäedullinen muuttuva nosturikuorma
$\gamma_{F,\text{test}}$	1,1	Koekuorma
ψ_0	1,0	Nosturikuormien yhdistelykerroin
ψ_1	0,9	Nosturikuormien yhdistelykerroin

5.2.2 Käyttörajatilayhdistely

Käyttörajatilamitoituksessa määritellään yleensä hankekohtaiset kriteerit rakenteen toiminnan kannalta (Gulvanessian, H., Calgaro, J-A. & Holický, M. 2012, 34). Haalauspaikan tapauksessa on kuitenkin määritetty tietyt enimmäisehdot liittyen muodonmuutoksiin ja jännityksiin, jotka on annettu Eurokoodi 3:n kuudennessa osassa (SFS 1993-6 2007, 28–29).

Ensimmäisessä käyttörajatilatarkastelussa huomioidaan nosturirataan normaalissa käyttötilanteessa vaikuttavat kuormat. Kuormitusten yhdistely tehdään kaavan (5) mukaisella yhdistelmällä, jota nimitetään Eurokoodissa tavallisena yhdistelmänä

$$E_d = G_{k,j,\text{sup}} + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}, \quad (5)$$

jossa $\psi_{1,1}$ on pääasiallisen muuttuvan kuorman yhdistelykerroin, $\psi_{2,i}$ on muiden samanaikaisesti vaikuttavien muuttuvien kuormien yhdistelykerroin. Osavarmuuslukujen kuormia suurentava vaikutus on jätetty huomioimatta. Edellä esitetyn mukaista kuormitusyhdistelmää käytetään mitoituksessa, jossa muodonmuutos, eli taipuma, haittaa rakenteen käytettävyyttä.

Toinen käyttörajatilatarkastelu tehdään koekuormitus- ja normaalia käyttötilannetta vastaavasti kimmoisen käyttäytymisen varmistamista varten, käyttäen kaavan (6) mukaista kuormitusyhdistelyä, jota kutsutaan SFS 1990 standardissa ominaisyhdistelmäksi

$$E_d = G_{kj,sup} + Q_{k,1} + \sum_{i>1} \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6)$$

(SFS 1990 2006, 84). Ominaisyhdistelmällä laskettava kuormituksen mitoitusarvo voi osoittautua määrääväksi rakenteen mitoituksessa, mikäli sillä tehtävä kuormitusyhdistely aiheuttaa alalaippaan myötörajan ylittävän paikallisen jännityksen (SFS 1993-6 2007, 32).

6 RAKENTEEN MURTO- JA KÄYTTÖRAJATILAMITOITUS

6.1 Rakenteen mitoitus tarkastelu

Haalauspalkin rakenteen suunnittelu tehdään seuraavien mitoitus tarkasteluiden ehtojen mukaisesti:

- Taivutuskestävyyden tarkastelu murtorajatilassa.
- Suurimman pystysuuntaisen taipuman tarkastelu käyttörajatilassa.
- Kiepahduskestävyyden tarkastelu murtorajatilassa.
- Alalaipan kestävyys murtorajatilassa.
- Pyöräkuormista aiheutuvat alalaipan paikalliset taivutusjännitykset käyttörajatilassa.
- Alalaipan kimmainen käyttäytyminen käyttörajatilassa.
- Palkin kiinnityksessä käytettävän ruuviliitoksen mitoitus murtorajatilassa.

6.2 Taivutuskestävyys

Taivutusmitoitus tehdään palkin poikkileikkausluokasta riippumatta kimmoteorian mukaisesti. Taivutusmomentin mitoitusarvon M_{Ed} ja taivutuskestävyyden arvon on toteutettava kaavan (7) mukainen ehto

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0, \quad (7)$$

jossa $M_{c,Rd}$ on kimmoteorian mukainen taivutuskestävyyden arvo. (SFS 1993-1-1 2005, 53.) Taivutuskestävyyttä ei määritellä plastisuusteorian mukaisesti murtorajatilatarkastelua varten, vaikka palkin poikkileikkausluokitus sen mahdollistaisikin. Rakenteeseen syntyvän taivutusmomentin arvo ei osoittaudu yleensä rakenteen mitoittavaksi tekijäksi, vaan suurimman sallitun pystysuuntaisen taipuman arvo rajoittaa taivutusmomentin mitoitusarvon huomattavasti pienemmäksi. Tämän lisäksi alalaipan kimmoisen käyttäytymisen

varmistaminen saattaa osoittautua monesti mitoituksen määrääväksi tekijäksi (SFS 1993-6 2007, 32).

6.2.1 Kimmoteorian mukainen taivutuskestävyys

Taivutuskestävyyden mitoitusarvo lasketaan kaavalla (8)

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (8)$$

jossa $W_{el,min}$ on poikkileikkauksen reunassa vaikuttavaa suurinta kimmoteorian mukaista jännitystä vastaava taivutusvastuksen arvo ja γ_{M0} on poikkileikkauksen kestävyys osavarmuusluku (SFS 1993-1-1 2005, 48, 53). Suurinta kimmoteorian mukaista jännitystä vastaava taivutusvastus lasketaan kaavalla (9)

$$W_{el,min} = \min \left[\frac{I_y}{e_c}, \frac{I_y}{e_t} \right], \quad (9)$$

jossa I_y on jäyhyysmomentti, kun taivutus tapahtuu pääjäyhyysakselin suhteen, e_c ja e_t ovat puristetun ja vedetyn laipan äärimmäiset etäisyydet poikkileikkauksen neutraaliakselista. Näistä kahdesta valitaan pienemmän taivutusvastuksen tuottava arvo. (Ruukki 2010, 120.) Epäsymmetrisellä I-palkilla neutraaliakseli sijaitsee lähempänä ylälaippaa, mikä aiheuttaa suuremman taivutusjännityksen palkin alareunaan.

6.2.2 Taivutusmomenttien mitoitusarvot

Palkin omasta painosta ja nosturikuormasta syntyvä taivutusmomenttien yhteenlaskettu mitoitusarvo ei saa ylittää taivutuskestävyyden mitoitusarvoa missään rakenteen pisteessä. Käyttörajatilaa vastaavissa laskentamalleissa nosturin oletetaan vaikuttavan sekä palkin keskellä että päädyssä. Käyttörajatilan mukaisilla yhdistelmillä laskettuja taivutusmomenttien arvoja ja niitä vastaavia pyöräkuormien arvoja käytetään tarkistettaessa alalaipan kimmoinen

käyttäytyminen. Murtorajatilan mukaisissa tarkasteluissa nosturi vaikuttaa sekä palkin keskellä että päädyssä. Murtorajatilatarkastelun mukaan laskettavien taivutusmomenttien arvot ovat mitoitusarvoja, joita verrataan poikkileikkauksen taivutuskestävyyden arvoon. Murtorajatilatarkastelun mukaista määräävintä taivutusmomentin mitoitusarvoa käytetään myös kiepahdustarkastelussa, kun nosturi sijaitsee palkin keskellä.

Palkin omasta painosta aiheutuvat sisäiset taivutusmomentit pysyvät vakioina palkin pisteissä, riippumatta käytetystä laskentamallista. Laskenta perustuu kaksitukisen nivelellisesti tuetun palkin yleisesti tunnettuihin taulukko-kaavoihin. Palkin omasta painosta aiheutuva taivutusmomentin arvo eri kohdissa rakennetta lasketaan kaavalla (10)

$$M = \frac{G_k \cdot L \cdot x}{2} - \left(\frac{G_k \cdot x^2}{2} \right), \quad (10)$$

jossa G_k on palkin omasta painosta aiheutuva tasan jakautuneen kuorman arvo, L on palkin jänneväli ja x on sijainti palkin päädyssä, missä taivutusmomentin arvo halutaan määrittellä. (American Institute of Aeronautics and Astronautics 2003, 2.)

Nosturikuormasta syntyvän taivutusmomentin mitoitusarvo lasketaan nosturikuorman vaikutuspisteessä kaavalla (11)

$$M = Q_k \cdot \frac{x}{L} \cdot L \cdot \left(1 - \frac{x}{L} \right), \quad (11)$$

jossa Q_k on nosturikuorman mitoitusarvo ja x on nosturikuorman vaikutuspisteen etäisyys palkin päädyssä. Taivutusmomenttien mitoitusarvojen laskeminen tehdään oletuksella, että liitokset eivät kanna momenttia, vaan ne oletetaan nivelellisiksi. (American Institute of Aeronautics and Astronautics 2003, 2–3)

6.2.3 Reikien vaikutus

Joissain tilanteissa haalauspalkki on mahdollista kiinnittää ylälaipastaan muuhun rakenteeseen käyttäen ruuviliitosta. Tällainen tilanne voi esiintyä, kun kiinnittämiseen käytetään erikseen suunniteltua asennuskonsolia, tai kun palkki kiinnitetään asennuskohteessa valmiiksi olevaan teräsrakenteeseen.

Pulttiliitosta varten tehdyt reiät voivat vaikuttaa laipan vetomurtokestävyyteen, joka vaikuttaa koko palkin taivutuskestävyyteen (Ruukki 2010, 125). Vaikka rakenteen kiinnitysmekanismien toiminta luokitellaan nivelelliseksi, niin ylälaipassa olevat reiät tarkistetaan varmuuden vuoksi. Palkin puristetulla alueella olevia kiinnittimien reikiä ei tarvitse ottaa huomioon mitoituksessa, mikäli kiinnitin on paikallaan rakennetta kuormitettaessa eivätkä reiät ole huomattavan suuria (SFS 1993-1-1 2005, 54).

Vedetyllä alueella olevat kiinnittimien reiät on huomioitava seuraavan määritelmän mukaisesti.

Vedetyssä laipassa olevia kiinnittimien reikiä ei tarvitse ottaa huomioon, jos laipan nettopoikkileikkauksen murtumiskestävyyden arvo on vähintään yhtä suuri kuin laipan bruttopoikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen kestävyyden mitoitusarvo (Ruukki 2010, 125).

Kaavan (14) ehdolla voidaan tarkistaa, mikäli reikien vaikutus on huomioitava taivutuskestävyyden mitoitusarvon laskennassa

$$\frac{0,9 \cdot A_{f,net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A_f \cdot f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (14)$$

jossa $A_{f,net}$ ja A_f ovat vedetyn laipan netto- ja bruttopinta-alat, γ_{M2} on poikkileikkauksen osavarmuusluku vetomurtumisen suhteen (SFS 1993-1-1 2005, 48, 54). Nettopoikkileikkaukselle voidaan laskea pienennetty taivutuskestävyyden arvo, jos kaavan (14) ehto ei toteudu suunniteltavalla rakenteella. Pienennetty taivutuskestävyyden arvo $M_{net,c,Rd}$ lasketaan kaavalla (15)

$$M_{\text{net,c,Rd}} = k_{\text{net}} \cdot M_{\text{c,Rd}}, \quad (15)$$

jossa k_{net} on kaavan (16) mukainen pienennyskerroin

$$k_{\text{net}} = 0,9 \cdot \frac{\gamma_{\text{M0}}}{\gamma_{\text{M2}}} \cdot \frac{f_u}{f_y} \cdot \frac{A_{\text{f,net}}}{A_f}. \quad (16)$$

Edellä olevan mukainen pienennys takaa varmalla puolella olevan yksinkertaistuksen pienennetyn taivutusvastuksen laskennassa. (Ruukki 2010, 125.)

6.2.4 Uuman mitoitus perustuen laipan taipumiseen

Uuman mitoitus on tehtävä niin, että se kykenee tukemaan riittävästi puristuksen alla olevaa taivutettua laippaa. Mikäli uuma on liian hoikka, niin puristettu laippa saattaa nurjahtaa uuman tasossa, mistä seuraa uuman paikallinen lommahdus. Uuman paikallisen lommahtamisen estäminen on yksinkertaisinta joko kasvattamalla uuman paksuutta tai pienentämällä sen korkeutta. (SFS 1993-1-5, 32.) Uuman hoikkuus ei osoittaudu yleensä poikkileikkauksen mitoittavaksi tekijäksi, kun käytetään standardi I-palkkiprofiileja. Uuman hoikkuus saattaa kuitenkin osoittautua rakenteen mitoittavaksi tekijäksi, suunnittelijan itse suunnitteleman palkin poikkileikkaukselle.

Uuman hoikkuus tarkistetaan kaavan (17) mukaisella ehdolla

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \cdot \frac{E}{f_{yf}} \cdot \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}, \quad (17)$$

jossa h_w on uuman korkeus, t_w on uuman paksuus, A_{fc} on puristetun laipan tehollinen pinta-ala, A_w on uuman poikkipinta-ala, f_{yf} on puristetun laipan myötölujuuden arvo, E on kimmomoduuli ja k on poikkileikkausluokasta riippuva kerroin. Kertoimen k arvot ovat taulukon 7 mukaisia. (SFS 1993-1-5, 32.)

TAULUKKO 7. Poikkileikkausluokkaa vastaavat k arvot (SFS 1993-1-5, 32)

k	Poikkileikkausluokka
0,3	1
0,4	2
0,55	3 & 4

6.2.5 Pystysuuntainen taipuma

Nosturiratapalkeissa pystysuuntaisen taipuman suurin sallittu arvo on rajoitettava arvoon $L/600$ tai vaihtoehtoisesti arvoon 25 mm, mikäli palkin jänneväli on 15 metriä tai enemmän. Pystysuuntainen taipuma lasketaan käyttörajatilan mukaisella kuormitusyhdistelmällä, tavallisella yhdistelmällä, jossa otetaan huomioon kaikki mahdolliset samanaikaisesti vaikuttavat pystysuuntaiset kuormitukset. (SFS 1993-6 2007, 31.)

Taipumamitoituksessa nosturista aiheutuvan pistekuorman ja palkin omasta painosta aiheutuvan tasan jakautuneen kuorman aiheuttamat taipuman arvot lasketaan superpositioperiaatteella yhteen. Palkkiin syntyy suurin taipuman arvo, kun nosturikuorma vaikuttaa keskellä jänneväliä.

Molemmista päistä nivelellisesti tuetun keskeltä pistekuormitetun palkin taipuman arvo keskellä jänneväliä lasketaan kaavalla (18)

$$\delta_{z.Q} = \frac{Q_k \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_y}, \quad (18)$$

jossa Q_k on nosturikuormien yhteenlaskettu ominaisarvo kyseisessä käyttörajatilatarkastelussa ja L on palkin jänneväli. Tasan jakautuneen kuorman aiheuttama taipuma keskellä palkkia lasketaan kaavalla (19)

$$\delta_{z.G} = \frac{5 \cdot G_k \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_y}, \quad (19)$$

jossa G_k on pysyvän tasan jakautuneen kuorman ominaisarvo. (American Institute of Aeronautics and Astronautics 2003, 2–3.)

6.3 Kiepahduskestävyys

Nosturiratapalkki, jota taivutetaan pääjäyhyysakselin suhteen, saattaa kiepahtaa ennen kuin palkin sisäiset momentit ovat saavuttaneet suurimman sallitun arvonsa. Palkin kiepahdus tapahtuu, kun puristettu laippa nurjahtaa pituusakselinsa suhteen sivuttaissuunnassa. Palkin kiepahtamiseen vaikuttavat jänneväli, tuenta, käytettävän poikkileikkauksen geometria, kuormitus ja materiaaliominaisuudet. (Ruukki 2010, 140.) Kiepahdustarkastelussa taivutusmomentin mitoitusarvona käytetään määräävimmän murtorajatilän myötä aiheutuvaa arvoa. Laskentatyökalu valitsee automaattisesti määräävimmän taivutusmomentin arvon kaikista murtorajatilatarkasteluista, joissa nosturikuorma vaikuttaa palkin jännevälin keskivälissä.

Eurokoodissa annetaan kaavan (20) mukainen ehto kiepahduskestävyyden tarkistamiselle sivuttaissuunnassa tukemattomalle palkille

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0, \quad (20)$$

jossa $M_{b,Rd}$ on kiepahduskestävyyden mitoitusarvo (SFS 1993-1-1 2005, 65). Kiepahduskestävyyden mitoitusarvo lasketaan kaavalla (21)

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}}, \quad (21)$$

jossa χ_{LT} on kiepahduskestävyyden pienennystekijä, W_y on poikkileikkausluokkaa vastaava taivutusvastuksen arvo ja γ_{M1} sauvan stabiiliuteen liittyvä osavarmuusluku (SFS 1993-1-1 2005, 65). Kiepahduskestävyyden pienennystekijän arvo lasketaan kaavalla (22)

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}, \quad (22)$$

jossa λ_{LT} on muunnettu hoikkuus ja Φ_{LT} on kiepahduskestävyyden pienennystekijän määrittämistä varten vaadittu kaavan (23) mukaan laskettava kerroin

$$\Phi_{LT} = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right], \quad (23)$$

jossa α_{LT} on epätarkkuustekijä. Muunnetun hoikkuuden arvo lasketaan kaavalla (24)

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}}, \quad (24)$$

jossa M_{cr} on kimmoteorian mukainen kriittinen kiepahdusmomentti. Jos muunnetun hoikkuuden arvo on pienempi tai yhtä suuri kuin 0,2, kiepahdustarkastelu voidaan jättää huomioimatta. (SFS 1993-1-1 2005, 66–67.)

Epätarkkuustekijä riippuu tarkasteltavan profiilin valmistusmenetelmästä sekä palkin korkeuden suhteesta leveyteen. Standardissa ei mainita kumman laipan leveyden mukaan epätarkkuustekijä pitäisi määritellä suhteessa palkin korkeuteen, joten varmalla puolella olevana yleistykseenä epäsymmetriselle I-palkille voidaan käyttää kapeamman laipan leveyttä. (SFS 1993-1-1 2005, 66.) Taulukossa 8 esitetään epätarkkuustekijän mahdolliset arvot sekä sen valintaan liittyvät ehdot palkin korkeuden ja laipan leveyden suhteen.

TAULUKKO 8. Epätarkkuustekijän α_{LT} määritelmä (SFS 1993-1-1 2005, 66, muokattu)

Poikkileikkaus	Rajat		Kiepahduskäyrä	
Valssatut I-profiilit	$h/b \leq 2$		a	
	$h/b > 2$		b	
Hitsatut I-profiilit	$h/b \leq 2$		c	
	$h/b > 2$		d	
Muut profiilit	-		d	
Kiepahduskäyrä	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Kimmoteorian mukainen kriittinen kiepahdusmomentti lasketaan kaavalla (25)

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L)^2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega}\right)^2 \cdot \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k \cdot L)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_j)^2} - \dots \right], \quad (25)$$

$$(C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_j)$$

jossa C_1 , C_2 ja C_3 ovat liitteen 3 mukaisia kuormitukseen ja tuentaan liittyviä kertoimia, I_z on poikkileikkauksen jäyhyysmomentti palkin heikomman taivutusakselin suhteen, I_t on vääntöneliömomentti, I_ω on käyristymisjäyhyys, k ja k_ω ovat liitteen 3 mukaisia teholliseen pituuteen liittyviä tekijöitä, z_g on kuorman vaikutuspisteen etäisyys vääntökeskiöstä ja z_j on poikkileikkauksen symmetrisyydestä riippuva tekijä (Ruukki 2010, 143). Mikäli taivutusmomentin mitoitusarvon suhde kimmoteorian mukaiseen kriittisen kiepahdusmomentin arvoon on pienempi tai yhtä suuri kuin 0,04, kiepahdustarkastelu voidaan jättää huomioimatta (SFS 1993-1-1 2005, 67).

Vääntöneliömomentin arvo lasketaan kaksois- ja epäsymmetrisille I-poikkileikkauksille kaavalla (26)

$$I_t = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 b_i \cdot t_i^3, \quad (26)$$

jossa b_i on tarkasteltavan levyosan leveys ja t_i on levyosan paksuus. (Ruukki 2010, 143–144.)

6.3.1 Epäsymmetrisen profiilin kiepahdukseen liittyvät tekijät

Käyristymisjäyhyys lasketaan kaavalla (27) epäsymmetriselle poikkileikkaukselle

$$I_{\omega} = \beta_f \cdot (1 - \beta_f) \cdot I_z \cdot h_f^2, \quad (27)$$

jossa h_f on ylä- ja alalaipan painopisteiden välinen etäisyys ja β_f on käyristymisjäyhyyden määrittämistä varten tarvittu apumuuttuja, jonka arvo lasketaan kaavalla (28)

$$\beta_f = \frac{I_{fc}}{(I_{fc} + I_{ft})}, \quad (28)$$

jossa I_{fc} ja I_{ft} ovat puristetun ja vedetyn laipan jäyhyysmomentit niiden heikomman taivutussuunnan suhteen. Poikkileikkauksen epäsymmetrisyydestä riippuvan apumuuttujan z_j arvo lasketaan kaavalla (29)

$$z_j = 1,0 \cdot (2 \cdot \beta_f - 1) \cdot \frac{h_f}{2}, \quad (29)$$

jos apumuuttujan β_f arvo on vähemmän tai yhtä suuri kuin 0,5. Apumuuttujan z_j arvo lasketaan kaavalla (30), mikäli aiemmin mainittu ehto ei toteudu

$$z_j = 0,8 \cdot (2 \cdot \beta_f - 1) \cdot \frac{h_f}{2}. \quad (30)$$

(Ruukki 2010, 144.)

Yhden akselin suhteen symmetriselle palkille vääntökeskiön z_s etäisyys painopisteestä lasketaan kaavalla (31)

$$z_s = \frac{h_1 \cdot I_{z1} - h_2 \cdot I_{z2}}{I_{z1} + I_{z2}}, \quad (31)$$

jossa h_1 ja h_2 ovat ylä- ja alalaipan keskilinjoiden etäisyydet koko poikkileikkauksen neutraaliakselista sekä I_{z1} ja I_{z2} ovat vastaavien laippojen jäyhyysmomentit poikkileikkauksen heikomman taivutussuunnan suhteen. (SFS 1993-1-1/A2G 1999, 7.) Vääntökeskiön z_s sijainnin avulla lasketaan nosturin pyörien kautta välittyvän kuormituksen vaikutusetäisyys z_g . (Ruukki 2010, 144).

6.3.2 Kaksoissymmetrisen profiilin kiepahdukseen liittyvät tekijät

Kaksoissymmetrisen profiilin käyristymisjäyhyden arvo voidaan laskea vaihtoehtoisesti kaavalla (32)

$$I_{\omega} = \frac{1}{4} \cdot h_f^2 \cdot I_z. \quad (32)$$

Apumuuttujan z_j arvona käytetään lukuarvoa nolla, mikä poistaa kuormitukseen liittyvän C_3 kertoimen vaikutuksen kimmoteorian mukaisen kriittisen kiepahdusmomentin laskennasta. (Ruukki 2010, 144.) Kaksoissymmetrisen palkin leikkauskeskiö sijaitsee poikkileikkauksen painopisteessä, joten sen etäisyyttä painopisteestä z_g ei ole tarpeen määritellä erikseen.

6.4 Alalaipan kestävyys

Alalaipan kestävyys $F_{f,Rd}$ tarkistetaan määrittäen murtorajatilanteen mukaista kuormitustilannetta varten pyöräkuormille $F_{z,Ed}$, kun palkkiin vaikuttaa sitä vastaava pyöräkuorma. Alalaipan kestävyys lasketaan kaavalla (33)

$$F_{f,Rd} = \frac{l_{eff} \cdot t_f^2 \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}}{4 \cdot m} \cdot \left[1 - \left(\frac{\sigma_{f,Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}} \right)^2 \right], \quad (33)$$

jossa l_{eff} on pyöräkuormaa kannattavan laipan tehollinen pituus, m on pyöräkuorman ja laipan juuren välinen momenttivarsi, t_f on pyöräkuormaa kannattavan laipan paksuus, $\sigma_{f,Ed}$ on pyöräkuorman tarkastelupisteessä

sisäisestä kokonaismomentista laipan keskilinjalle aiheutuva normaalijännitys. (SFS 1993-6 2007, 26.)

Kaavasta (33) saatu arvo kuvastaa pyöräkuormien summattua kokonaisarvoa, joten kunkin pyörän aiheuttama kuorma vastaa neljäsosaa lasketusta arvosta. Saatua tulosta verrataan todellisuudessa vaikuttavaan pyöräkuorman mitoitusarvoon, jonka on oltava pienempi kuin kaavalla (33) lasketun arvon.

Mikäli kyseessä on valssaamalla valmistettu palkki, laipan juuren ja pyöräkuorman välinen momenttivarsi lasketaan kaavalla (34)

$$m = \frac{1}{2} \cdot (b_2 - t_w) - \frac{4}{5} \cdot r - n \quad (34)$$

jossa b_2 on alalaipan leveys, t_w uuman paksuus, r on laipan ja uuman juuressa oleva säde ja n pyörän keskilinjan etäisyys laipan vapaasta reunasta. Hitsatuille palkeille pyöräkuorman ja laipan juuren välinen momenttivarsi lasketaan kaavalla (35)

$$m = \frac{1}{2} \cdot (b - t_w) - \frac{4}{5} \cdot \sqrt{2} \cdot a - n \quad (35)$$

jossa a on pienahitsin a -mitta. (SFS 1993-6 2007, 26-27.)

Eurokoodi 3:n osassa 6 annetaan yhtä pyöräkuormaa kannattavan laipan tehollisen pituuden määrittämistä varten erilaisia vaihtoehtoja. Kuormitetun laipan tehollisen pituuden arvon määrittely riippuu siitä, että missä kohdassa palkin pituussuunnassa pyöräkuorma vaikuttaa. Pyöräkuorman sijainnin lisäksi myös kyseiseen pisteeseen liittyvien rakenteellisten ominaisuuksien vaikutus huomioidaan tehollisen pituuden laskentamenetelmän valitsemisessa. (SFS 1993-6 2007, 27.)

6.4.1 Palkin keskialueella vaikuttava pyöräkuorma

Pyöräkuorman vaikuttaessa kaukana palkin tuetusta päästä yhtä pyöräkuormaa kannattava tehollinen pituus voidaan laskea kahdella eri tavalla riippuen nosturin pyöräkuormien keskilinjojen pituussuuntaisesta etäisyydestä toisiinsa. Jos pyöräkuormien palkin pituussuuntainen etäisyys x_w on enemmän tai yhtä suuri kuin kaavan (36) ehdon mukaisesti

$$x_w \geq 4 \cdot \sqrt{2} \cdot (m + n), \quad (36)$$

jossa n on pyöräkuorman keskilinjan etäisyys laipan ulommasta reunasta ja m pyöräkuorman momenttivarsi laipan juureen, niin yhtä pyöräkuormaa kannattavan laipan tehollinen pituus lasketaan kaavalla (37)

$$l_{\text{eff}} = 4 \cdot \sqrt{2} \cdot (m + n). \quad (37)$$

Jos kaavan (37) mukainen ehto ei toteudu, niin yhtä pyöräkuormaa kannattavan laipan tehollinen pituus lasketaan kaavalla (38)

$$l_{\text{eff}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot (m + n) + \frac{1}{2} \cdot x_w. \quad (38)$$

(SFS 1993-6 2007, 27.)

6.4.2 Palkin tuetussa päädyssä vaikuttava pyöräkuorma

Haalauspalkkien päätyyn kiinnitetään usein teräksestä valmistettu päätylevy, jonka tarkoituksena on estää nosturin putoaminen nosturin ollessa radan äärisijainnissa. Päätylevy toimii myös alalaipan jäykistäjänä, mikä vaikuttaa yhtä pyöräkuormaa kannattavan tehollisen pituuden laskentaan, kun pyöräkuorma sijaitsee lähellä palkin päätyä. Jotta pyöräkuorma voidaan luokitella lähellä tuettua päätyä vaikuttavaksi, pyörän keskilinjan etäisyys pitää olla palkin päädyistä korkeintaan kaavan (39) mukaisen ehdon verran

$$x_e \leq 2 \cdot \sqrt{2} \cdot (m + n), \quad (39)$$

jossa m on pyöräkuorman ja laipan juuren välinen momenttivarsi, n on pyörän keskilinjan etäisyys laipan ulkoreunasta ja x_e on pyöräkuorman keskilinjan etäisyys palkin päädyistä (SFS 1993-6 2007, 27).

Päädystä tuetun rakenteen yhtä pyöräkuormaa kantavan tehollisen pituuden arvo lasketaan kaavalla (40)

$$l_{\text{eff}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot (m + n) + x_e + \frac{2 \cdot (m + n)^2}{x_e}, \quad (40)$$

jossa x_e on pyöräkuorman keskilinjan etäisyys palkin päädyistä. Pyörien välisen etäisyyden on oltava toisistaan enemmän tai yhtä paljon kuin kaavalla (40) laskettavan tuloksen, jotta tehollinen pituus voidaan määrittellä kaavalla (40). Jos pyörien välinen etäisyys on vähemmän kuin kaavalla (40) laskettava tulos, niin yhtä pyöräkuormaa kannattavan laipan tehollinen pituus lasketaan kaavalla (41)

$$l_{\text{eff}} = \sqrt{2} \cdot (m + n) + \frac{(x_e + x_w)}{2} + \frac{(m + n)^2}{x_e}. \quad (41)$$

(SFS 1993-6 2007, 27.)

6.5 Pyöräkuormista aiheutuvat paikalliset taivutusjännitykset

Palkin alalaipalla vaikuttavat pyöräkuormat aiheuttavat paikallisia sekä pituus- että leveyssuuntaisia taivutusjännityksiä. Eurokoodi 3:ssa annetaan kaksi eri vaihtoehtoa, kuinka pyöräkuormasta syntyvät taivutusjännitykset voidaan laskea eri tilanteissa. Ensimmäisessä tapauksessa pyöräkuorman oletetaan sijaitsevan vähintään laipan leveyden b etäisyydellä palkin päädyistä. Toisessa tapauksessa pyöräkuorman oletetaan sijaitsevan ensimmäisen tapauksen ehdon vastaisesti jossain tarkemmin määrittelemättömässä paikassa lähellä palkin päätyä.

Kummassakin laskentatapauksessa edellytetään, että viereisten pyöräkuormien vaikutusetäisyyden x_w on oltava vähintään puolitoista kertaa alalaipan leveys nosturiratapalkin pituussuunnassa. Mikäli pyörien välinen etäisyys on vähemmän, niin mitoittavan pyöräkuorman arvo on laskettava, niin että nosturikuorman mitoitusarvo jaetaan tasan kahdelle eikä neljälle pyörälle. (SFS 1993-6 2007, 20, 22.)

Pyöräkuormasta alalaippaan syntyvä palkin pituussuuntainen taivutusjännitys $\sigma_{ox.Ed}$ lasketaan kaavalla (42)

$$\sigma_{ox.Ed} = c_x \cdot \frac{F_{z.Ed}}{t_1^2}. \quad (42)$$

Alalaippaan syntyvän poikittaissuuntaisen taivutusjännityksen $\sigma_{oy.Ed}$ arvo lasketaan kaavalla (43)

$$\sigma_{oy.Ed} = c_y \cdot \frac{F_{z.Ed}}{t_1^2}. \quad (43)$$

Kaavoissa (42) ja (43) t_1 on alalaipan paksuus pyöräkuorman keskilinja kohdalla, $F_{z.Ed}$ on pyöräkuorman mitoitusarvo ja kertoimet c_y ja c_x määritellään liitteen 4 mukaisesti. (SFS 1993-6 2007, 20.)

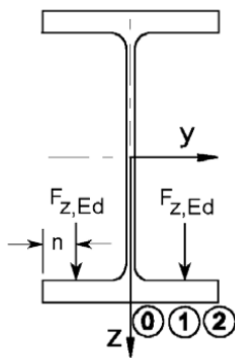
Kertoimille on kaksi eri määrittelytapaa. Toinen menetelmistä soveltuu yleisiin tapauksiin, joissa pyöräkuorman keskilinja ei sijaitse täysin laipan vapaan reunan läheisyydessä. Toisessa menetelmässä kertoimet on muodostettu sopimaan paremmin tilanteisiin, joissa pyöräkuorman keskilinja vaikuttaa laipan vapaan reunan välittömässä läheisyydessä. Kertoimien määrittelyä varten täytyy laskea apumuuttujan μ arvo kaavalla (44)

$$\mu = \frac{2 \cdot n}{(b_2 - t_w)}, \quad (44)$$

jossa n on pyöräkuorman keskilinja ja laipan vapaanreunan välinen etäisyys, t_w on uuman paksuus ja b_2 on alalaipan leveys. Laskentaohjelmaan muodostettiin

toiminto, joka valitsee automaattisesti tavan, jolla c_x ja c_y arvot määritellään kyseeseen tulevassa tilanteessa. (SFS 1993-6 2007, 20–21.)

Taivutusjännitysten arvot on mahdollista määrittää kolmessa eri pisteessä kuormitettua laippaa kuvion 6 mukaisesti. Rakenteeseen syntyvät yhdistetyt jännitykset tarkistetaan kaikissa pisteissä, kun rakenteeseen vaikuttaa käyttörajan mukainen kuormitusyhdistelmä eli ominaisyhdistelmä (kuvio 6).



KUVIO 6. Taivutusjännitysten määrittäminen suoralaippaiselle palkille (SFS 1993-6 2007, 20, muokattu)

Taivutusjännitysten arvot ovat joko positiivisia tai negatiivisia riippuen kertoimien c_x ja c_y etumerkistä. Positiivinen taivutusjännitys tarkoittaa, että kyseisessä pisteessä vaikuttaa paikallinen vetojännitys. (SFS 1993-6 2007, 21.)

Pyöräkuorma, joka vaikuttaa alalaipan leveyttä b läheisemmällä etäisyydellä palkin päädyistä, aiheuttaa jäykistämättömässä laipassa ainoastaan poikittaissuuntaisen taivutusjännityksen. Pyöräkuorman vaikuttaessa palkin päädyssä poikittaissuuntainen taivutusjännitys lasketaan kaavalla (45)

$$\sigma_{oy,End,Ed} = (5,6 - 3,225 \cdot \mu - 2,8 \cdot \mu^3) \cdot \frac{F_{z,Ed}}{t_f^2}, \quad (45)$$

jossa t_f on alalaipan keskimääräinen paksuus, mutta suoralaippaisella palkilla arvona käytetään laipan nimellispaksuutta. Mikäli palkin pääty vahvistetaan alalaipan paksuutta vastaavalla levyllä, jonka pituus ja leveys on alalaipan leveyden verran, niin pyöräkuormista aiheutuvien paikallisten jännitysten voidaan

olettaa pysyvän alle kaavoilla (42) ja (43) laskettavien arvojen. (SFS 1993-6 2007, 21–22.)

6.6 Rakenteen kimmoinen käyttäytyminen

Rakenteeseen syntyvät paikalliset yhdistetyt jännitykset tarkistetaan niin, että niiden arvo ei ylitä suurinta sallitua jännityksen arvoa käyttörajatilassa. Paikallisen yhdistetyn jännityksen mitoitusarvolle pitää olla voimassa kaavan (46) mukainen ehto

$$\sigma_{\text{Ed,ser}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{\text{M,ser}}}, \quad (46)$$

jossa $\gamma_{\text{M,ser}}$ on nosturia kannattavan rakenteen käyttörajatilan mukainen osavarmuusluku ja $\sigma_{\text{Ed,ser}}$ on kaavan (47) mukainen yhdistetyn jännityksen arvo tarkastelupisteessä

$$\sigma_{\text{Ed,ser}} \leq \sqrt{(\sigma_{\text{x,Ed,ser}})^2 + (\sigma_{\text{y,Ed,ser}})^2 - (\sigma_{\text{x,Ed,ser}}) \cdot (\sigma_{\text{y,Ed,ser}}) + 3 \cdot \tau_{\text{Ed,ser}}^2}, \quad (47)$$

jossa $\sigma_{\text{x,Ed,ser}}$ on pituussuuntainen normaalijännitys, $\sigma_{\text{y,Ed,ser}}$ on palkin pituussuunnan suhteen poikittainen normaalijännitys ja $\tau_{\text{Ed,ser}}$ on leikkausjännityksen arvo. (SFS 1993-6 2007, 32.)

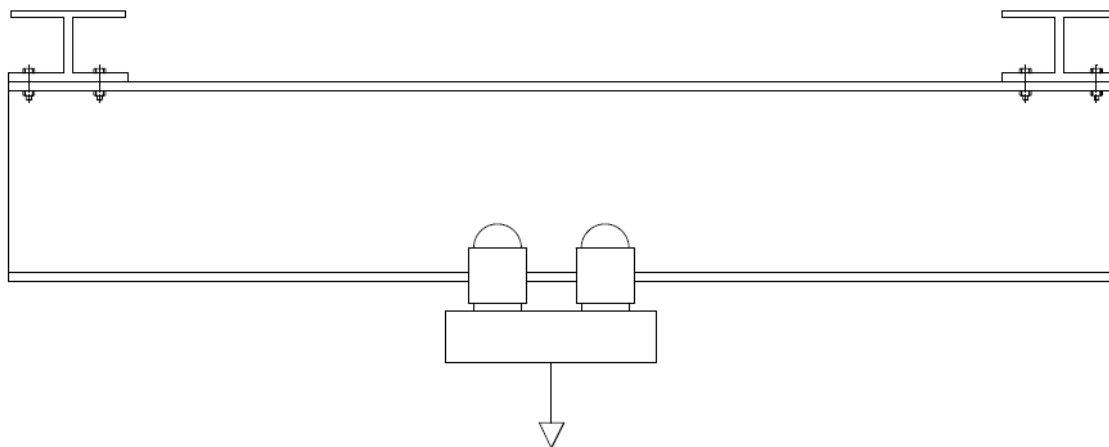
Pituussuuntaisen normaalijännityksen arvona käytetään palkkia kuormittavan nosturi- ja sitä vastaavan pyöräkuorman aiheuttamaa paikallista normaali- ja taivutusjännityksen arvoa (SFS 1993-6 2007, 32). Tällä yleistyksellä saadaan varmalla puolella oleva yksinkertaistus, koska oletuksen mukaisesti nosturikuormasta syntyvän globaalin taivutusmomentin aiheuttaman normaalijännityksen arvo olisi yhä suurimmillaan vielä pyöräkuorman kohdalla. Taivutusmomentin arvo laskee niveltuetussa palkissa, kun edetään nosturikuorman vaikutuspisteestä kohti tukipisteitä.

Poikittaissuuntaisena normaalijännityksen arvona käytetään pyöräkuormasta syntyvää taivutusjännityksen arvoa (SFS 1993-6 2007, 32). Leikkausjännityksen vaikutus voidaan jättää huomioimatta nosturiratapalkin kiinnityksen sijainnin takia, mutta mikäli ratapalkki kiinnitetään alalaipasta tuettuna, niin leikkausjännityksen arvo on huomioitava yhdistetyn jännityksen laskennassa.

Laskentatyökalussa yhdistettyjen jännitysten tarkastelut tehdään laskentamalleilla, joissa nosturi vaikuttaa sekä palkin keskellä että päädyssä. Nosturikuormina käytetään normaalikäyttöä ja koekuormitustilannetta vastaavia ominaisarvoja. Laskentatyökalu valitsee automaattisesti määräävimmit kuormitusyhdistelmät, joiden perusteella se laskee yhdistettyjen jännityksien mitoitusarvot, ja vertaa niitä valitulle materiaalille asetettuun myötörajan arvoon.

6.7 Ruuviliitos

Haalauspalkki kiinnitetään esijännittämättömällä ruuviliitoksella kuvion 7 mukaisesti muuhun teräsrakenteeseen tai sen kiinnittämistä varten suunniteltuun kiinnitysmoduliin.



KUVIO 7. Haalauspalkin kiinnitys muuhun rakenteeseen käyttäen ruuviliitosta

Kiinnityksessä käytettävien osien kuten aluslaattojen, ruuvien ja muttereiden pitää olla liitteessä 5 esitettyjen standardiryhmien mukaisia. Mikäli tuotteet eivät täytä standardin EN 1090 mukaisia vaatimuksia, niin ruuvien vetokestävyyttä on laskettava kertomalla sen arvoa 0,85:llä (SFS 1993-1-8 2005, 26).

Ruuviliitokset ottavat vastaan ainoastaan pystysuuntaiset tukireaktiot, jotka aiheutuvat murtorajatilan mukaisista kuormitusyhdistelmistä. Laskentamalleissa nosturi vaikuttaa palkin jännevälin keskellä sekä täysin palkin reunassa, niin että pyörä koskee päädyssä olevaa pysäytintä. Lähin etäisyys palkin päädyistä voidaan määritellä projektikohtaisesti, mikäli näin on tarpeen.

Palkin omasta painosta aiheutuvan kuorman aiheuttamat tukireaktiot palkin päädyissä lasketaan kaavalla (48)

$$R = \frac{G_k \cdot L}{2}, \quad (48)$$

jossa G_k on palkin painosta aiheutuva tasan jakautuneen kuorman ominaisarvo ja L on palkin jänneväli. Nosturikuormasta aiheutuva tukireaktio palkin päädyssä, jossa kuorma vaikuttaa lasketaan kaavalla (49)

$$R = Q_k \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right), \quad (49)$$

jossa Q_k nosturikuorman ominaisarvo ja x on nosturikuorman etäisyys tukipisteestä. Nosturikuormasta aiheutuvan tukireaktion arvo nosturikuorman vastakkaisessa päädyssä lasketaan kaavalla (50)

$$R = Q_k \cdot \frac{x}{L}. \quad (50)$$

(American Institute of Aeronautics and Astronautics 2003, 2–3.)

Kaavat (49) ja (50) soveltuvat myös nosturikuormasta aiheutuvan tukireaktion laskentaan palkin päädyissä, kun nosturikuorma sijaitsee keskellä jänneväliä. Palkin päädyissä vaikuttavasti tukireaktioista valitaan määräävin arvo, jonka mukaan yhdelle ruuville kohdistuva kuorma määritetään.

Ruuvien vetokestävyys $F_{t,Rd}$ yhtä ruuvia kohden lasketaan kaavalla (51)

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}, \quad (51)$$

jossa k_2 on ruuvin kannan tyypistä riippuva arvo, f_{ub} on ruuvin vetomurtolujuus, A_s on ruuvin jännityspoikkipinta-ala ja γ_{M2} on poikkileikkauksen osavarmuusluku vetomurtumisen suhteen (SFS 1993-1-8 2005, 28). Ruuville kohdistuvan kuormituksen mitoitusarvon pitää olla vähemmän kuin kaavalla (51) lasketun kestävyysarvon.

7 POHDINTA

Opinnäytetyön aiheena olleen haalauspalkkien mitoittamiseen käytettävän laskentatyökalun luominen Eurokoodin ohjeiden mukaisesti osoittautui todella laajaksi ja monimutkaiseksi kokonaisuudeksi, koska työkalun on tarkasteltava monia eri kuormitus- ja mitoitusilanteita. Työn toteuttamisen aikana kului paljon resursseja työn tekemiseen tarvittavan tiedon etsimiseen ja sen tulkitsemiseen. Löydetyistä tiedoista sai muodostettua ajan kuluessa vaatimustenmukaisen lopullisen kokonaisuuden laskentatyökalua varten.

Laskentatyökalu toteutettiin pääasiassa puhtaalta pöydältä ilman ennakkotietoja vaadituista asioista, joita laskennassa on huomioitava. Tämän lisäksi työkalun mahdollisimman yksinkertainen ja automatisoitu käytettävyys vaati joidenkin asioiden tekemistä useaan kertaan. Suunnittelijan lopulliseksi tehtäväksi jäi syöttää rakenteen mitoitukseen ja kuormitukseen liittyvät tiedot laskentatyökalun lopullisessa versiossa. Laskentapohjan viimeinen sivu sisältää yhteenvedon laskennan eri vaiheista, mistä suunnittelija voi tarkistaa mitoituskriteerien täyttymisen sekä niitä vastaavat käyttöasteet.

Opinnäytetyön yhtenä päätavoitteena oli luoda laskentatyökalusta sellainen kokonaisuus, että siitä saadaan muodostettua virallinen loppudokumentti. Tämän takia laskentatyökalu tehtiin englannin kielellä ja se sisältää Eurokoodiin liittyvät viittaukset niissä kohdissa, joissa sitä vaaditaan.

Haalauspalkkien suunnittelua ja mitoitusta varten kehitetyn laskentapohjan jatkokehitys on mahdollista. Rakenteen osalta laskentaa voidaan jatkokehittää koskemaan esimerkiksi useampia tuentatapauksia kuin ainoastaan kaksitukisia päistään nivelellisesti tuettuja palkkeja. Tämän lisäksi kuormaa kantavien nosturivaunujen lukumäärää voidaan mahdollisesti kasvattaa työssä käytetystä yhdestä nosturivaunusta ylöspäin. Kuormitukseen voidaan lisätä mahdolliset tuuli- ja lumikuormista aiheutuvat vaikutukset.

LÄHTEET

American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2003. AIAA Aerospace Design Engineers Guide. 5. Structural Design. 5. uudistettu painos. Luettu 15.3.2019.

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0046TCW3/aiaa-aerospace-design/structural-design>

Gardner, L. & Nethercot, D. A. 2011. Designers' Guide to Eurocode 3: Design of Steel Buildings EN 1993-1-1, -1-3 and -1-8. 2. uudistettu painos. Lontoo: ICE Publishing. Luettu 10.3.2019.

<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpDGEDSBEM/designers-guide-eurocode/designers-guide-eurocode>

Gulvanessian, H., Calgaro, J-A. & Holický, M. 2012. Designers' Guide to Eurocode - Basis of Structural Design EN 1990. 2. uudistettu painos. Lontoo: ICE Publishing. Luettu 10.3.2019.

<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpDGEBSDE1/designers-guide-eurocode/designers-guide-eurocode>

Kaitila, O., Martikainen, L., Saarinen, E., Leskelä, M.V., Kumar, R., Heinisuo, M., Saarinen, E., Inha, T., Kemppi, M., Yrjölä, P., Jyrkäs, K., Pekkinen, T. & Ilveskoski, O. 2014. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus. 2. uudistettu painos. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry.

Kouhi, J. 2006. Teräsrakenteiden mitoitus Eurocode 3:n (SFS-EN 1993) mukaan. Rakentajain kalenteri 102, 405–416.

<https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK060101.pdf>

Malinen, H. & Heinimö, J. 2002. Kierrätyspolttoaineen tuotanto ja käyttö Etelä-Savossa. VTT. Luettu 1.3.2019.

http://virtual.vtt.fi/virtual/waste/tiiv_t33uusi.htm

Ruukki. 2010. Hitsatut profiilit EN 1993 –käsikirja. Luettu 6.3.2018.

http://software.ruukki.com/Handbooks+and+Guides/Ruukki-Hitsatut-Profiilit-Kasikirja-2010_PDF-versio.pdf

SFS 1990. 2006. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 6.3.2019. Vaatii käyttöoikeuden.

<http://jkl0326vm71a.vstage.co/standards/>

SFS 1991-1-1. 2002. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Yleiset kuormat, tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 21.3.2019. Vaatii käyttöoikeuden.

<http://jkl0326vm71a.vstage.co/standards/>

SFS 1991-3. 2007. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 3: Nostureista ja muista koneista aiheutuvat kuormat. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 6.3.2019. Vaatii käyttöoikeuden.

<http://jkl0326vm71a.vstage.co/standards/>

SFS 1993-1-1/A2G. 1999. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Liite G vääntökestävyyden laskenta. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 19.3.2019. Vaatii käyttöoikeuden.

<http://jkl0326vm71a.vstage.co/standards/>

SFS 1993-1-1. 2005. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 6.3.2019. Vaatii käyttöoikeuden.

<http://jkl0326vm71a.vstage.co/standards/>

SFS 1993-1-5. 2006. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-5: Levyrakenteet. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 6.3.2019. Vaatii käyttöoikeuden.

<http://jkl0326vm71a.vstage.co/standards/>

SFS 1993-1-8. 2005. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitus. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 28.3.2019. Vaatii käyttöoikeuden.

<http://jkl0326vm71a.vstage.co/standards/>

SFS 1993-6. 2007. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 6: Nosturia kannattavat rakenteet. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 11.3.2019. Vaatii käyttöoikeuden.

<http://jkl0326vm71a.vstage.co/standards/>

Valmet. 2019. Liiketoimintalinjat. Sellu ja energia. Luettu 28.2.2019.

<https://www.valmet.com/fi/sijoittajat/valmet-sijoituskohteena/liiketoimintalinjat/sellu-ja-energia/>

Valmet. 2019. Energy production. CFB-boilers. Luettu 1.3.2019.

<https://www.valmet.com/energyproduction/cfb-boilers/>

Valmet. 2019. MyAcademy. Recovery boiler. Luettu 6.3.2019.

<https://www.myacademy.valmet.com>

Valmet. 2019. Valmet lyhyesti. Luettu 28.2.2019.

<https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/>

Valmet. 2019. Valmet lyhyesti. Liiketoiminnot. Luettu 28.2.2019.

<https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/>

Valmet. 2019. Valmet lyhyesti. Historia. Luettu 28.2.2019.

<https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/historia/>

Valmet. 2019. Valmetin toiminnot Suomessa. Luettu 28.2.2019.

<https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-suomessa/>

LIITTEET

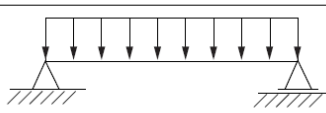
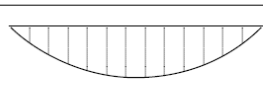
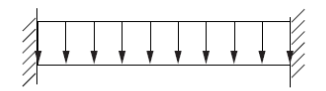
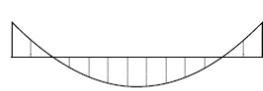
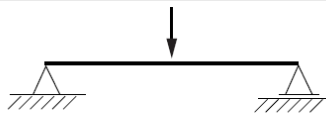
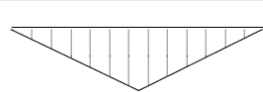
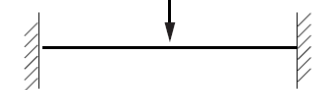
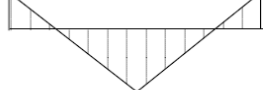
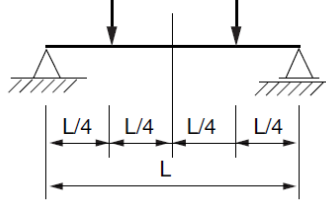
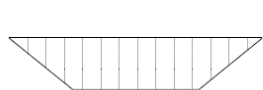
Liite 1. Eurokoodi 3:ssa sallitut kuumavalssatut rakenneteräkset (SFS 1993-1-1 2005, 26)

Standardi ja teräslaji	Nimellispaksuus t [mm]			
	t ≤ 40 mm		40 mm < t ≤ 80 mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550
EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490
EN 10025-6				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550

Liite 2. Nosturityyppejä vastaavat nostoluokat (SFS 1991-3 2007, 72)

Nro	Nosturityyppi	Nosto- luokka	S-luokat
1	Käsi käyttöiset nosturit	HC 1	S0, S1
2	Asennusnosturit	HC1, HC2	S0, S1
3	Voimalaitosnosturit	HC1	S1, S2
4	Varastonosturit – ajoittainen käyttö	HC2	S4
5	Varastonosturit, nostopuominosturit, romuttamonosturit – jatkuva käyttö	HC3, HC4	S6, S7
6	Korjaamonosturit	HC2, HC3	S3, S4
7	Siltanosturit, junttanosturit – kahmari- tai magneettikäyttö	HC3, HC4	S6, S7
8	Valimonosturit	HC2, HC3	S6, S7
9	Kuoppauunien nosturit	HC3, HC4	S7, S8
10	Valanteen irrotusnosturit, panostusnosturit	HC4	S8, S9
11	Takomonosturit	HC4	S6, S7
12	Kuljetussillat, puolipukkinosturit ja pukkinosturit, joissa on nostovaunu, tai kiertonosturi – koukkukäyttö	HC2	S4, S5
13	Kuljetussillat, puolipukkinosturit, pukkinosturit, joissa on nostovaunu, tai kiertonosturi – kahmari- tai magneettikäyttö	HC3, HC4	S6, S7
14	Hihnakuuljetinsilta, jossa on kiinteät tai liukuvat hihnat	HC1	S3, S4
15	Telakkanosturit, ramppinosturit, varustelunosturit – koukkukäyttö	HC2	S3, S4
16	Satamanosturit, kääntönosturit, uivat nosturit, nivelpuominosturit – koukkukäyttö	HC2	S4, S5
17	Satamanosturit, kääntönosturit, uivat nosturit, nivelpuominosturit – kahmari- tai magneettikäyttö	HC3, HC4	S6, S7
18	Nostokyvyltään suuret uivat nosturit, pukkinosturit	HC1	S1, S2
19	Laivan lastausnosturit – koukkukäyttö	HC2	S3, S4
20	Laivan lastausnosturit – kahmari- tai magneettikäyttö	HC3, HC4	S4, S5
21	Torninosturit rakennusteollisuudessa	HC1	S2, S3
22	Asennusnosturit, derrikinosturit – koukkukäyttö	HC1, HC2	S1, S2
23	Kiskoille asennetut kääntönosturit – koukkukäyttö	HC2	S3, S4
24	Kiskoille asennetut kääntönosturit – kahmari- tai magneettikäyttö	HC3, HC4	S4, S5
25	Rautatienosturit, jotka on hyväksytty junakäyttöön	HC2	S4
26	Kuormausnosturit, ajoneuvonosturit – koukkukäyttö	HC2	S3, S4
27	Kuormausnosturit, ajoneuvonosturit – kahmari- tai magneettikäyttö	HC3, HC4	S4, S5
28	Nostokyvyltään suuret kuormausnosturit, nostokyvyltään suuret ajoneuvonosturit	HC1	S1, S2

Liite 3. Kriittisen kiepahdusmomentin määrittämisessä tarvittavat C_1 , C_2 ja C_3 sekä niitä vastaavat k ja k_ω kertoimet (Ruukki 2010, 145, muokattu)

Tuentatapaukset sauvan päissä pysty akselin ympäri tapahtuvan kiertymän suhteen	Poikkipinnan käyristyminen estetty sauvan molemmissa päissä	Poikkipinta voi käyristyä sauvan molemmissa päissä	Poikkipinnan käyristyminen estetty sauvan toisessa päässä, toinen pää voi käyristyä		
Kiertymä estetty sauvan molemmissa päissä	$k = 0,5$ $k_{\omega} = 0,5$	$k = 0,5$ $k_{\omega} = 1,0$	$k = 0,5$ $k_{\omega} = 0,7$		
Kiertymä vapaa sauvan molemmissa päissä	$k = 1,0$ $k_{\omega} = 0,5$	$k = 1,0$ $k_{\omega} = 1,0$	$k = 1,0$ $k_{\omega} = 0,7$		
Kiertymä estetty sauvan toisessa päässä, toinen pää voi kiertyä vapaasti	$k = 0,7$ $k_{\omega} = 0,5$	$k = 0,7$ $k_{\omega} = 1,0$	$k = 0,7$ $k_{\omega} = 0,7$		
Kuormitus ja tukiehdot	Taivutusmomenttipinnan muoto	k	Tekijöiden arvot		
			C ₁	C ₂	C ₃
		1,0 0,5	1,132 0,972	0,459 0,304	0,525 0,980
		1,0 0,5	1,285 0,712	1,562 0,652	0,753 1,070
		1,0 0,5	1,365 1,070	0,553 0,432	1,730 3,050
		1,0 0,5	1,565 0,938	1,267 0,715	2,640 4,800
		1,0 0,5	1,046 1,010	0,430 0,410	1,120 1,890

Liite 4. Pyöräkuormien aiheuttamien taivutusjännitysten laskennassa
käytettävien c_x ja c_y kertoimien määrittely (SFS 1993-6 2007, 21, muokattu)

Pyöräkuormat eivät vaikuta lähellä laipan vapaata reunaa			
Jännitys		Palkit, joiden laipat ovat samansuuntaiset	
Pituussuuntai- nen taivutus-jännitys $\sigma_{O_x,Ed}$	c_{x0}	$= 0,050 - 0,580\mu + 0,148e^{3,015\mu}$	
	c_{x1}	$= 2,230 - 1,490\mu + 1,390e^{-18,33\mu}$	
	c_{x2}	$= 0,730 - 1,580\mu + 2,910e^{-6,000\mu}$	
Poikittainen taivutusjännitys $\sigma_{O_y,Ed}$	c_{y0}	$= -2,110 + 1,977\mu + 0,0076e^{6,530\mu}$	
	c_{y1}	$= 10,108 - 7,408\mu - 10,108e^{-1,364\mu}$	
	c_{y2}	$= 0,0$	
Pyöräkuormat vaikuttavat lähellä laipan vapaata reunaa			
Jännitys	Kerroin	Palkit, joiden laipat ovat samansuuntaiset	
		$\mu = 0,10$	$\mu = 0,15$
Pituussuuntai- nen taivutus-jännitys $\sigma_{O_x,Ed}$	c_{x0}	0,2	0,2
	c_{x1}	2,3	2,1
	c_{x2}	2,2	1,7
Poikittainen taivutusjännitys $\sigma_{O_y,Ed}$	c_{y0}	-1,9	-1,8
	c_{y1}	0,6	0,6
	c_{y2}	0,0	0,0

Liite 5. Eurokoodi 3:n mukaiset hyväksytyt standardiryhmät ruuviliitosten komponenteille (SFS 1993-1-8 2005, 9–10)

1.2.4 Viitestandardiryhmä 4: Ruuvit, mutterit ja aluslaatat

EN 14399-1:2002 ¹⁾	High strength structural bolting for preloading - Part 1: General Requirements
EN 14399-2:2002 ¹⁾	High strength structural bolting for preloading - Part 2: Suitability Test for preloading
EN 14399-3:2002 ¹⁾	High strength structural bolting for preloading - Part 3: System HR -Hexagon bolt and nut assemblies
EN 14399-4:2002 ¹⁾	High strength structural bolting for preloading - Part 4: System HV -Hexagon bolt and nut assemblies
EN 14399-5:2002 ¹⁾	High strength structural bolting for preloading - Part 5: Plain washers for system HR
EN 14399-6:2002 ¹⁾	High strength structural bolting for preloading - Part 6: Plain chamfered washers for systems HR and HV
EN ISO 898-1:1999 ¹⁾	Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel - Part 1: Bolts, screws and studs (ISO 898-1:1999)
EN 20898-2:1993 ¹⁾	Mechanical properties of fasteners - Part 2: Nuts with special proof load values - Coarse thread (ISO 898-2:1992)
EN ISO 2320:1997 ¹⁾	Prevailing torque type steel hexagon nuts - Mechanical and performance requirements (ISO 2320:1997)
EN ISO 4014:2000 ¹⁾	Hexagon head bolts - Product grades A and B (ISO 4014:1999)
EN ISO 4016:2000 ¹⁾	Hexagon head bolts - Product grade C (ISO 4016:1999)
EN ISO 4017:2000 ¹⁾	Hexagon head screws - Product grades A and B (ISO 4017:1999)
EN ISO 4018:2000 ¹⁾	Hexagon head screws - Product grade C (ISO 4018:1999)
EN ISO 4032:2000 ¹⁾	Hexagon nuts, style 1 - Product grades A and B (ISO 4032:1999)
EN ISO 4033:2000 ¹⁾	Hexagon nuts, style 2 - Product grades A and B (ISO 4033:1999)
EN ISO 4034:2000 ¹⁾	Hexagon nuts - Product grade C (ISO 4034:1999)
EN ISO 7040:1997 ¹⁾	Prevailing torque hexagon nuts (with non-metallic insert), style 1 - Property classes 5, 8 and 10
EN ISO 7042:1997 ¹⁾	Prevailing torque all-metal hexagon nuts, style 2 - Property classes 5, 8, 10 and 12
EN ISO 7719:1997 ¹⁾	Prevailing torque type all-metal hexagon nuts, style 1 - Property classes 5, 8 and 10
ISO 286- 2:1988 ¹⁾	ISO system of limits and fits - Part 2: Tables of standard tolerance grades and limit deviations for hole and shafts
ISO 1891:1979 ¹⁾	Bolts, screws, nuts and accessories - Terminology and nomenclature - Trilingual edition
EN ISO 7089:2000 ¹⁾	Plain washers- Nominal series- Product grade A
EN ISO 7090:2000 ¹⁾	Plain washers, chamfered - Normal series - Product grade A
EN ISO 7091:2000 ¹⁾	Plain washers - Normal series - Product grade C
EN ISO 10511:1997 ¹⁾	Prevailing torque type hexagon thin nuts (with non-metallic insert)
EN ISO 10512:1997 ¹⁾	Prevailing torque type hexagon thin nuts, style 1, with metric fine pitch thread - Property classes 6, 8 and 10
EN ISO 10513:1997 ¹⁾	Prevailing torque type all-metal hexagon nuts, style 2, with metric fine pitch thread - Property classes 8, 10 and 12