



Olli Kähkölä

KATTILAN KANNATUSPALKISTON PÄÄPALKKIEN ASENNUS- PAINON OPTIMOINTI

KATTILAN KANNATUSPALKISTON PÄÄPALKKIEN ASENNUS- PAINON OPTIMOINTI

Olli Kähkölä
Opinnäytetyö
Syksy 2014
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma, Rakennetekniikka

Tekijä: Olli Kähkölä:

Opinnäytetyön nimi: Kattilan kannatuspalkiston pääpalkkien asennuspainon optimointi

Työn ohjaaja: DI Ari Oikarinen, Oamk

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: 12/2014 Sivumäärä: 55 + 17 liitettä

Työssä tutkittiin, kuinka massiiviset soodakattilan primäärikannatinpalkit voidaan toteuttaa useammassa osassa. Tavoitteena oli jakaa primääripalkki osiin niin, että yksittäisen primääripalkin osa vastaa kannatinpalkiston suurimman sekundääripalkin massaa. Pienentämällä suurimpien palkkien massaa voidaan säästää asennuskustannuksissa. Lähtötilanteessa suurimman primääripalkin massa oli noin 110 tn. Työn lähtökohtana käytettiin Andritz Oy:n Uruguayhin toimitettavan soodakattilarakennuksen kattilapalkistoa ja Is-Plan Oy:n palkiston suunnittelemiseksi laadittua laskentamallia ja laskelmia.

Työssä kannatinpalkistolle määritettiin kuormat, jonka jälkeen primääripalkit mitoitettiin kahteen ja kolmeen osaan jaettuna palkkina ja vertailtiin asennettavien osien painoja ja palkin osien liitosten kiinnikemääriä. Työssä tutkittiin mahdollisia ongelmia, joita ilmenee palkkeja asentaessa, ja sitä, mitä näkökohtia suunnittelussa tulee ottaa huomioon, kun palkki asennetaan osina.

Saadut tulokset vastasivat odotuksia. Primääripalkit voidaan toteuttaa useammassa osassa. Suurimman primääripalkin yksittäisen osan massa saatiin vastaamaan suurinta sekundääripalkin massaa. Tulosten perusteella palkkien asennuskustannukset pienentyvät oleellisesti.

Asiasanat: teräsrakenteet, liittorakenteet, soodakattila, I-profiili

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Civil Engineering, Structural Engineering

Author(s): Olli Kähkölä
Title of thesis: Design of Primary Griders for Recovery Boiler
Supervisor(s): Ari Oikarinen, M Sc
Term and year when the thesis was submitted: Spring 2014
Pages: 55 + 17 appendices

The aim of this study was to design primary girders for recovery boiler so that the mass of individual beams would reduce. The current primary girders weigh about 110 tons. The objective was to decrease a single primary beam to correspond to the maximum mass of the secondary beam which is about 37 tons. The primary beams were divided into several sections which are connected with bolt connection. The starting point of the primary beam sharing was to reduce the installation cost. Light weight bars are less expensive to install because there is no need for such a large crane capacity.

The primary beams were designed to be shared in two and three parts for comparison purposes. The results were very good. When the primary beam was shared into three parts the single part weight was decreased responding to the maximum mass of the secondary beam. Then the primary beam weight increased slightly but a single part of primary beam remained at the target weight. Based on the results, it can be concluded that the installation costs are reduced compared to the original whole primary beam. Based on the results it could also be assumed that the smaller and lighter profiles transport costs will decrease.

Keywords: Recovery boiler, Steel structures, Steel beam, Composite structure

ALKULAUSE

Haluan kiittää Is-Plan Oy:n DI Risto Nurmista avustuksesta opinnäytetyön ongelmissa. Haluan kiittää myös DI Ari Oikarista opinnäytetyöni ohjauksesta. Suuri kiitos myös Andritz Oy:n RI Jari Heikkiselle mielenkiintoisesta aiheesta.

Tampereella 7.12.2014

Olli Kähkölä

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	12
2 HITSATUN PALKIN MITTOJEN VALINTA	13
2.1 Hitsattu profiili	13
2.1.1 Ohutuumainen I-profiili	14
2.1.2 Mittojen valinta	15
2.2 Yhteenveto	16
3 RAKENNEANALYYSI	18
3.1 Suunnittelustandardit	18
3.2 Rajatilamitoitus	18
3.3 Kuormitusyhdistelmät	19
3.4 Kuormat	22
3.4.1 Murtorajatilan kuormien yhdistely	24
3.4.2 Käyttörajatilan kuormien yhdistely	27
4 YHDISTETTY PALKKI	28
4.1 Yhdistetyn palkin taivutus, yleinen tarkastelu	28
4.1.1 Erikseen toimivat palkit	29
4.1.2 Yhdessä toimivat palkit	30
4.2 Profiilin mittojen valinnat	33
5 ASENNUSTILANNE	35
5.1 Osista kootun palkin tarkastelu	37
5.1.1 Hitsit	39
5.1.2 Päätyjäykiste	39
5.1.3 Liitokset	44
5.1.4 Osapalkin kiepahdus nostotilanteessa	47
5.1.5 Nostotilanne	49
6 TULOKSET	50
7 LOPPUSANAT	52
LIITE 1	Excel sovelluksen laskentasisivut
LIITE 2	Primääripalkki kahteen osaan jaettuna
LIITE 3	Primääripalkki kolmeen osaan jaettuna

MERKKIEN JA TERMIEN SELITYKSET

AISC "American Institute of Steel Construction". Yhdysvaltalainen instituutti, joka määrittää teräsrakentamisen suunnitteluohjeet Amerikassa

Bernoulli'n otaksuma

Palkin taipuessa ainepisteet siirtyvät siten, että ne pysyvät samoilla palkin akselia vastaan kohtisuorilla tasoilla

Eurokoodi Eurooppalainen kantavien rakenteiden suunnittelustandardi, jonka on laatinut eurooppalainen standardisointijärjestö CEN Euroopan komission toimeksiannosta

Hooken laki

Kappaleen muodonmuutoksen verrannollisuus voimaan

Jäykiste Hitsatun profiilin pitkittäis- ja poikittaisjäykisteet, joilla parannetaan hoikan uuman leikkauslommahduskestävyyttä

Kuormitusyhdistelmä

Yhteensopivat kuormituskaaviot, siirtymätilat ja epätarkkuudet, jotka otetaan huomioon samanaikaisesti kiinteiden muuttuvien kuormien ja pysyvien kuormien kanssa tapauskohtaisesti

NDT "Nondestructive testing". Hitsien laadullinen tarkistus ilman, että valmista lopputuotetta rikotaan

Normaalisti vallitseva mitoitustilanne

Mitoitustilanne, joka vallitsee rakenteen lähes koko suunnitellun käyttöajan ajan

Primääri Ensisijaisesti kuormia kannattava rakenteen osa

Sekundääri

Toissijainen kuormia kannattava rakenteen osa

A	Poikkileikkauksen pinta-ala (mm^2)
a	Hitsin a-mitta (mm) sekä jäykisteiden välinen etäisyys (mm)
A_{st}	Yhden kaksipuoleisen jäykisteen poikkipinta-ala, jolloin pinta-alaan lasketaan mukaan uuman molemmilla puolilla oleva osuus sekä jäykisteiden väliin jäävä uuman levyosa, jonka leveys on t_s (mm^2)
A_v	Leikkauspinta-ala (mm^2)
A_Q	Leikkausvoimapinnan pinta-ala (Nmm)
b	Poikkileikkauksen leveys (mm)
b_f	Laipan leveys (mm)
E	Kimmokerroin (N/m^2)
e_1, e_2	Ruuvien reunaetäisyys (mm)
e_c	Poikkileikkauksen neutraaliakselin ja puristetun laipan uloimman reunan välinen etäisyys (mm)
e_t	Poikkileikkauksen neutraaliakselin ja vedetyn laipan uloimman reunan välinen etäisyys (mm)
F_{Ed}	Jäykisteen kohdalla vaikuttavan pistekuorman tai tukireaktion mitoitusarvo murtorajatilassa (N)
f_u	Materiaalin nimellinen murtolujuus (N/mm^2)
f_y	Materiaalin nimellinen myötölujuus (N/mm^2)
f_{vd}	Leikkauslujuuden mitoitusarvo (N/mm^2)

$f_{vw,d}$	Hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvo (N/mm^2)
$f_{w,Rd}$	Hitsin kestävyden mitoitusarvo pituusyksikköä kohti (N/mm)
G	Poikkileikkauksen paino pituusyksikköä kohti (kg/m) sekä liukukeroin (N/mm^2)
h_w	Palkin uuman korkeus (mm)
I	(Brutto)poikkileikkauksen neliömomentti (mm^4)
I_p	Jäykisteen polaarin neliömomentti levyn kiinnitetyn reunan suhteen (mm^4)
I_{st}	Jäykisteen ja siihen liittyvien uuman viereisen levyosien yhteinen neliömomentti uuman tasoa vastaan kohtisuoraan suuntaan (mm^4)
I_t	Vääntöneliömomentti (mm^4)
I_z	Poikkileikkauksen neliömomentti z-akselin suhteen (mm^4)
I_y	Poikkileikkauksen neliömomentti y-akselin suhteen (mm^4)
I_w	Käyrystymisjäyhyys (mm^6)
L	Sauvan pituus sivusuunnassa tuettujen pisteiden välillä (kiepahdustukien väli) (mm)
$L_{cr,st}$	Jäykisteen nurjahduspituus taivutusnurjahduksessa tarkasteltavaan suuntaan (mm)
$M_{b,Rd}$	Kiepahduskestävyyden mitoitusarvo (Nmm)
$M_{c,Rd}$	Taivutuskestävyyden mitoitusarvo (Nmm)
M_{cr}	Kimmoiteorian mukainen kriittinen kiepahdusmomentti (Nmm)
M_{Ed}	Taivutusmomentin mitoitusarvo murtorajatilassa (Nmm)

N_{Ed}	Aksiaalisesti puristetun sauvan puristusvoiman mitoitusarvo murto- rajatilassa (N)
$N_{cr,st}$	Kimmenteorian mukainen kriittinen nurjahduskuorma kyseeseen tu- levalle nurjahdusmuodolle ja -suunnalle (N)
$N_{st,b,Rd}$	Aksiaalisesti puristetun jäykisteen nurjahduskestävyyden mitoi- tusarvo (N)
$N_{st,c,Rd}$	Jäykisteen poikkileikkauksen kestävyys (N)
$N_{st,ten}$	Profiilin uuman leikkausvoimasta muodostuva vetokenttäteorian mukaisen kalvojäännityksen pystykomponentti (N)
p_1, p_2	Ruuvien keskiöväli (mm)
Q_y	Poikkileikkauksessa vaikuttava leikkausvoima (N)
S_z	Tarkasteltavan pisteen ylä- tai alapuolella olevan poikkileikkauksen osan staattinen momentti koko palkin z-akselin suhteen (mm ³)
T_0	Ruuvien leikkauskestävyys ($F_{v,Rd}$) (N)
t_f	Laipan paksuus (mm)
t_w	Uuman paksuus (mm)
T_{xy}	Keskimääräinen leikkauksiännitys suunnassa x-y (N/mm ²)
V_{ed}	Leikkausvoiman mitoitusarvo murtorajatilassa (N)
$V_{pl,Rd}$	Plastinen leikkauskestävyys (N)
W_{el}	Poikkileikkauksen kimmenteorian mukainen taivutusvastus (mm ³)
W_{pl}	Poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutusvastus (mm ³)
β_w	Hitsin lujuuskerroin

γ_{M0}	Kestävyyden osavarmuusluku
γ_{M1}	Kestävyyden osavarmuusluku
γ_{M2}	Kestävyyden osavarmuusluku liitoslaskennassa
ΔN_{st}	Jäykisteeseen kohdistuva aksiaalinen lisävoima (N)
λ_{st}	Jäykisteen muunnettu hoikkuus
ρ	Teräksen tiheys (kg/m^3)
Φ_{LT}	Nurjahduskestävyyden pienennystekijän suhde
χ	Nurjahduskestävyyden pienennystekijä
χ_{LT}	Kiepahduskestävyyden pienennystekijä

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö on tutkimus- ja suunnittelutyö. Opinnäytetyössä asiakkaana oli teräsrakenteisiin ja erityisesti teollisuusrakentamiseen erikoistunut suunnittelu-toimisto Is-Plan Oy, joka on osa Finnmap Consulting Oy -konsernia. Is-Plan Oy on Vantaalla toimiva konsulttitoimisto, jonka suunniteltavat kohteet sijaitsevat pääasiallisesti ulkomailla. (1.)

Andritz AG on Itävaltalainen konepajateollisuuden yritys, jolla on Suomessa tytäryhtiö Andritz Oy. Varkaudessa sijaitseva Andritz Recovery Division toimittaa järjestelmiä, laitteita ja palveluita selluteollisuudelle. (2.)

Opinnäytetyön lähtökohtana oli tutkia ja suunnitella, kuinka massiiviset soodakattilan kannatuksen primääripalkit voidaan toteuttaa useampaan osaan jaettuina palkkina, jotka kootaan yhdeksi palkiksi asennuksen yhteydessä. Lähtötietona toimi Uruguayhyn valmistunut UPM-Kymmenen sellutehtaan soodakattilalaitos. Opinnäytetyön tilaajana toimi Andritz Oy, joka halusi selvityksen kattilan kannatuksen primääripalkkien jakamisesta pienempiin osiin. Lähtötilanteessa teräksiset primäärikannatin palkit painoivat 75 - 110 tn.

Työn tavoitteena oli pienentää primääripalkkien asennuskustannuksia, sillä nykyiset primääripalkit vaativat todella suuren nostokaluston asennuskohteessa. Jakamalla primääripalkit useampiin osiin yksittäisen palkin massa pienentyy olennaisesti, ja tällöin myös nostokapasiteetin ei tarvitse olla niin suuri. Tavoitteena oli pienentää yksittäisen primääripalkin massaa siten, että se vastaa kattilapalkiston suurimman sekundääripalkin massaa. Suurin sekundääripalkki on massaltaan noin 37 tn.

Opinnäytetyössä määritettiin kannatinpalkistolle tulevat kuormat Autodesk Robot Structural Analysis -ohjelmistolla sekä ehdotus uudentyyppiselle palkistolle mallinnetaan Tekla Structures -tietomalliohjelmistolla. Primääripalkkien liitok-sista laadittiin Excel-sovellus, jonka avulla voidaan laskea tarvittavat ruuvimää-rät liitoksiin (liite 1).

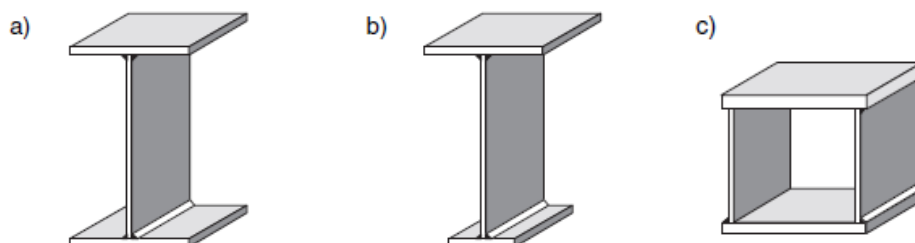
2 HITSATUN PALKIN MITTOJEN VALINTA

Hitsattujen profiilien etuna valssattuihin profiileihin on optimoinnin perusteella saavutettu painonsäästö. Optimoinnissa profiilille valitaan mitat, jotka täyttävät profiilille asetetut vaatimukset. Optimointi ei kuitenkaan takaa profiilin kestävyyttä, mutta mitat toimivat suuntaa antavina, joiden perusteella tarkempi mitoitus voidaan aloittaa. (3, s. 32.)

Hitsattu profiili voidaan yleensä valmistaa valssattua profiilia kevyempänä myös silloin, kun rakennekorkeus on rajoitettu. Yleisesti voidaan sanoa, että matalia profiileja ei kannata valmistaa hitsaamalla, sillä niistä saatu painonsäästö ei ole merkittävä verrattuna konepajakustannuksiin. (3, s. 32.)

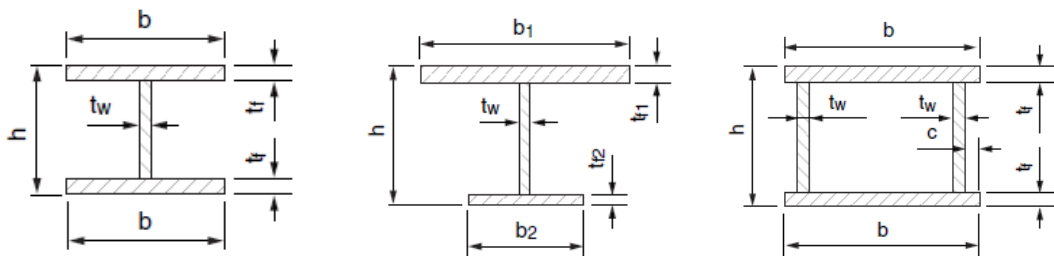
2.1 Hitsattu profiili

Hitsattujen profiilien etuna verrattuna valssattuihin profiileihin on muunneltavuus ja keveys eri käyttökohteisiin siten, että materiaalin menekki on mahdollisimman optimaalinen. Suunnittelijalla on mahdollisuus valita profiilin poikkileikkauksen mitat, mutta suositeltavat levykoot ja valmistussarjat on syytä ottaa huomioon. Tämä johtaa taloudellisempaan valmistukseen, sillä samankokoiset profiilit voidaan valmistaa samoilla valmistusasetuksilla. Hitsattujen profiilien yleisimmät käyttökohteet ovat siltojen palkistot, nosturiratapalkit sekä teollisuuden massiiviset kannatinpalkit ja pilarit. Kuvassa 1 on esitetty hitsattujen profiilien poikkileikkauksia. (3, s. 10 - 11.)



KUVA 1. Tyypillisiä hitsattujen profiilien poikkileikkauksia (3, s. 11)

Talon- ja teollisuusrakentamisessa yleisin profiilimuoto on I-profiili (kuva 1a). Epäsymmetrisiä I-profiileja käytetään yleisesti nosturiratapalkkeina ja siltapalkkeina (kuva 1b). Kuvan 1c kotelopalkkia (WB-profiili) käytetään pilarina sekä palkkina. Etuna kotelopalkissa on sen suuri vääntöjäykkyys verrattuna I-profiiliin. Tällöin kotelopalkin kiepahdus ei yleensä määrää niiden taivutuskestävyyttä. (3, s. 11 - 140.) Kuvassa 2 on esitetty hitsattujen profiilien yleisesti käytetyt merkinnät.



KUVA 2. Yleisesti käytetyt profiilien merkinnät (3, s. 12)

Hitsatun profiilin valmistus on tehokasta numeerisesti ohjattujen laitteistojen (NC) ansiosta, jolloin esimerkiksi levyosat polttoleikataan ja liitososien reiät porataan automaattisesti konepajapiirustusten mukaisesti. Levyosien hitsaukset voidaan myös osittain tehdä nopeasti ja taloudellisesti automatisoitujen hitsausrobottien ansiosta. (3, s. 10.)

Hitsatun profiilin taloudellisuus riippuu monista asioista, kuten teräksen hinnasta, konepajakustannuksista sekä kuljetus- ja asennuskustannuksista. Maantieteelliset erot kustannuksissa ovat erittäin suuret. Esimerkiksi suomalaisen ja kiinalaisen teräksen ja konepajakustannuksien hinnat eroavat suuresti. (3, s. 31.)

2.1.1 Ohutuomainen I-profiili

Teräsprofiilit jaetaan standardin SFS-EN 1993-1-1 mukaan neljään eri poikkileikkausluokkaan. Samassa poikkileikkauksessa voi olla eri poikkileikkausluokkaan kuuluvia rakenneosia (laipat ja uuma). Poikkileikkausluokka määräytyy poikkileikkauksen puristettujen osien leveys- ja paksuussuhteista sekä profiilin jännitystilasta. Poikkileikkauksen puristettuun osaan kuuluvat profiilin osat, joi-

hin vallitsevan kuormituksen vaikutuksesta syntyy joko täysin tai osittainen puristus. Profiilin poikkileikkausluokka voi olla erilainen taivutuksessa ja puristuksessa. (3, s. 77.)

Poikkileikkausluokan 4 profiilia kutsutaan ohutuumaiseksi profiiliksi, jossa poikkileikkauksen kestävyys määräytyy puristettujen osien paikallisen lommahdusten perusteella. Tämän vuoksi poikkileikkausluokan 4 poikkileikkauksesta vain osa on tehollista, ja tällöin poikkileikkauksen kestävyudet lasketaan vain tehollisten pinta-alojen perusteella. Ohutuumaisten profiilien tehollinen poikkileikkaus on erilainen taivutuksessa kuin puristuksessa. (4, s. 40.)

Erityisesti ohutuumaisten hitsatun profiilin mittojen valinnassa tulee ottaa huomioon stabiiliusilmiöt. Hoikkaa ohutuumaista I-palkkia ei voida yleensä käyttää pitkillä jänneväleillä, jos palkin kiepahdusta ei estetä. Kiepahdus voidaan estää esimerkiksi jäykistyssauvoilla. Ohutuumainen palkki on myös altis leikkauslommahdukselle, jossa uuma lommahtaa leikkausvoiman vaikutuksesta ennen kuin plastinen leikkauskestävyys saavutetaan. Lommahduskestävyyttä voidaan parantaa uuman poikittais- ja pitkittäisjäykisteillä. (3, s. 31, 140, 154.)

2.1.2 Mittojen valinta

Jos primääripalkin mittojen valinnassa käytetään poikkileikkausluokan 3 mukaisia mittasuhteita, tulee uumasta tarpeettoman paksu suhteessa vaadittavaan leikkauskestävyyteen. Palkin uuman mitat tarkistetaan poikkileikkausluokan 4 ja laipat poikkileikkausluokan 3 mukaan. Tässä mittojen tarkastuksessa ei oteta huomioon leikkausvoimaa ja palkkia ei ole mitoitettu suunnittelukuormille. Mittojen tarkastuksessa noudatetaan Hitsatut Profiilit EN 1993 -käsikirjan ohjeita (kaavat 1 - 5). (3, s. 38.)

$$h_w = \sqrt[3]{\eta_w M_{Ed} / (f_y / \gamma_{M0})} \quad \text{KAAVA 1}$$

$$t_w = h_w / \eta_w \quad \text{KAAVA 2}$$

$$t_f = \frac{h_w}{\sqrt{2\eta_f \eta_w}} = \sqrt{\eta_w / (2\eta_f)} * t_w \quad \text{KAAVA 3}$$

$$b_f = 2\eta_f t_f + t_w \quad \text{KAAVA 4}$$

$$G = [3\eta_w + \sqrt{2\eta_w/\eta_f}] * (h_w/\eta_w)^2 * \rho$$

KAAVA 5

M_{Ed} Poikkileikkauksessa vaikuttava suurin taivutusmomentti murtorajatilassa (Nmm)

$$\eta_w \quad \frac{h_w}{t_w} = kE/f_y$$

k 0,55 kun laippa kuuluu poikkileikkausluokka 3:n

$$\eta_f \quad \frac{c}{t_f} = 14\varepsilon \quad \text{missä}$$

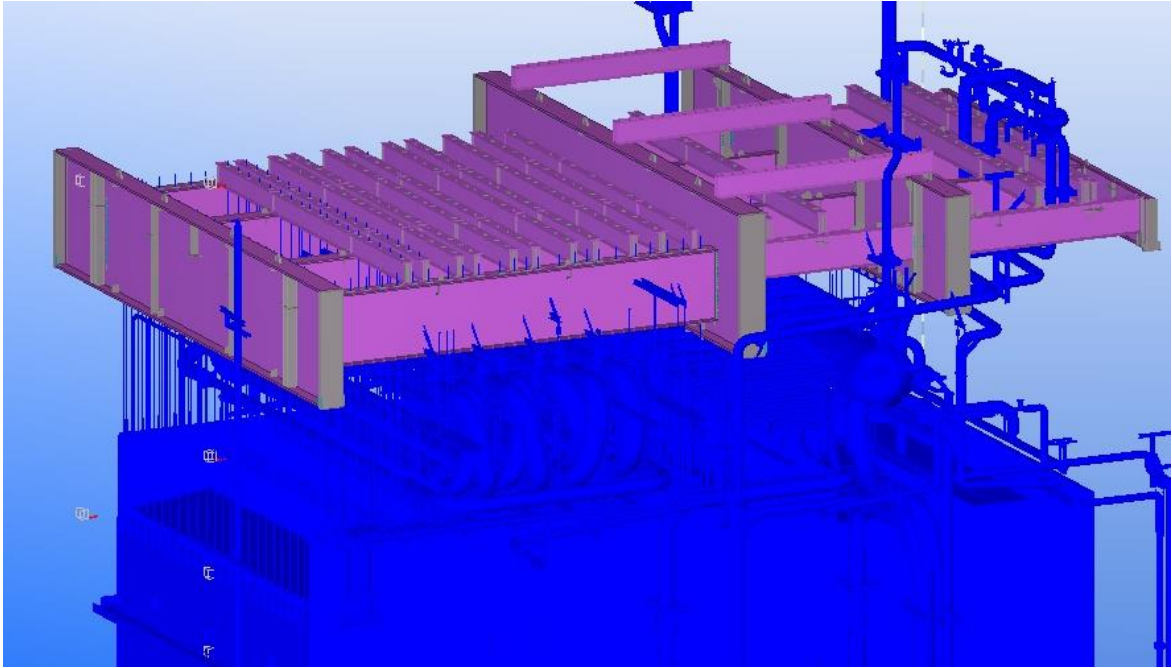
$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$$

2.2 Yhteenveto

Laskelmien perusteella voidaan todeta, että palkin korkeusluokka on lähellä todellista palkin korkeutta. Optimoinnissa ei tarkastella palkin uuman lommahduskestävyyttä, joka olisi hyvin pieni verrattuna poikkileikkausluokan 3 palkkiin. Voidaan myös todeta, että ohutumainen palkki vaatisi poikittaisjäykisteet, jotka lisäävät palkin massaa ja valmistus kustannuksia.

Optimoinnissa täytyy huomioida prosessilaitoksen layout-suunnitelma, jossa kannatinpalkkeille on määritetty sijainti- ja korkoehdot. Voidaan todeta, että nämä ehdot eivät toteudu saaduilla optimointituloksilla.

Yhteenvetona voidaan todeta, että primääripalkit toteutetaan poikkileikkausluokassa 3, jolloin voidaan käyttää prosessilaitoksen layout-suunnitelman mukaisia reunaehtoja. Kuvassa 3 on esitetty Andritzin layout-suunnitelman mukainen kannatinpalkkisto, kattila sekä kattilan putkistoja.



KUVA 3. Kattilan kannatinpalkisto, kattila ja kattilan putkistoja (Tekla Structures)

3 RAKENNEANALYYSI

Rakenneanalyysissä määritetään kattilan kannatuspalkeille kuormat, joiden mukaan varsinainen suunnittelu ja mitoitus tehdään. Kannatinpalkit mallinnettiin Autodesk Robot Structural Analysis -ohjelmistolla, joka on rakennesuunnittelua varten tehty FEM-analyysi ja mitoitusohjelmisto. (5.)

3.1 Suunnittelustandardit

Autodesk Robot Structural Analysis mahdollistaa monien eri suunnittelustandardien käytön. Opinnäytetyössä käytettiin eurooppalaista SFS EN 1993-1-1 -suunnittelunormia, vaikka todellinen rakennuspaikka oli Etelä-Amerikan valtio Uruguay, jossa käytetään yleisesti AISC-standardia. Opinnäytetyön suurimpana tavoitteena oli kuitenkin tutkia mahdollisuuksia yksittäisen palkin massan pienentämiseen, jolloin suunnittelustandardilla ei ole merkitystä lopputuloksen kannalta. Voidaan kuitenkin olettaa, että kannattimien profiilikoot ovat lähestulkoon samankaltaisia, oli sitten käytössä Eurokoodi tai AISC-standardi.

3.2 Rajatilamitoitus

Rajatilamitoitus perustuu asianomaista rajatilaa varten muodostettuihin rakenne- ja kuormitusmalleihin. Rajatilamitoituksessa mikään rajatila ei saa ylittyä, kun käytetään asianmukaisia mitoitusarvoja kuormille ja materiaaliominaisuuksille. Rajatilamitoituksessa valitaan kuormitusyhdistelmät selvittämällä samanaikaisesti vaikuttavat kuormitukset, siirtymätilat ja epätarkkuudet, jotka otetaan huomioon samanaikaisesti muuttuvien ja pysyvien kuormien kanssa. Rakenteet mitoitetaan siten, että murto- ja käyttörajatila huomioidaan erikseen. (6, s. 28.)

Rakenteissa murtorajatiloina yleensä ovat

- murtuminen rakenteen kestävyuden kannalta kriittisessä kohdassa
- rakenteen stabiiliuden menetys
- rakenteen siirtyminen ja liian suuret siirtymät
- rakenteen muuttuminen mekanismiksi (6, s. 28).

Käyttörajoitiloina yleensä ovat

- rakenteen taipuma
- rakenteen värähtely
- rakenteen pysyvät muodonmuutokset (6, s. 29).

Taipumien käyttörajoituksen taipumarajaksi on sovittu laitetoimittajan kanssa arvo L/800, sillä sen katsottiin soveltuvan paremmin käyttökohteeseen kuin SFS-EN 1993-1-1 kansallisen liitteen taulukon 7.1 (FI) käyttörajoitilat (taulukko 1). (7, s. 5.)

TAULUKKO 1. Taipumien ja siirtymien käyttörajoitilat (7, s. 5)

Rakenne	Taipuman tai siirtymän raja-arvo
Pääkannattajat -vesikatoksissa ja katoksissa -välipohjissa	L/300 L/400
Ullokkeet	L/150
Katto-orret	L/200
Semäorret	L/150
Muotolevyt -katoissa, joissa ei ole vesikeräytymien tai katteen vaurioitumisen vaaraa -katoissa, joissa vesikeräytymien tai katteen vaurioitumisen vaara on olemassa -kun $L \leq 4,5$ m -kun $4,5 \text{ m} < L \leq 6,0$ m -kun $L > 6,0$ m -välipohjissa -seinissä -ulokkeissa	L/100 L/150 30 mm L/200 L/300 L/100 L/100
Rakenteen vaakasiirtymän rajatila -1 ja 2 kerroksiset rakennukset -muut rakennukset	H/150 H/400
L on jänneväl	
H on rakennuksen tarkasteltavan kohdan korkeus	
Rakennukset, jossa on nosturirata, ks. standardi SFS-EN 1993-6 ja sen kansallinen liite	

3.3 Kuormitusyhdistelmät

Kuormien yhdistelyssä noudatetaan standardia SFS-EN 1990 ja sen kansallista liitettä. Kuormitusyhdistelyissä pysyvät ja muuttuvat kuormat, yhdistetään kokonaiseksi kuormavaikutukseksi osavarmuuslukujen ja kuormien yhdistelykertoimien avulla. Yhdistelykertoimet on esitetty standardissa SFS-EN 1990 kansallisen liitteen taulukossa A.1 (FI) ja taulukossa 2. (8, s. 2.)

TAULUKKO 2. Yhdistelykertoimien ψ -arvot (8, s. 2)

Kuorma	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (katso SFS-EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Luokka G: liikennöitävät tilat, $30\text{kN} < \text{ajoneuvon paino} \leq 160$ kN	0,7	0,5	0,3
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma (katso SFS-EN 1991-1-3)* ¹ kun $s_k < 2,75$ kN/m ²	0,7	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75$ kN/m ²	0,7	0,5	0,2
Jääkuorma **)	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat (katso SFS-EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (katso SFS-EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
<p>*¹) Ulkotasoilla ja parvekkeilla $\psi_0 = 0$ luokkien A, B, F ja G yhteydessä. Huom: Mikäli rakennuksessa on eri kuormaluokkia, joita ei voi erotella omiin selviin ryhmiinsä, käytetään ψ-arvoja, jotka antavat epäedullisimman vaikutuksen. **²) Lisätty Suomen kansalliseen liitteeseen.</p>			

Kuormakerroin K_{fi} on kerroin, joka sisällytetään kuormitusyhdistelyihin kuormien laskennassa. K_{fi} -kerroin määräytyy rakenteen seuraamusluokasta (CC). K_{fi} -kertoimia käytetään murtorajatilan kuormia laskettaessa, mutta käyttörajatilamitoituksessa kerrointa ei oteta huomioon. Seuraamusluokat on esitetty standardin SFS-EN 1990 kansallisen liitteen taulukossa B1 (FI) sekä taulukossa 3. (8, s. 6.)

TAULUKKO 3. Seuraamusluokkien määrittely (8, s.6)

Seuraamusluokka	Kuvaus	Rakennuksia sekä rakenteita koskevia esimerkkejä
CC3	Suuret seuraamukset ihmishenkien menetysten <i>tai</i> hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Rakennuksen kantava runko ¹⁾ jäykistävine rakennusosineen sellaisissa rakennuksissa, joissa usein on suuri joukko ihmisiä kuten <ul style="list-style-type: none"> – yli 8-kerroksiset²⁾ asuin-, konttori- ja liikerakennukset – konserttisalit, teatterit, urheilu- ja näyttelyhallit, katsomot – raskaasti kuormitetut tai suuria jännevälejä sisältävät rakennukset
		Erikoisrakenteet kuten esim. suuret mastot ja tornit Luiskat sekä penkereet ja muut rakenteet hienorakeisten maalajien alueilla siirtymien häiritseviksi herkissä ympäristöissä.
CC2	Keskisuuret seuraamukset ihmishenkien menetysten <i>tai</i> merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Rakennukset ja rakenteet, jotka eivät kuulu luokkiin CC3 tai CC1
CC1	Vähäiset seuraamukset ihmishenkien menetysten <i>tai</i> pienten tai merkityksettömien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	1- ja 2-kerroksiset rakennukset, joissa vain tilapäisesti oleskelee ihmisiä kuten esim. varastot Rakenteet, joiden vaurioitumisesta ei aiheudu merkittävää vaaraa kuten <ul style="list-style-type: none"> – matalalla olevat alapohjat, ilman kellaritiloja – ryömintätilaiset vesikatot, kun yläpohja on varsinainen kantava rakenne – sellaiset ulko- ja väliseinät, ikkunat, ovet ja vastaavat, joihin pääasiassa kohdistuu ilman paine-eroista aiheutuva sivuttaiskuormitus ja jotka eivät toimi kantavan tai jäykistävän rungon osana – standardin SFS-EN 1993-1-3:n rakenneluokkien (structural class) II ja III muotolevyrakenteet. – standardin SFS-EN 1993-1-3:n rakenneluokan (structural class) I muotolevyrakenteet levyyn taivutusta aiheuttaville pintaa vasten kohtisuorille kuormille³⁾.

Saman standardin taulukossa B2 on esitetty Kfi-kertoimen arvo seuraamusluokan perusteella:

- seuraamusluokka CC3 $K_{fi}=1,1$
- seuraamusluokka CC2 $K_{fi}=1,0$
- seuraamusluokka CC1 $K_{fi}=0,9$ (8, s. 7.).

Opinnäytetyössä käytettiin seuraamusluokkaa CC2, jolloin kuormakerroin $K_{fi}=1,0$.

Vaikka taloudelliset kustannukset rakenteen sortumisen johdosta olisivatkin suuret, voidaan olettaa, että kuormat eivät muutu oleellisesti kattilan käytön aikana. Lähtötiedoissa oli annettu suurin mahdollinen pysyvä- ja muuttuvakuorma, joka kohdistuu kannatinpalkeille. Tämän vuoksi opinnäytetyössä päädyttiin taulukon 3 mukaan seuraamusluokka CC2:en. Toisaalta ei olisi väärin käyttää myös seuraamusluokan CC3 K_{fi} arvoa 1,1.

3.4 Kuormat

Kannatinpalkeille muodostettiin murto- ja käyttörajatilan kuormayhdistelyt, jotka analysoitiin erikseen. Tuulikuormaa laskelmissa ei otettu huomioon.

Kannatinpalkeille aiheutuvat kuormat saatiin lähtötietoina laitetoimittajalta. Lähtötiedoissa oli ilmoitettu jokaiselle palkille tulevat kuormat kuvan 4 mukaisesti. Kannatinpalkeille muodostuu neljää eri kuormaa, jotka tulee huomioida rakeneanalyysissä erikseen.

LOADS:	
EL	= EMPTY OR EQUIPMENT LOAD CLEAN BOILER LOAD
OL	= OPERATIONAL LOAD
FL	= FLOODED LOAD (TESTING)
AL	= ASSEMBLY LOAD
<u>EQUIPMENT</u>	<u>FL</u> - <u>OL</u> - <u>EL</u> - <u>(AL)</u> ton
<u>Npcs x ROD LOAD</u>	<u>ØROD DIA</u>
TOTAL LOAD	9802 - 8095 - 6409 t

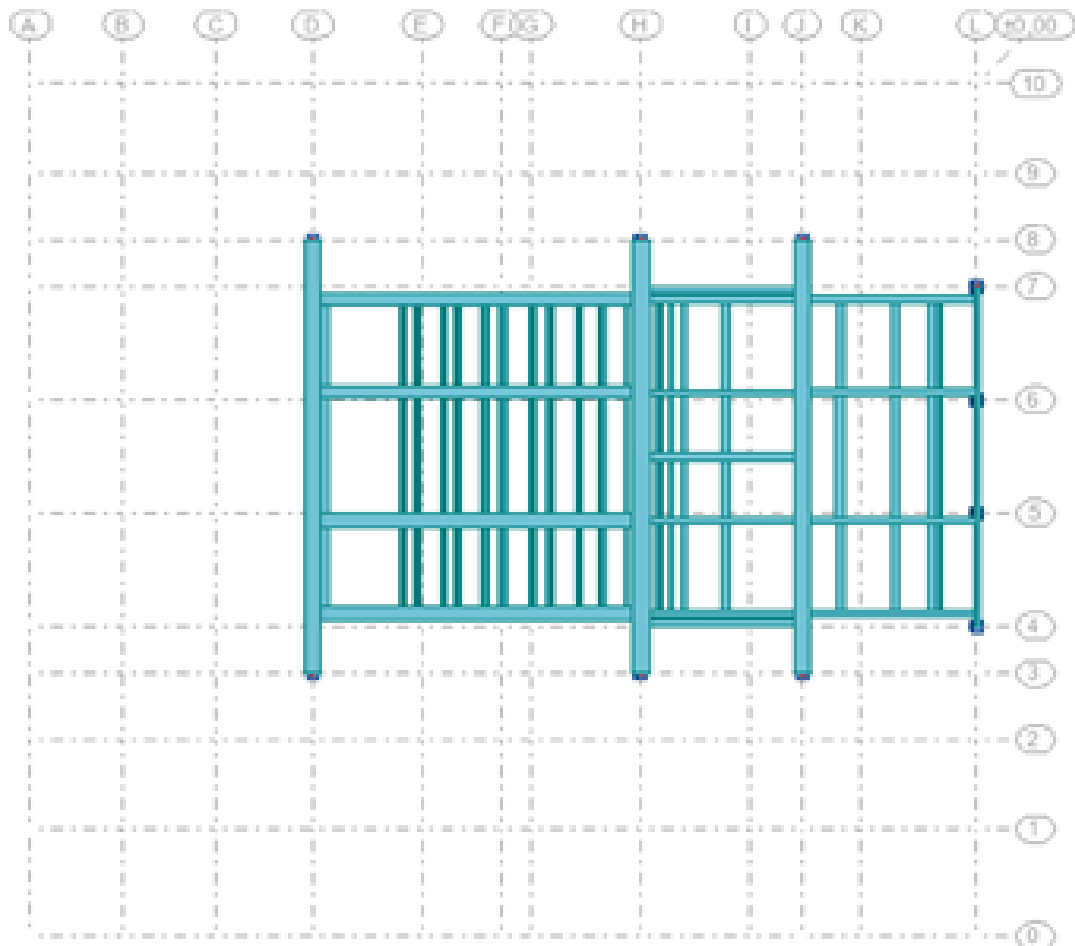
KUVA 4. Selitykset kattilan kuormista eri tilanteissa

missä

- EL tyhjän kattilan tai tyhjänä olevan kattilan laitekuormat
- OL kattilan kuormat käytön aikana (sisältää pysyvät kuormat)
- FL kattilan kuorma testikäytön aikana (sisältää pysyvät kuormat)

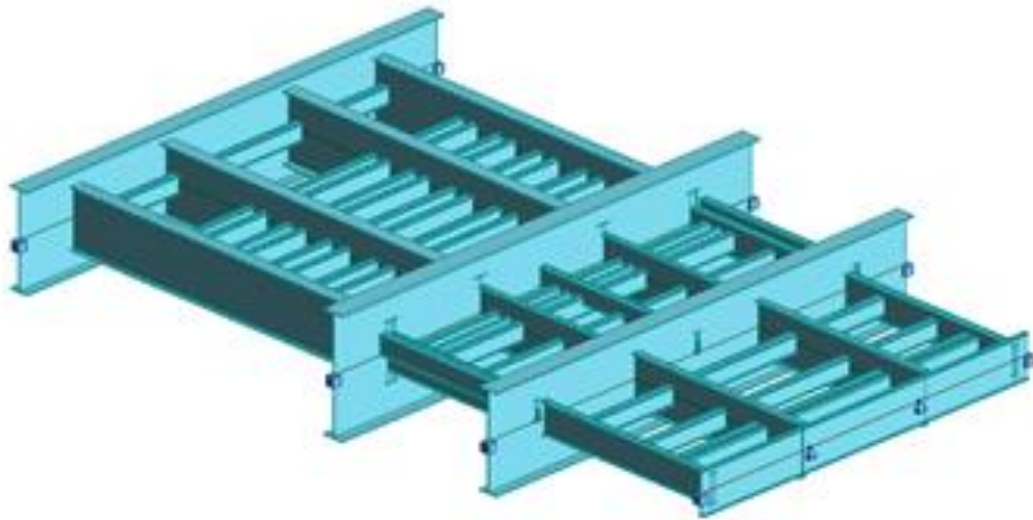
- AL asennusaikaiset kuormat (sisältää pysyvät kuormat).

Kuvassa 5 on esitetty Autodesk Robot Structures Analysis -ohjelmistolla mallinnettu kattilan kannatuspalkkisto ylhäältä kuvattuna.



KUVA 5. Kannatinpalkkisto ylhäältä kuvattuna

Kuvassa 6 on esitetty Autodesk Robot Structures Analysis 3D -malli kattilapalkkistosta.



KUVA 6. 3D-malli kannatinpalkistosta

3.4.1 Murtorajatilan kuormien yhdistely

Murtorajatilan kuormat yhdistellään normaalisti vallitsevissa mitoitusilanteissa standardin SFS-EN 1990 kansallisen liitteen taulukon A.1.2(B) (FI) ja taulukon 4 mukaisesti. (8, s. 4.)

TAULUKKO 4. Kuormien mitoitusarvot (SRT/GEO) (Sarja B) (8, s. 4)

Normaalisti vallitsevat ja tilapäiset mitoitusolot	Pysyvät kuormat		Määrävä muuttuva kuorma (*)	Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat (*)
	Epäedulliset	Edulliset		
(Yht. 6.10a)	$1,35 K_{FI} G_{kj, sup}$	$0,9 G_{kj, inf}$		
(Yht. 6.10b)	$1,15 K_{FI} G_{kj, sup}$	$0,9 G_{kj, inf}$	$1,5 K_{FI} Q_{k,1}$	$1,5 K_{FI} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

(*)Taulukon A.1.1 mukaiset kuormat ovat muuttuvia kuormia.

Huom. 1: Mitoituskaavana asia voidaan ilmaista siten, että kuormien yhdistelmänä käytetään epäedullisempaa kahdesta seuraavasta lausekkeesta, jolloin on huomattava, että jälkimmäinen lauseke sisältää vain pysyviä kuormia:

$$\begin{cases} 1,15 K_{FI} G_{kj, sup} + 0,9 G_{kj, inf} + 1,5 K_{FI} Q_{k,1} + 1,5 K_{FI} \sum_{i>1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \\ 1,35 K_{FI} G_{kj, sup} + 0,9 G_{kj, inf} \end{cases}$$

K_{FI} riippuu standardin SFS-EN 1990 liitteen B taulukon B2 mukaisesta luotettavuusluokasta seuraavasti:

luotettavuusluokassa RC3 $K_{FI} = 1,1$
 luotettavuusluokassa RC2 $K_{FI} = 1,0$
 luotettavuusluokassa RC1 $K_{FI} = 0,9$.

Luotettavuusluokkia selventävät seuraamusluokat CC3 ... CC1 esitetään liitteessä B.

Huom. 2: Katso myös standardeista SFS-EN 1992 ... SFS-EN 1999 pakkosiirtymä- tai pakkomuodonmuutostilalle käytettäviä osavarmuusluvun γ -arvoja.

Huom. 3: Kaikkien samasta syystä aiheutuvien pysyvien kuormien ominaisarvot kerrotaan osavarmuusluvulla $\gamma_{G, sup}$, jos kuorman kokonaisvaikutus on epäedullinen ja osavarmuusluvulla $\gamma_{G, inf}$, jos kuorman kokonaisvaikutus on edullinen. Esimerkiksi kaikkien rakenteen omasta painosta aiheutuvien kuormien voidaan katsoa aiheutuvan samasta syystä; tämä pitää paikkansa silloinkin, kun kyseessä on erilaisia materiaaleja.

Huom. 4: Erytistarkasteluissa osavarmuuslukujen γ_G ja γ_Q arvot voidaan jakaa osiin γ_g ja γ_q ja mallin epävarmuuskertoimeen γ_{Sd} . Useimmissa tapauksissa voidaan käyttää välillä 1,05 ... 1,15 olevaa epävarmuuskertoimen γ_{Sd} arvoa.

Huom. 5: Pohjarakenteiden geoteknisen suunnittelun osalta katso standardi SFS-EN 1997-1 kansallisine liitteineen.

Rakenteiden mitoituksen kuormayhdistelyissä käytettiin taulukon 4 yhtälöä 6.10b, jossa kuormien vaikutus on epäedullinen. Pysyvät kuormat kerrotaan arvolla 1,35 ja muuttuvat kuormat arvolla 1,5. Kuormayhdistely, joka sisälsi vain pysyviä kuormia, kerrottiin epäedullisen kuorman vaikutuksen kertoimella 1,35. Kaavoissa 6 ja 7 on esitetty yksinkertaistetut muodot kuormien mitoitusarvosta, joita laskelmissa käytettiin.

$$1,15K_{fi}G_{kj,sup} + 1,5K_{fi}Q_{k,1}$$

KAAVA 6

kuitenkin vähintään

$$1,35K_{fi}G_{k,j}$$

KAAVA 7

$G_{kj,sup}$ pysyvän kuorman ominaisarvon yläraja

$G_{kj,inf}$ pysyvän kuorman ominaisarvon alaraja

$Q_{k,1}$ määräävän muuttuvan kuorman 1 ominaisarvo

ψ_0 muuttuvan kuorman yhdistelykerroin (mm. ominaisyhdistelmässä)

ψ_1 muuttuvan kuorman tavallisen arvon yhdistelykerroin

ψ_2 muuttuvan kuorman pitkäaikaisarvon yhdistelykerroin.

K_{fi} kuormakerroin.

”+” yhdistäminen toisen kuormitusvaikutuksen kanssa.

Murtorajatilan kuormitusyhdistelyiksi luotiin seuraavanlaiset yksinkertaiset kuormitustapaukset.

1. $1,35*DL$
2. $1,15*DL + 1,5*OL$
3. $1,15*DL + 1,5*FL$
4. $1,15*DL + 1,5*AL$.

$DL=$ Dead Load (kattilapalkkien ja kattilan omapaino EL)

$OL=$ Operational Load (kattilan kuormat käytönaikana, jotka ei sisällä kattilan ja kattilan laitekuormia)

$FL=$ Flooded Load (kattilan testikuorman kuormat, jotka ei sisällä kattilan ja kattilan laitekuormia)

$AL=$ Kattilan asennusaikaiset muuttuvat kuormat.

Määrääväksi kuormitusyhdistelyksi muodostui kuormitustapaus 3, jossa kattilan käyttöönoton testikuorma oli suurin.

3.4.2 Käyttörajatilan kuormien yhdistely

Käyttörajatilassa tarkistettiin kannatinpalkkien taipumia, jolloin kuormitusyhdistelyissä käytettiin ominaisyhdistelmää (kaava 8) (4, s. 36).

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,1} * Q_{k,i} \quad \text{KAAVA 8}$$

$G_{k,j}$ pysyvänkuorman ominaisarvo

$Q_{k,1}$ määräävän muuttuvan kuorman 1 ominaisarvo

$Q_{k,i}$ muun samanaikaisen muuttuvan kuorman ominaisarvo

$\psi_{0,1}$ muuttuvan kuorman yhdistelykerroin

”+” kuormien samanaikainen huomioiminen.

Käyttörajatilan kuormitusyhdistelyiksi luotiin seuraavanlaiset kuormitustapaukset.

1. $1,0 * DL$
2. $1,0 * DL + 1,0 * OL$
3. $1,0 * DL + 1,0 * FL$
4. $1,0 * DL + 1,0 * AL$.

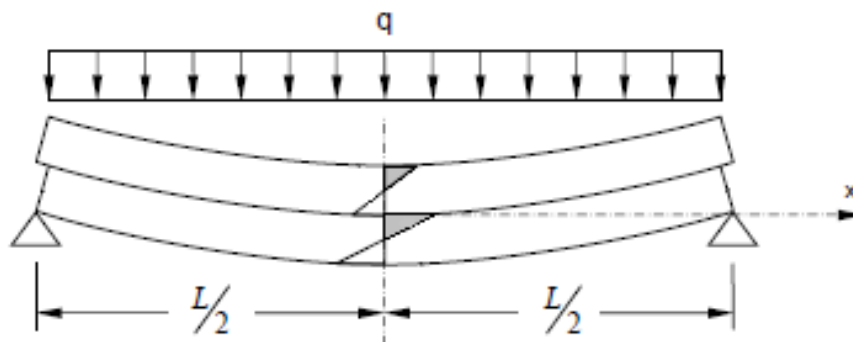
Määrääväksi kuormitustapaukseksi muodostui kuormitustapaus 3, jossa kattilan käyttöönoton testikuorma oli suurin.

4 YHDISTETTY PALKKI

Yhdistetty palkki on useammasta osasta koostettu kannatinpalkki, jossa erilliset osat toimivat ainakin osittain yhtenä kappaleena. Palkin yhteistoiminta saadaan aikaan liittämällä erilliset osat yhteen esimerkiksi ruuviliitoksilla tai hitsaamalla. (9, s. 110.)

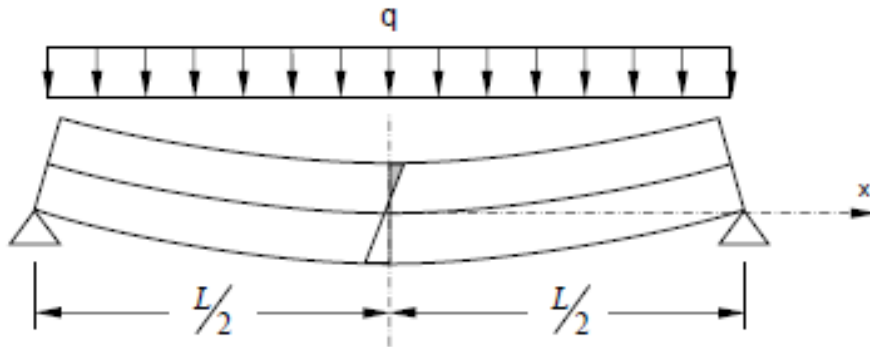
4.1 Yhdistetyn palkin taivutus, yleinen tarkastelu

Tarkastellaan yleisesti kahta tasapaksuista (h) ja levyistä (b) palkkia, joita kuormittaa tasainen kuorma q . Jos palkkeja ei ole liitetty yhteen ja niiden välinen kitka on jätetty huomioimatta, palkki käyttäytyy kuvan 7 mukaisesti. Palkkien kosketuspinnat liukuvat toistensa suhteen ja molemmat palkit saavat samat siirtymät, jännitykset ja venymät. Tässä tilanteessa yhdistetyn palkin kantokyky kaksinkertaistuu ja ne toimivat kuin kaksi erillistä palkkia sillä oletuksella, että palkit ovat ominaisuuksiltaan samanlaiset. (9, s. 110.)



KUVA 7. Yhdistetyn palkin liukumät (10, s. 16)

Jos molemmat kuvan 7 palkit on liitetty toisiinsa esimerkiksi ruuviliitoksilla, ei palkkien kosketuspinnoinnissa tapahdu liukumia. Tällöin palkit toimivat monoliittisen kannattimen kuvan 8 tavoin. Kun Bernouli'n otaksuma ja Hooken laki oletetaan toteutuvan, palkin kantokyky reunajännityksen arvoilla mitattuna nelinkertaistuu ja taivutusjäykkyys kahdeksankertaistuu. (9, s. 110.)

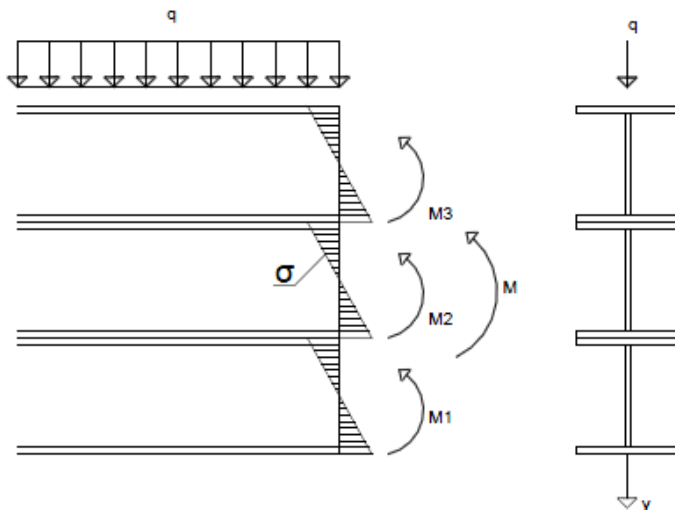


KUVA 8. Yhteistoiminnan palkki, jossa osien välille ei synny liukumia (10, s. 17)

4.1.1 Erikseen toimivat palkit

Oletetaan, että palkki koostuu kolmesta osasta. Kuvan 9 mukaisen kannatinpalkin voidaan olettaa toimivan seuraavasti:

- Kannattimen osat voivat liukua toistensa suhteen x -akselin suunnassa.
- Osat pysyvät kiinni toisissaan y -akselin suunnassa. (9, s. 110.)



KUVA 9. Erikseen toimivat palkit (9, s. 111)

Jos osat pysyvät kiinni toisissaan, palkkien väliin ei synny rakoja, joten niiden taipumat ovat samansuuruiset. Tällöin taivutusmomentista M aiheutuva jänni-

tysresultantti jakaantuu palkin kaikille osille niiden taivutusjäykkyyksien suhteessa. Kunkin osan momentista aiheutuva jännitystila voidaan nyt määrittää erikseen. Palkin osien yhteensopivuusehto on kuvan 9 tapauksessa kaavan 9 mukaisesti. (9, s. 111.)

$$\frac{M_1}{EI_1} = \frac{M_2}{EI_2} = \dots = \frac{M_n}{EI_n} \quad \text{KAAVA 9}$$

Koska kannatinpalkin poikkileikkauksen taivutusmomentin tulee koostua kaikkien palkkien osien momenteista, saadaan tasapainoehdoksi kaavan 10 mukaisesti. (9, s. 111.)

$$M = M_1 + M_2 + \dots + M_n \quad \text{KAAVA 10}$$

Kaavan 9 ja 10 yhtälöistä voidaan tällöin ratkaista yksittäisten palkkien momentit kaavan 11 mukaisesti (9, s. 111)

$$M_i = \frac{EI_i}{\sum_{i=1}^n EI_i} M, \quad i = 1, 2, \dots \quad \text{KAAVA 11}$$

4.1.2 Yhdessä toimivat palkit

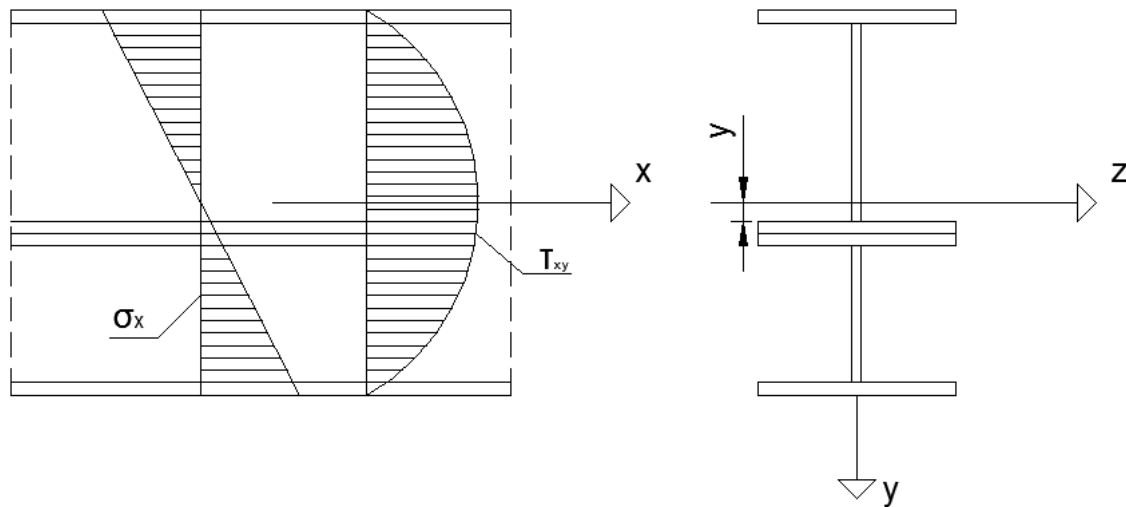
Jotta yhdistetty palkki toimisi monoliittisesti, sen täytyy täyttää seuraavat ehdot:

- *Palkin osat pysyvät taivutuksessa kiinni toisissaan.*
- *Osien välillä ei tapahdu liukumia toistensa suhteen.* (9, s. 111.)

Palkin yhteistoiminta saadaan aikaan liittämällä palkin osat yhteen jatkuvalla liitoksella, esimerkiksi ruuviliitoksilla. Palkin osien väliset liitokset täytyy mitoittaa siten, että palkki voidaan osoittaa toimivan yhdistettynä kappaleena. Jos ruuveja on liian harvassa, voi palkkien välille syntyä liukumia tai ruuviliitokset voivat ylittää sallitut kuormat, jolloin liitos ei ole toimiva. Ruuveja tulee olla sijoitettuna palkin osien välisen leikkausvoimapinnan mukaisesti niin paljon, että ruuvien leikkauskestävyys ei ylitä missään kohdassa palkkia. (9, s. 112.)

Yhdistettyä palkkia mitoittaessa täytyy tietää palkin osien väliset voimat ja voiman suuruus palkin koko pituudella. Jos palkki on homogeeninen eli yhtenäis-

nen, sen poikkileikkauksessa normaali- ja leikkausjännitykset ovat kuvan 10 mukaiset. (9, s. 112.)



KUVA 10. Yhdistetyn palkin normaali- ja leikkausjännitykset (9, s. 112)

Jos osien välille tehty liitos kestää yhtenäisen kannatinpalkin leikkausjännitykset, myös normaalijännitykset jakautuvat lineaarisesti. Tällöin voidaan todeta, että kannatinpalkin osat toimivat täysin yhdessä. Kannatinpalkin osien välillä vaikuttaa koko palkin leikkausvoiman (Q_y) ja osin rajapinnan sijainnin (S_z) perusteella laskettavissa oleva leikkausjännitys (T_{xy}), joka lasketaan kaavan 12 mukaan (9, s. 112.)

$$\tau_{xy} = \frac{Q_y * S_z}{I_y * b} \quad \text{KAAVA 12}$$

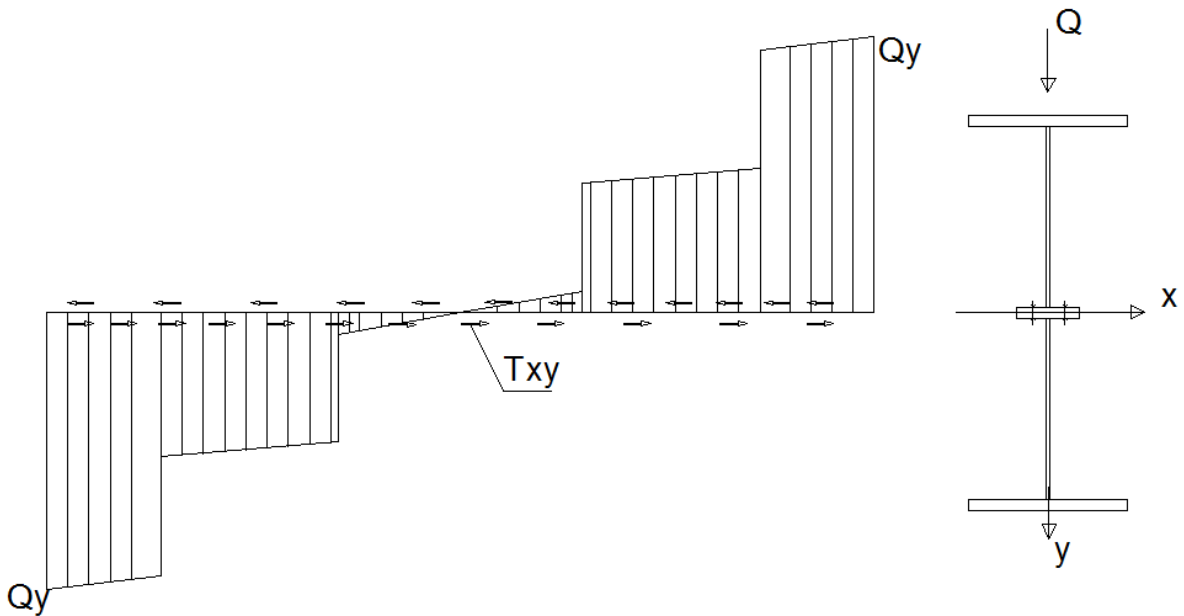
$Q_y = V_{ED}$ palkissa vaikuttava suurin leikkausvoima (rasituspinnasta) (kN)

S_z Liitoksen rajapintaan laskettu poikkileikkauksen osan staattinen momentti koko palkin z-akselin suhteen (mm^3). Laskuesimerkit liitteissä 2 ja 3

I_y Koko poikkileikkauksen neliömomentti, jossa ei ole huomioitu väli-
laippoja (mm^4). Laskuesimerkit liitteissä 2 ja 3

$b = t_w$ Poikkileikkauksen uuman paksuus (mm).

Palkin suurin leikkausjännitys (T_{xy}) ei saa ylittää osien rajapinnan leikkauslujuutta (kuva 11) (9, s.112).



KUVA 11. Palkissa vaikuttava leikkausjännitys (9, s,112)

Rajapinta voi olla palkin uuma tai rajapinnassa oleva muu leikkausvoimaa välittävä liitos (esimerkiksi ruuviliitos). Jos osien rajapinnassa on ruuviliitos, on ruuviliitoksen leikkauskestävyyden oltava palkin joka kohdassa vähintään yhtä suuri kuin leikkausjännityksestä (T_{xy}) laskettu leikkausvoima, kaavan 13 mukaisesti. (9, s. 112.)

$$f_{vd} \geq \tau_{xy,max}$$

KAAVA 13

F_{vd} Leikkauslujuuden mitoitusarvo (N/mm^2). Laskuesimerkki liitteissä 2 ja 3.

4.2 Profiilin mittojen valinnat

Suunnittelussa ensimmäiseksi määritettiin profiilien mitat. Profiilin tulee kestää suurimman kuormitustapauksen kuormat murto- ja käyttörajatilassa. Suunniteluperusteina käytettiin Andritzin lähtötietoja kattilapalkistoille. Primääripalkit toteutettiin poikkileikkausluokassa 3, jolloin koko poikkileikkaus saadaan teholliseen käyttöön. Palkin mitoituksessa tulee huomioida kiepahdus sekä tarkistaa leikkauslommahduskestävyys, jos uuman hoikkuusraja ylittyy. (3, s.155.)

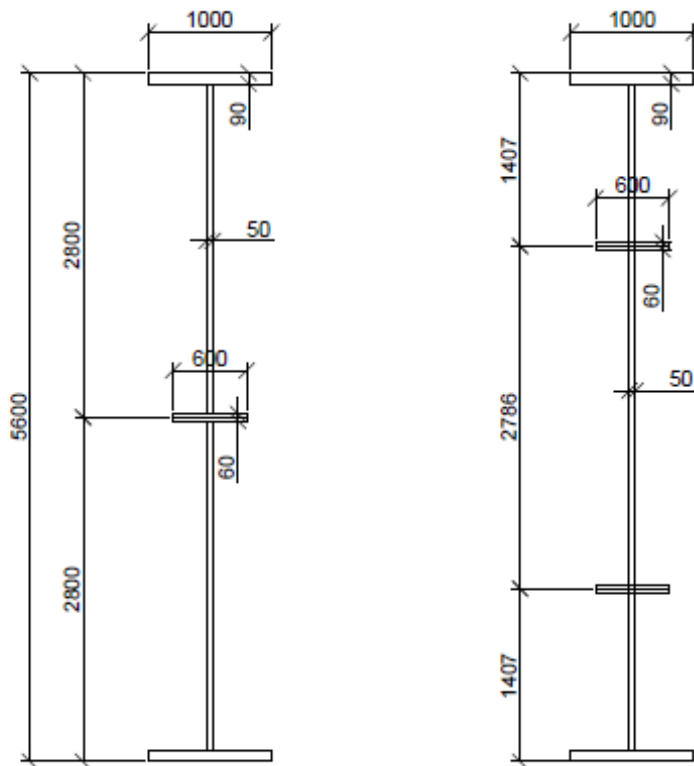
Vaikka primääripalkki jaettiin useampaan osaan asennuskustannuksien vuoksi, profiili mitoitetaan yhtenäisenä palkkina. Pääpalkin uuman alueella olevat osapalkkien laipat ovat paljon pienempiä kuin pääpalkin laipat, kun ne ovat lähempänä palkin neutraaliakselia. Tällöin ne eivät merkittävästi vaikuta yhdistetyn palkin momenttikestävyyteen. Pääpalkin lujuustarkastelu voidaan tehdä huomioiden osapalkkien laippoja uuman alueella. Osapalkkien laipat valitaan niin, että asennustilanteessa palkki ei kiepahda ja laippa kestää yhdistetyssä palkissa osapalkkien välisestä liitoksesta aiheutuvat rasitukset. Lisäksi on huomioitava, että laipaan mahtuu tarvittava määrä ruuveja, joiden määrät saadaan yhdistetyn palkin laskennasta.

Osapalkin laipan minimipaksuus on puolet pääpalkin laipan paksuudesta, että se voi välittää uumassa vaikuttavan leikkausvoiman palkkien väliseen ruuviliitokseen. Sopiva alustava valinta osapalkin laipanpaksuudeksi on noin $0,75 \cdot \text{uuman paksuus}$.

Uuman paksuuden minimiraja tulee osapalkin uuman hoikkuusehdosta. Osapalkin uuman tulisi olla poikkileikkausluokassa 3. Tällöin voidaan käyttää ohuempaa uumaa kuin sellaisessa palkissa, jota ei ole jaettu osiin. Uuman kestävyys koko palkin leikkausvoimalle määrittelee lopullisen uuman paksuuden.

Kattilan kannatinpalkisto on mitoitettu kattilatoimittajan antamien kuormien ja taipumaehtojen mukaan. Palkkien mitoituksessa on huomioitu palkkien kiepahdus ja uuman kestävyys. Palkkien mitat on sovitettu kattilatoimittajan layout-suunnitelmiin niin, että kattilan kannatustangot ja alueella olevat prosessiputket mahtuvat paikalleen.

Kuvassa 12 on esitetty primääripalkin poikkileikkauksen mitat, kun palkki jaettu kahteen sekä kolmeen osaan.



KUVA 12. Primääripalkin poikkileikkauksen mitat

Kolmeen osaan jaetussa profiilissa välilaippojen sijainti on määritetty jokaisen osan pinta-alan mukaan. Poikkileikkauksessa jokainen osa on pinta-alaltaan samansuuruinen, jolloin myös osien massat pysyvät yhtä suurina. Kahteen osaan jaetussa palkissa molemmat osat ovat myös pinta-alaltaan samansuuruiset, jolloin neutraaliakseli sijaitsee palkkien liitoskohdassa.

5 ASENNUSTILANNE

Jaetun palkin profiilin mittojen valinnassa on huomioitava alimman osan taipuma sekä kiepahdus. Kapeat I-profiilit ovat alttiita kiepahdukselle pitkillä jänneväleillä, jossa puristettu laippa menettää stabiiliutensa nurjahtamalla sivusuuntaan. Tällöin sauva kiertyy pituusakselinsa ympäri kuvan 13 mukaisesti. (3, s. 140.)



KUVA 13. I-profiilin kiepahdus, kun puristettua laippaa ei ole tuettu (3, s. 140)

Alinta palkkia kuormittaa ainoastaan palkin omapaino, mutta pitkillä jänneväleillä taipuma saattaa rajoittaa seuraavan osan asennusta. Kun palkki taipuu liikaa, vaikeutuu ruuvien asennus huomattavasti kosketuspintojen välisen raon vuoksi. Alimman palkin taipumaa voidaan hallita esikorotuksella, jossa profiilin uumaan muokataan kaarevaksi. (3, s. 10.)

Palkin taipuma käyttörajatilassa voidaan laskea kaavan 14 mukaan.

$$f = \frac{5}{384} q l^4 / E I_y \quad \text{KAAVA 14}$$

q Palkin omapainon aiheuttama kuorma (N/mm)

l Palkin pituus (mm)

Kiepahdustarkastelu tehdään standardin SFS EN 1993-1-1 mukaisesti. Taivutetun sauvan mitoitusehto kiepahdukselle on kaavan 15 mukaisesti. (3, s. 141.)

$$M_{ed} \leq M_{b,Rd} \quad \text{KAAVA 15}$$

Kiepahduskestävyyttä ei tarvitse määrittää (kiepahdus ei alenna palkin taivutuskestävyyttä), jos sauvan muunnettu hoikkuus kiepahdukselle on $\lambda_{LT} \leq 0,2$ tai jos ehto $M_{Ed} / M_{cr} \leq 0,04$ toteutuu. Kiepahduskestävyyden mitoitusarvo lasketaan vahvemman akselin suhteen taivutetulle sauvalle kaavan 16 mukaan. (3, s. 141.)

$$M_{b,Rd} = W_y \frac{\chi_{LT} * f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{KAAVA 16}$$

$$W_y = W_{pl,y} \quad \text{Poikkileikkausluokka 1 ja 2 (mm}^3\text{)}$$

$$W_y = W_{el,y} \quad \text{Poikkileikkausluokka 3 (mm}^3\text{)}$$

$$\gamma_{M0} \quad \text{Kestävyyden osavarmuusluku (1,0)}$$

Kiepahduskestävyyden pienennystekijä χ_{LT} lasketaan kaavojen 17, 18 ja 19 mukaan (3, s. 142).

$$\chi_{LT} = 1,0 \quad \text{kun } \lambda_{LT} \leq 0,2 \quad \text{KAAVA 17}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} \leq 1,0 \quad \text{kun } \lambda_{LT} > 0,2 \quad \text{KAAVA 18}$$

$$\phi_{LT} = 0,5[1 + \alpha_{LT}(\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2] \quad \text{KAAVA 19}$$

Kaavoissa 18 ja 19 tarvittava sauvan muunnettu hoikkuus lasketaan kaavan 20 mukaan (3, s. 142).

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_y * f_y}{M_{cr}}} \quad \text{KAAVA 20}$$

Kaavan 20 kriittinen kiepahdusmomentti lasketaan kaavan 21 mukaan (3, s. 143).

KAAVA 21

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(kL)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega} \right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(kL)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 Z_g - C_3 Z_j)^2} - (C_2 Z_g - C_3 Z_j) \right]$$

C_1, C_2 ja C_3 palkin tuentaehdoista riippuvia vakioita

k ja $k\omega$	teholliseen pituuteen liittyviä tekijöitä
L	puristetun laipan tuentaväli
z_a	kuorman vaikutuspisteen koordinaatti
z_s	vääntökeskiön (leikkauskeskiön) koordinaatti

$$z_g = z_a - z_s$$

$$z_j = z_s - \frac{0,5 \int (y^2 + z^2) z dA}{I_y}$$

5.1 Osista kootun palkin tarkastelu

Primääriosapalkkien väliset liitokset toteutetaan ruuviliitoksena. Ruuviliitokset mahdollistavat nopean asennuksen verrattuna esimerkiksi hitsausliitoksiin. Hitsiliitoksien haittapuolina voidaan pitää seuraavia seikkoja:

- aikaa vieviä
- kalliita verrattuna ruuviliitoksiin
- tarvitsevat 100% NDT testin
- tarvitsevat paikkamaalauksen korroosion vuoksi.

Ruuvien lujuusluokkana käytetään 8.8-ruuveja. Lujemmat 10.9-ruuvit ovat harvinaisempia, ja niiden saatavuus voi olla rajallinen. Liitokset voidaan toteuttaa kokoluokan M24- tai M30-ruuveilla. Liitteissä 2 ja 3 on esitetty esimerkkilaskelmat liitoksille. Liitteessä 2 on esitetty primääripalkki kahdessa osassa, ja liitteessä 3 primääripalkki on jaettu kolmeen osaan. Käytettäessä kokoluokan M24-ruuveja niiden määrä kasvaa verrattuna suurempiin M30-ruuveihin. Toisaalta M24-ruuvi on yleisemmin käytössä oleva ruuvi, joten sen käyttämistä voidaan pitää kannattavampana.

Palkkien osien poikkileikkauksien pysyessä vakioina niiden tulee ottaa kaikki liitospintoihin tulevat leikkausvoimat. Leikkausvoima osapalkkien välisessä lii-

toksessa voidaan laskea kaavan 22 yhtälöllä. (9, s. 112.) Laskuesimerkit on esitetty liitteissä 2 ja 3.

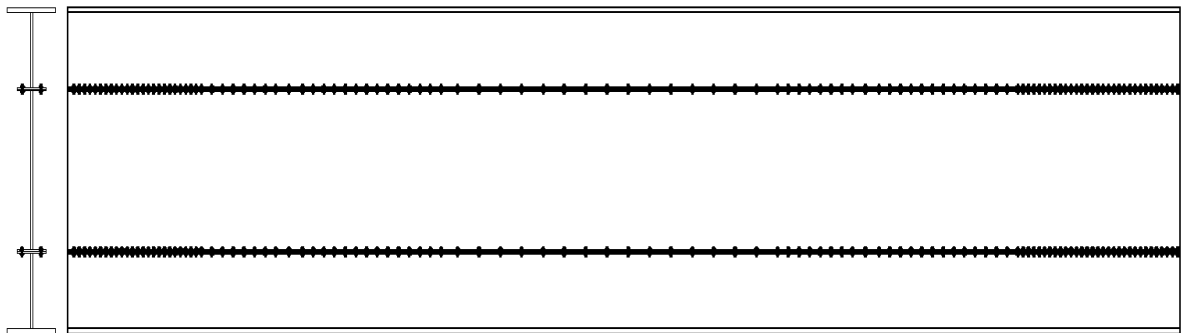
$$F_v, E_d = \frac{S_z}{I_y} \int_{x_1}^{x_2} Q_y dx = \frac{S_z * A_Q}{I_y} \quad \text{KAAVA 22}$$

Jos yhden ruuvin ottama leikkausvoima on $F_{v,Rd}$, niin ruuveja tarvitaan yhteensä kaavan 23 mukaisesti (9, s. 113).

$$n = \frac{T}{T_0} = \frac{S_z * A_Q}{F_{v,Rd} * I_y} \quad \text{KAAVA 23}$$

Palkkia voidaan liitoksien mitoituksen jälkeen käsitellä homogeenisenä palkkina. Palkissa mahdollisesti esiintyvä normaalivoima ei aiheuta leikkausjännityksiä eikä näin ollen vaikuta liitosvoimiin. (9, s. 113.)

Ruuvien määrät ovat suurimmillaan palkin reunakentillä, jossa vaikuttava leikkausvoima on suurin. Vastaavasti vähiten ruuveja tulee palkin keskikenttään, jossa leikkausvoima on pienimmillään. Ruuvien sijoittelussa noudatetaan SFS EN 1993-1-8 -standardin taulukkoa 3.3. Ruuvit sijoitellaan yhteen riviin molemmin puolin uumaa. Keskikentässä ruuvimäärän ollessa pieni käytetään poikkeuksellisesti ruuvietäisyytenä p_1 -arvoa 400 mm, koska voidaan olettaa, että liitos kestää sille kohdistuvat rasitukset suuremmallakin keskiöväliillä. (11, s. 24.) Kuvassa 14 on esitetty kolmeen osaan jaetun primääripalkin ruuvien sijoittelu.



KUVA 14. Ruuvien sijoittelu jaettuun primääripalkkiin

5.1.1 Hitsit

Välilaippojen ja uuman välisten hitsien tulee kestää ruuvien leikkauskestävyyden mukaisesti. Koska ruuvimäärät vaihtelevat reuna- ja keskikentän välillä oleellisesti, ei ole taloudellista hitsata uuman ja välilaippojen liitoskohtaa koko pituudelta samalla hitsin a-mitalla. Reunakenttiin tarvitaan suuri a-mitta, jossa leikkausvoima on suurimmillaan. Suurten hitsien hitsaus on työlästä ja aikaa vievää. Hitsityön määrä vaikuttaa myös oleellisesti konepajakustannuksiin. Hitsien kestävyys voidaan laskea yksinkertaistetulla menetelmällä, jossa hitsiin kohdistuvien voimien resultantin oletetaan aiheuttavan hitsin laskentapoikkipintaan aina pelkkää leikkausta riippumatta voimaresultantin ja hitsin todellisesta suunnasta. (3, s. 353.)

Hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvo voidaan laskea kaavan 24 mukaisesti (3, s. 353).

$$f_{vw,d} = \frac{f_u/\sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad \text{KAAVA 24}$$

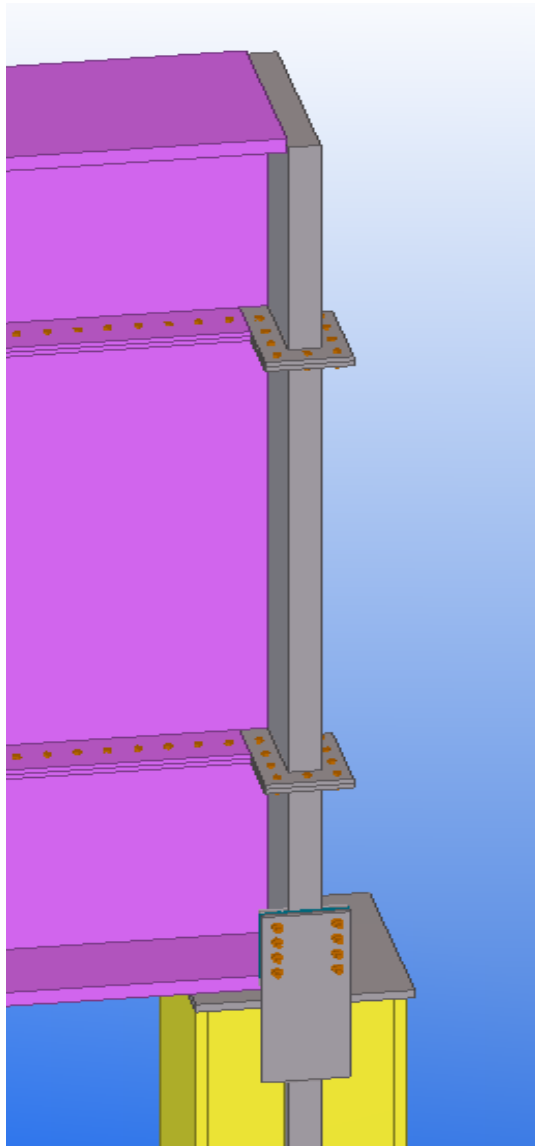
Hitsin kestävyden mitoitusarvo pituusyksikköä kohti lasketaan kaavan 25 mukaisesti (3, s. 353).

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a \quad \text{KAAVA 25}$$

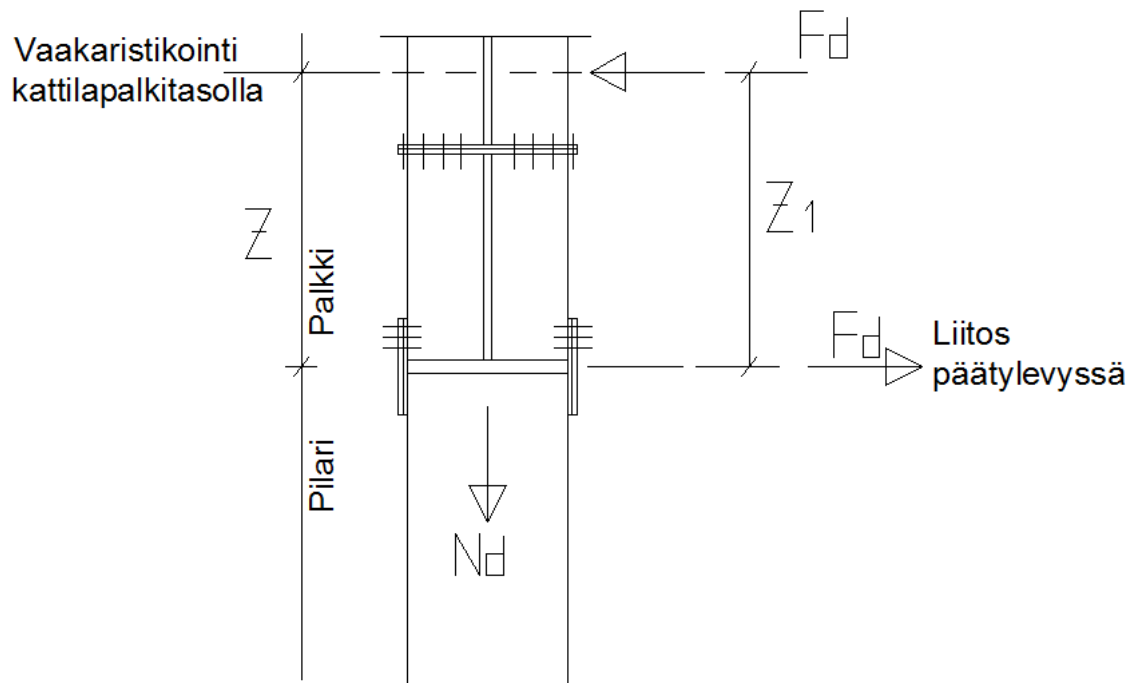
5.1.2 Päätyjäykiste

Kolmeen osaan jaetun palkin päätyjäykiste toteutetaan kolmessa osassa, jotka liitetään toisiinsa ruuviliitoksin (kuva 15). Päätyjäykisteessä on suuri puristusjännitys ja teoreettinen taivutusmomentin arvo, joka lasketaan pilarin nurjahdustuennasta määritetystä vaakavoimasta. Kun kattilapalkkien tasossa oleva vaakaristikointi muodostaa pilarin yläpäässä vaakatuennan, täytyy pilarin tukemisesta aiheutuva voima siirtää vaakaristikoinnin tasoon. Vaakavoiman laskentavertaisena voidaan pitää 2 % pilarissa vaikuttavasta pystykuormasta. Päätylevyn liitos primääripalkin osien välillä voidaan mitoittaa näille teoreettisille arvoille, vaikka todellisessa rakenteessa ei puristusvoimasta johtuen laskennallinen

momentti aiheuta vetovoimaa liitoksen ruuveihin. Kuvassa 16 on esitetty päätyjäykisteen liitoksessa esiintyvät teoreettiset kuormat.



KUVA 15. Primääripalkin päätyjäykiste



KUVA 16. Päätyjäykisteen liitosten väliset teoreettiset kuormat

N_d = Pilarin pystykuorma

$F_d = 0,02 \cdot N_d$

$M_d = F_d \cdot Z_1$

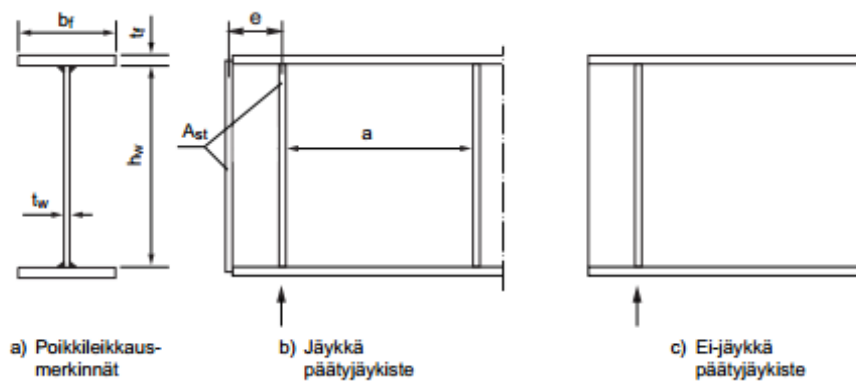
Päätylevyn ruuviliitoksen kautta johdetaan primääripalkin tukireaktion aiheuttamat kuormat pilariin. Jotta päätyjäykiste toimii, sen liitoskohtiin ei saa jäädä rakoja, jotka estävät kuormien siirtymisen. Valmistuksessa on vaadittava tiivis sovitukset päätylevyn osien välille liitospinnassa. Tukipinnat, jotka suunnitellaan täydelle kosketuspaineelle, on noudatettava standardia SFS-EN 1090-2 kohdan 11.2.3.5 ja taulukon D.1.13 mukaisesti. (12, s. 78, 121.)

Päätylevyn mitoituksessa jäykiste ei saa menettää stabiiliuttaan vääntönurjautamalla. Lattateräsjäykisteen poikkileikkaukselta vaadittavat mittasuhteet jäykisteen vääntönurjautamisen estämiseksi lasketaan kaavan 26 mukaan. (3, s. 243, 244.)

$$\frac{I_t}{I_p} \geq \frac{5,3f_y}{E}$$

KAAVA 26

Päätyjäykisteet jaotellaan jäykkiin ja ei-jäykkiin päätyjäykisteisiin. Kuvassa 17 on esitetty palkin päätyjäykisteet. (3, s. 249.)



KUVA 17. Päätyjäykisteitä (3, s. 249)

Tässä tapauksessa ei-jäykän päätyjäykisteen kestävyys mitoitetaan kuten poikkittaiset välilyykisteet aksiaalivoimille, jotka aiheutuvat palkin tukireaktiosta (3, s. 249).

Päätyjäykisteen nurjahduskestävyyden tarkastelu ja mitoitus tehdään SFS EN 1993-1-1 -standardin mukaan. Nurjahduksen mitoitusehto puristetulle sauvalle on kaavan 27 mukaan. (13, s. 61.)

$$N_{Ed} \leq N_{st,b,Rd} \quad \text{KAAVA 27}$$

Kimmoiteorian mukainen kriittinen nurjahduskuorma lasketaan kaavan 28 mukaisesti (3, s. 111).

$$N_{cr,st} = \frac{\pi^2 EI_{st}}{L_{cr,st}^2} \quad \text{KAAVA 28}$$

E Kimmokerroin

I_{st} Brutto poikkileikkauksen neliömomentti

$L_{cr,st}$ Nurjahduspituus taivutusnurjahduksessa tarkasteltavaan suuntaan

Nurjahduskestävyyttä ei tarvitse määrittää, jos sauvan muunnettu hoikkuus toteuttaa ehdon $\lambda_{st} \leq 0,2$.

$$\lambda_{st} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}}, \text{ poikkileikkausluokissa 1, 2 ja 3} \quad \text{KAAVA 29}$$

Jäykisteen nurjahduskestävyyden mitoitusarvo $N_{st,b,Rd}$ lasketaan kaavan 30 mukaan poikkileikkausluokka kolmen sauvalle (12, s. 61).

$$N_{st,b,Rd} = \frac{\chi Af_y}{\lambda_{M0}} \quad \text{KAAVA 30}$$

A = bruttopoikkileikkauksen pinta-ala

χ = nurjahduskestävyyden pienennystekijä

Nurjahduskestävyyden pienennystekijä määritellään kaavojen 31, 32, 33 ja 34 mukaisesti (3, s.110).

$$\chi = 1,0 \quad \text{kun } \lambda \leq 0,2 \quad \text{KAAVA 31}$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} \leq 1,0 \quad \text{kun } \lambda > 0,2 \quad \text{KAAVA 32}$$

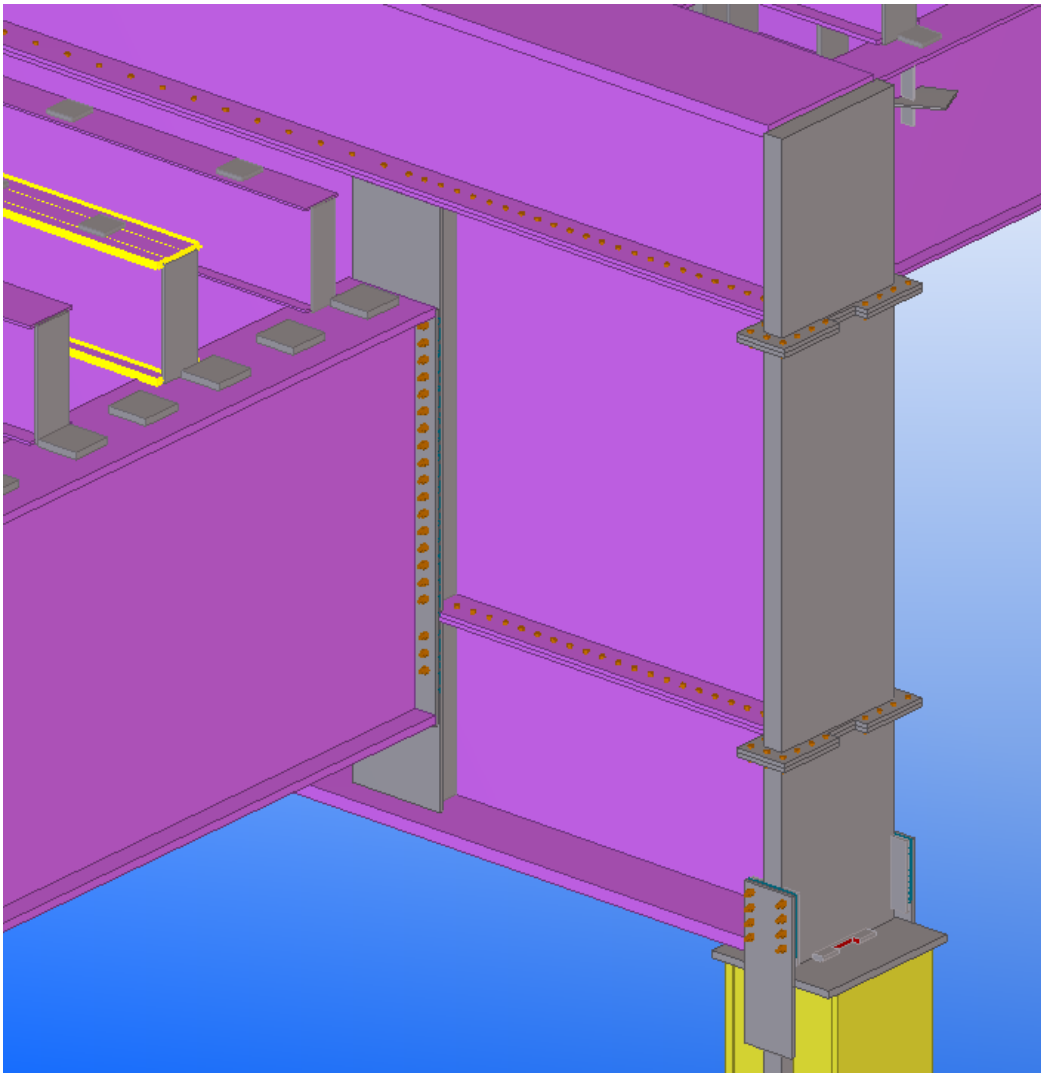
$$\Phi = 0,5 [1 + \alpha(\lambda - 0,2)\lambda^2] \quad \text{KAAVA 33}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} \quad \text{poikkileikkausluokassa 1, 2 ja 3} \quad \text{KAAVA 34}$$

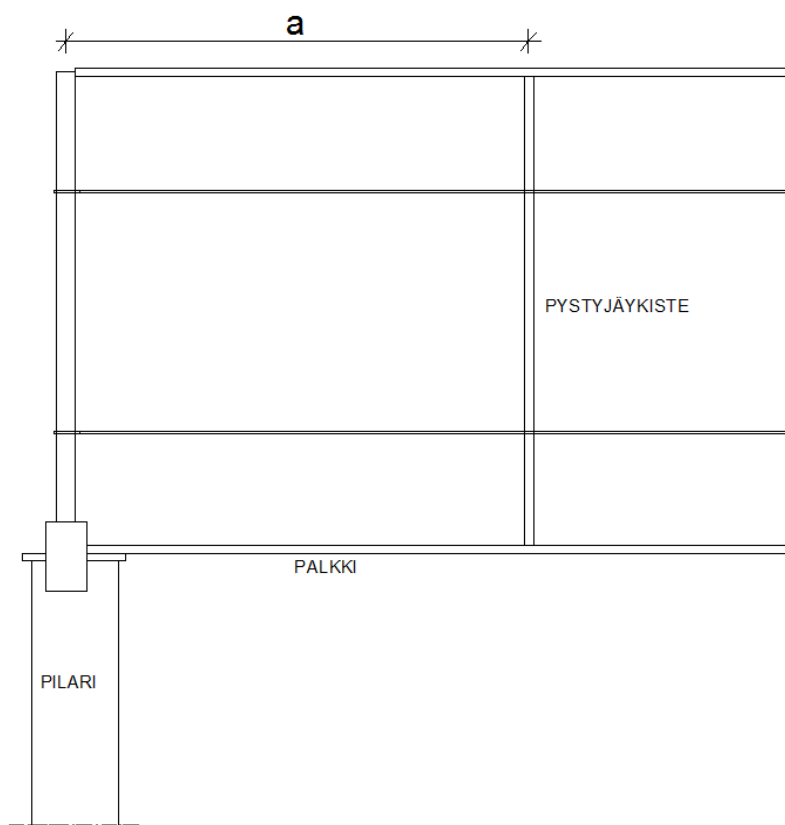
α = nurjahduskäyrän mukainen epätarkkuustekijä. (3, s.112.)

5.1.3 Liitokset

Primääripalkin ollessa poikkileikkausluokassa 3 uumaa ei tarvitse jäykistää erillisillä pitkittäis- ja poikittaisjäykisteillä leikkauslommahduksen vuoksi. Primääri- ja sekundääripalkkien välisiä liitoksia ei voida toteuttaa uumaan, joten liitokset on tehtävä välilaippojen tasalle kuvan 18 mukaisesti. Tällöin pääpalkkien liitoskohtiin muodostuu pystyjäykiste, ja pääpalkin mitoituksen yhteydessä voitaisiin ottaa huomioon pystyjäykistyksin välimatka a (kuva 19).

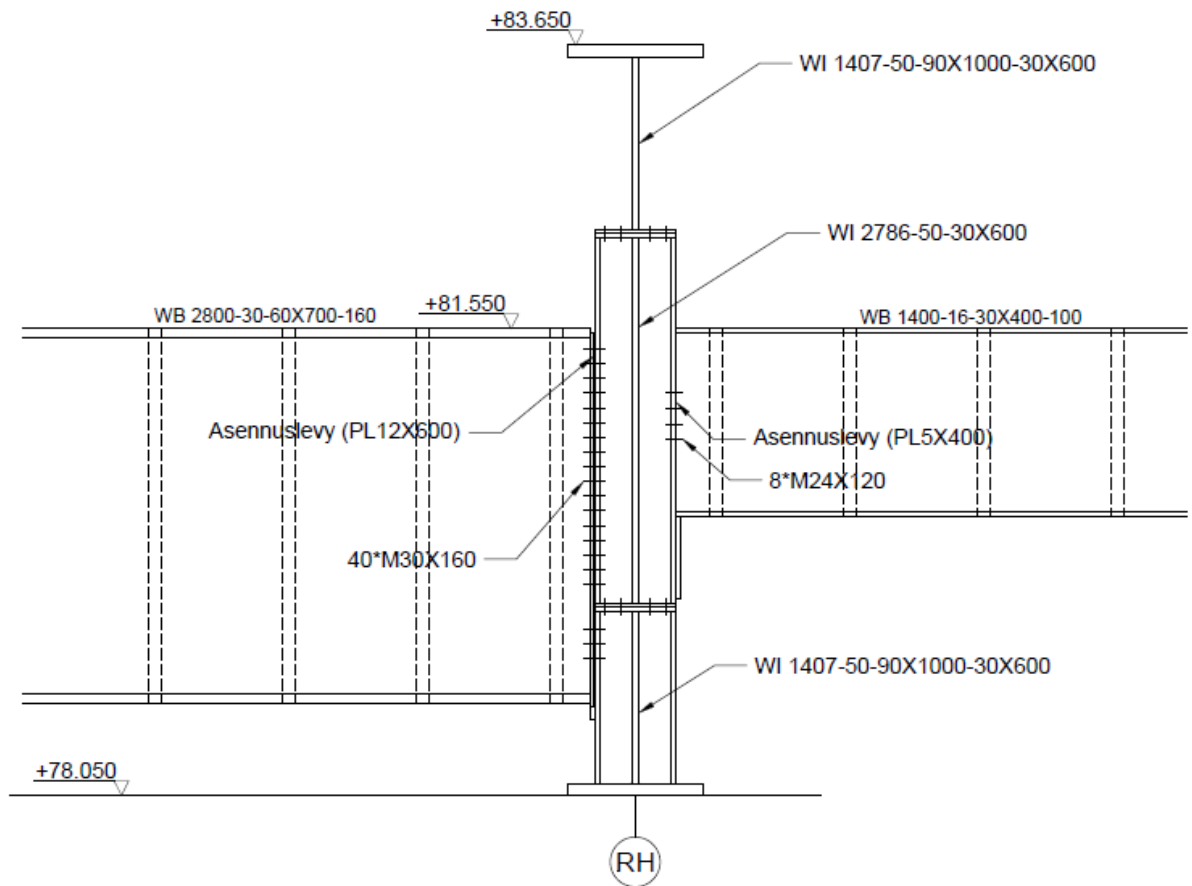


KUVA 18. Primääri- ja sekundääripalkin välinen ruuviliitos

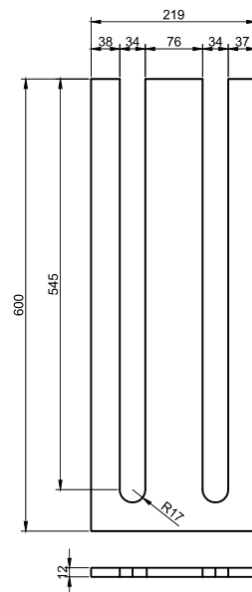


KUVA 19. Pääpalkin pystyjäykiste

Sekundääripalkkien asennuksessa käytetään irtonaisia asennuslevyjä, jotta sekundääripalkki voidaan kääntää asennusvaiheessa primääripalkkien väliin. Ilman irtonaisia asennuslevyjä sekundääripalkin asennus on mahdotonta. Kuvassa 20 on esitetty asennuskuva primääri- ja sekundääripalkin välisestä liitoksestä, sekä kuvassa 21 on esitetty konepajakuva PL12X600 asennuslevystä.



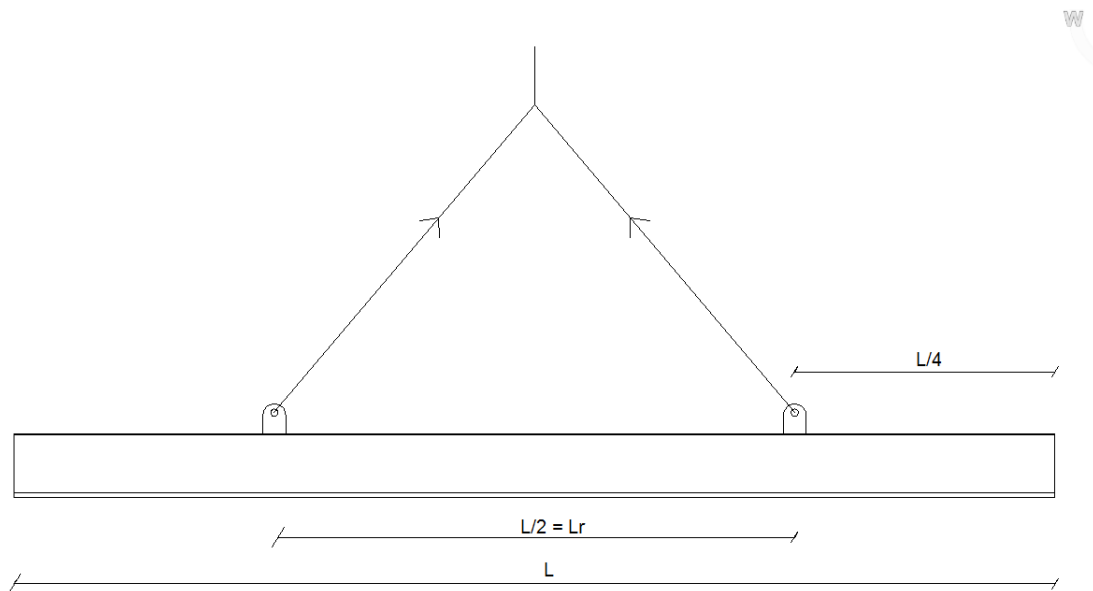
KUVA 20. Sekundääripalkin asennus detalji



KUVA 21. Asennuslevy (PL12X600)

5.1.4 Osapalkin kiepahdus nostotilanteessa

Osapalkkeja nostaessa täytyy huomioida palkkien mahdollinen kiepahtaminen. Nostotilanteeksi voidaan olettaa palkin nosto sen neljännespisteistä. Osapalkki-en kiepahdus (alin osapalkki) tarkastetaan laskemalla standardin SFS EN 1993-1-1 kohdan 6.3.2.2 mukaisesti. Kuvassa 22 on esitetty osapalkin nostotilanne.



KUVA 22. Osapalkin nostotilanne

L_r = Ylälaipan tuentaväli kiepahduksessa.

Osapalkin kiepahdus voidaan laskea yksinkertaistetulla menetelmällä, jossa palkkia tarkastellaan yksiaukkoisena palkkina. Laskennassa palkin epäsymmetrinen muoto voidaan poikkeuksellisesti korvata symmetrisenä i-profiilina, mutta laskennassa tulee huomioida todellisen palkin omapaino.

Symmetrinen palkki ei kiepahda, jos sen ylälaippa toteuttaa ehdon (kaava 35) (14, s.31).

$$\frac{L_r}{i} < 0,4 * \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 33,5$$

KAAVA 35

L_r = Ylälaipan tuentaväli kiepahduksessa

i = Puristetun laipan jäyhyyssäde.

E= Kimmokerroin

f_y = Materiaalin nimellinen myötölujuus.

Puristetun laipan jäyhyysäde sivusuuntaan lasketaan kaavan 36 mukaisesti.

$$\sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{t_f * b_f^3}{12 * t_f * b_f}} = \sqrt{\frac{b_f^2}{12}} = \frac{b_f}{\sqrt{12}} \quad \text{KAAVA 36}$$

t_f = Palkin laipan ylälaipan paksuus

b_f = Palkin laipan leveys.

Kun osapalkin asennustilanteessa kuormituksena on vain palkin omapaino ja uuman leveys 50 mm, voidaan osapalkin ylälaipan leveyden valinnassa soveltaa ehtoa:

$$\frac{L_r}{i} < 50 \quad \text{KAAVA 37}$$

Tällöin palkki voi kiepahtaa, mutta sillä on vielä riittävä kiepahduskestävyys. Kiepahduskestävyyksiä voi laskea eri levyisille ylälaipoille annettavan palkin kokoluokassa. Tästä voidaan tehdä perusteltu yleistys palkin laipan leveyden valintaan.

$$\rightarrow \frac{L_r}{2i} < 50 \rightarrow \frac{L_r \sqrt{12}}{2b_f} < 50 \rightarrow b_f > \frac{L_r \sqrt{12}}{2 * 50} = \frac{L_r \sqrt{12}}{100} \quad \text{KAAVA 38}$$

Jos palkin pituus (L) on 23,4 metriä ja ylälaipan tuentaväli kiepahduksessa (L_r) on 11,7 metriä, saadaan osapalkin ylälaipan leveydeksi:

$$b_f = \frac{11700 \text{ mm} * \sqrt{12}}{100} = 405 \text{ mm} \quad \text{KAAVA 39}$$

On huomioitava, että lopullisessa laipan leveyden valinnassa tulee huomioida välilaippojen ruuvien sijoittelu, jotka asettavat vaatimukset laippojen leveydelle.

5.1.5 Nostotilanne

Primääripalkin asennus toteutetaan useampana nostona. Asennus voidaan toteuttaa käyttämällä erillisiä hitsattavia nostokorvakkeita, joiden käyttö edellyttää lisätyötä asennuspaikalla, sillä nostokorvakkeet tulee polttoleikata, hioa ja paikakamaalta ennen seuraavan osan asennusta. Asennus nostossa voidaan hyödyntää myös välilaipoissa valmiina olevia ruuvien reikiä. Reikiin on mahdollista asentaa käyttötarkoitukseen valmistettu nostoapuosa (kuva 23).

Nostoapuosan ja välilaipan välinen ruuviliitos ja laippojen paikallinen vahvistaminen on suunniteltava nostettavan osan painon perusteella. Nostopisteet ja nostossa käytettävät osat on suunniteltava siten, että varmuus murtoon nähden on vähintään nelinkertainen. Nostokohtaan on mahdollisesti lisättävä paikalliset jäykisteet palkin laipan alle.



KUVA 23. Primääripalkin osien nostoapuosa

6 TULOKSET

Tulosten perusteella on mahdollista toteuttaa primääripalkkien jako pienempiin osiin. Kahdessa osassa toteutetun primääripalkin yksittäisen osan massa on 45 tn ja varustelun (kokoonpano) kanssa noin 55 tn. Kokonaispaino kasvaa välilaippojen tuoman massan verran alkuperäiseen yhtenäiseen primääripalkkiin verrattuna. Kokonaismassa primääripalkille tällöin on noin 110 tn.

Kolmeen osaan jaettu primääripalkki kannattaa toteuttaa siten, että jokaisen palkin massat ovat samat. Tällöin yksittäisen osan massa on 32 tn ja varustelun (kokoonpano) kanssa noin 40 tn. Primääripalkin massaksi saadaan näin ollen noin 115 - 120 tn. Kattilan kannatinpalkkien asennus toteutetaan asentamalla ensin primääripalkkien kaikki erilliset osat, jonka jälkeen voidaan asentaa sekundääripalkit.

Kun palkki jaetaan osiin, voidaan palkin uumaa jonkin verran ohentaa, koska osiin jaetun palkin välilaipat rajoittavat uuman korkeutta. Uuman poikkileikkausluokka on kolme, ja uuman lommahtamista ei tapahdu, vaikka uumalevy on ohuempi.

Suurimman sekundääripalkin (kokoonpano) massa on noin 37 tn. Voidaan siis todeta, että nosturin nostokapasiteettiä voidaan pienentää huomattavasti asennuspaikalla. Nosturin kapasiteetti voi olla pienempi, ja se voi vaikuttaa oleellisesti asennuskustannuksiin. Pienempien profiilien myötä myös isojen palkkien kuljetuskustannukset voivat laskea, kun nostot kuljetuksessa voidaan tehdä pienemmällä nosturilla. Lähtötilanteessa suurten primääripalkkien kuljetus maanteitse asennuskohteeseen oli todella haastavaa suuren massan ja korkeuden vuoksi.

Primääripalkit toteutetaan poikkileikkausluokka 3:n mukaisesti, jolloin leikkauslommahduksesta ei aiheudu ongelmia. Ohutuumaista profiili vaatisi poikittais- ja pitkittäisjäykisteitä, jolloin palkin massa ja valmistuksen työmäärä kasvaisi.

Kolmessa osassa toteutetun primääripalkin alimmaisesta osasta asennuksessa täytyy huomioida palkin mahdollinen taipuma ja kiepahdus. Taipuman kasvaes-

sa seuraavan osan asennus vaikeutuu liitospinnassa olevan raon vuoksi. Taipumaa voidaan kontrolloida esikorottamalla alinta palkkia. Kiepahdusta voidaan kontrolloida alimman osan poikkileikkauksen mittasuhteilla. Alimman palkin ylälaipan leveyden on oltava riittävän suuri.

Primääri- ja sekundääripalkkien liitoksia ei voida toteuttaa primääripalkkien uuman välilaippojen vuoksi. Primääripalkkiin asennetaan jäykistelevyt, joiden yhteyteen liitokset mitoitetaan. Molemminpuoliset jäykisteet ja päätylevyt kasvattavat hieman primääripalkkien massaa, mutta massan kasvu on suhteellisen pieni verrattuna primääripalkin kokonaismassaan. Lisäjäykisteistä voi olla myös hyötyä pääpalkin uuman mitoituksessa, koska jäykisteet pienentävät uumalevykentän mittoja lommahdustarkastelussa.

Primääripalkkien päätyjäykisteet täytyy toteuttaa ruuviliitoksin, jotta primääripalkin tukireaktion voimat saadaan siirrettyä palkista pilariin. Päätyjäykisteiden hitsaus palkin päätyyn ei takaa sille vaadittuja mittatarkkuuksia. Yleisesti voidaan sanoa, että primääripalkin osilla täytyy olla tiukat mittavaatimukset, jotta rajapintojen välillä voimat voivat liikkua.

Voidaan myös olettaa, että konepajalla primääripalkkien osien käsittely helpottuu huomattavasti pienempien profiilien ja massojen ansiosta. Toisaalta välilaippojen myötä hitsauskustannukset kasvavat verrattuna yhtenäiseen primääripalkkiin.

7 LOPPUSANAT

Opinnäytetyössä suunniteltiin soodakattilan kannatinpalkiston primääripalkkien toteutus useammassa osassa. Tavoitteena oli pienentää yksittäisen primääripalkin osan massaa vastaamaan samassa palkistossa olevan suurimman sekundääripalkin massaa. Lähtötilanteessa yksittäisen primääripalkin massa oli 75 - 110 tn. Pienentämällä yksittäisen asennettavan palkin massaa voidaan säästää asennuskustannuksissa huomattavasti.

Yhteenvedona voidaan todeta, että primääripalkit kannattaa toteuttaa useammassa osassa. Tällöin yksittäisen osan massa pienenee mutta vastaavasti kokonaisuudessa kasvaa hieman. Primääripalkin osat liitetään toisiinsa ruuviliitoksien. Ruuvien määrää voidaan kontrolloida ruuvien lujuusluokan, koon ja leikkauskestävyyden mukaan.

Opinnäytetyön laskelmissa käytettiin 600 x 30 mm:n välilaippoja. Välilaippojen koot määräytyvät käytettävän ruuvimäärän mukaan. Jos liitoksissa käytetään pieniä ruuveja, voi olla, että ruuveja täytyy laittaa kahteen riviin, jotta SFS EN 1993-1-8 -standardin ruuvien sijoitteluehdot täyttyvät.

Primääripalkille on syytä asettaa tiukat mittatarkkuusvaatimukset, jotta liitoskohdian väliset voimat siirtyvät palkin kautta pilarille. Primääripalkin osien mittatarkkuusvaatimuksena voidaan pitää $h \pm 2$ mm, ja erityistä mittatarkkuutta vaaditaan päätyjäykisteiden rajapinnoissa, joissa tulee käyttää tarvittaessa koneistettuja pintoja.

Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että asennuskustannukset tulevat laskemaan huomattavasti. Tavoitteissa onnistuttiin hyvin, sillä nyt yksittäinen primääripalkin osa vastaa suurimman sekundääripalkin massaa.

Tulosten perusteella laadittiin Excel-sovellus, jossa voidaan laskea annettujen kuormien ja profiilien poikkileikkausarvojen perusteella

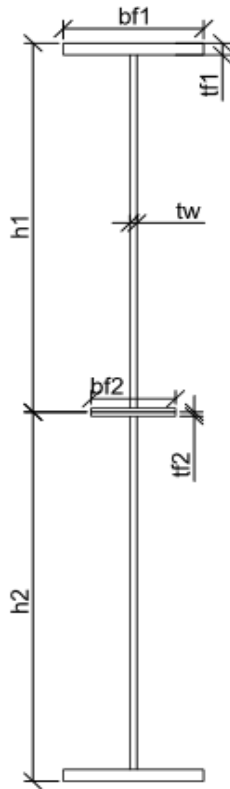
- ruuvimäärät primääripalkin osien välisiin liitoksiin
- hitsit primääripalkkiin
- alapalkin taipuma

- päätyjäykisteelle tulevat kuormat.

LÄHTEET

1. Is-Plan osaksi FMC Groupia. Tiedote. Julkaistu 1.4.2008. Saatavissa: http://www.fmcgroup.fi/news-254-130-is-plan_oy_osaksi_fmc_groupia. Hakupäivä 7.2.2013.
2. Andritz-konsernin tulos vuonna 2009. Julkaistu 5.3.2010. Lehdistötiedote. Saatavissa: <http://www.kauppalehti.fi/5/i/yritykset/lehdisto/hellink/tiedote.jsp?selected=kaikki&oid=20100301/12677754084560&industry=&=>. Hakupäivä 7.2.2013.
3. HITSATUT PROFIIILIT EN 1993- Käsikirja. 2010. Ruukki. Hämeenlinna: Rautaruukki Oyj.
4. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2010. Eurocode 3-oppikirja. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry.
5. Autodesk Robot Structural Analysis Professional. Autodesk tuotteet. Saatavissa: <http://www.autodesk.fi/adsk/servlet/pc/index?siteID=448412&id=1736125>. Hakupäivä 8.2.2013.
6. RIL 201-1-2011. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Eurokoodit EN 1990, EN1991-1-1, EN1991-1-3, EN 1991-1-4. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
7. SFS-EN 1993-1-1 Eurokoodi 3. Ympäristöministeriön asetus Eurocode – standardien soveltamisesta talonrakentamisessa: Teräsrakenteiden suunnittelu osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Kansallinen liite (FI). 2007. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS.
8. SFS-EN 1990 Eurokoodi. Ympäristöministeriön asetus Eurocode – standardien soveltamisesta talonrakentamisessa: Rakenteiden suunnitteluperusteet. Kansallinen liite (FI). 2007. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS.

9. Jumppanen, Pauli 1977. Rakenteiden mekaniikka, lujuusopin perusteet. Otava.
10. Peltomaa, Mikko 2008. Betoni-teräs liittorakenteiden suunnittelu eurokoodin mukaan. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan koulutusohjelma. Diplomityö.
11. SFS-EN 1993-1-8 Eurokoodi 3. Ympäristöministeriön asetus Eurocode – standardien soveltamisesta talonrakentamisessa: Liitosten mitoitus. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS.
12. SFS-EN 1090-2+A1. Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus. Osa 2: Teräsrakenteita koskevat tekniset vaatimukset. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS.
13. SFS-EN 1993-1-1 Eurokoodi 3. Ympäristöministeriön asetus Eurocode – standardien soveltamisesta talonrakentamisessa: Teräsrakenteiden suunnittelu osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS.
14. RIL 90-1974. Teräsrakenteiden suunnitteluohjeet. Standardi SFS 3200. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.



POIKKILEIKKAUKSIEN MITAT

h1	2800	mm
h2	2800	mm
bf1	1000	mm
bf2	600	mm
tf1	90	mm
tf2	30	mm
tw	50	mm
hw	5420	mm
h	5600	mm

L	23400	mm
fy	275	N/mm ²
fu	470	N/mm ²
ly	2,030E+12	mm ⁴
Sx	431800000	mm ³
G alapalk.	1900	Kg/m
G yläpalk.	1900	Kg/m
Palkin massa	88906	kg
E	210000	N/mm ²
G	81000	N/mm ²

KUORMAT

Ved	31200	Kn
Med	181670	kNm

LEIKKAUSKESTÄVYYS

Vpl,Rd	43027,029	kN
Käyttöast.	0,73	

TAIVUTUSKESTÄVYYS

Mc,Rd	199349,8	kNm
Käyttöast.	0,91	

LEIKKAUSJÄNNITYS

τ	132,7	N/mm ²
---	-------	-------------------

LEIKKAUSLUJUUS

fvd	158,77	N/mm ²
-----	--------	-------------------

Ehto $fvd \geq \tau$ **0,84**

RUUVILIITOKSET

Ruuvien leikkauskestävyys F_v, R_d **271,4** kN

Reunakentän ruuvimäärät	N1	78,2	79	
Reunakentän viereinen alue	N2	62,0	62	
Keskikentän ruuvimäärät	N3	1,5	2	==> 36
Ruuvimäärä yhteensä	Yht	318	Ruuvia	

UUMAN JA VÄLILAIKAN VÄLINEN HITSI

Reunakentän hitsit

f _{w,d}	241,2	N/mm ²
F _w	3392,5	N/mm
a	14,06	mm
		15 mm

Reunakentän viereisen alueen hitsit

f _{w,d}	241,2	N/mm ²
F _w	1507,5	N/mm
a	6,25	mm
		7 mm

Keskikentän hitsi

f _{w,d}	241,2	N/mm ²
F _w	651,9	N/mm
a	2,70	mm
		3 mm

PÄÄTYJÄYKISTEELLE TULEVAT KUORMAT

Pilarin ja primääripalkin rajapinnan kuormat

M _d	2034,2	kNm
F _d	624	kN

Primääripalkin välilaidoille tulevat kuormat

M _d	287,0	kNm
F _d	624	kN

ALAPALKIN TAIPUMA

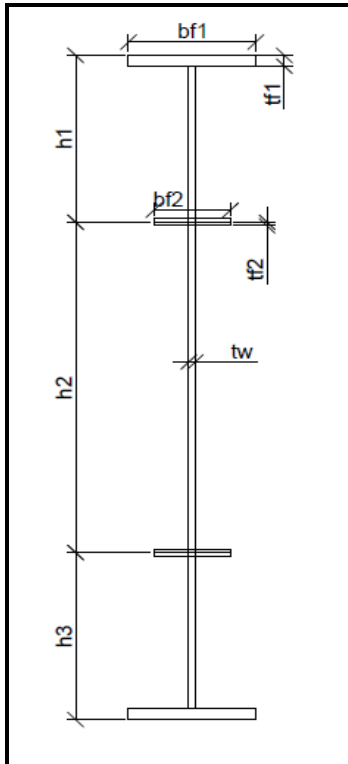
f	1,4	mm
---	------------	----

UUMAN JA YLÄ- JA ALALAIPOJEN VÄLINEN HITSI

a	25	mm
---	-----------	----

Project:
subject:

date
7.12.2014



Poikkileikkauksien mitat

h1	1407 mm	L	23400 mm
h2	2786 mm	fy	295 N/mm ²
h3	1407 mm	fu	470 N/mm ²
bf1	1050 mm	ly	2,237E+12 mm ⁴
bf2	550 mm	Sx1	510256813 mm ³
tf1	95 mm	Sx2	183101773 mm ³
tf2	25 mm	Sx3	183101773 mm ³
tw	55 mm	G alapalk	1446,6 Kg/m
hw	5410 mm	G keskipa	1397,1 Kg/m
h	5600 mm	G yläpalk	1446,6 Kg/m
		Palkin massa	100395,8 kg

Ved	31200 kN
Med	181670 kNm

E	210000 N/mm ²
G	81000 N/mm ²

LEIKKAUSKESTÄVYYS	TAIVUTUSKESTÄVYYS
Vpl,Rd 50678,2 kN	Mc,Rd 235719,8
Käyttöast. 0,62	Käyttöast. 0,77

LEIKKAUSJÄNNITYS	LEIKKAUSLUJUUS
τ 129,4 N/mm ²	fvd 170,32 N/mm ²

Ehto $fvd \geq \tau$ **0,76**

RUUVILIITOKSET

Ruuvien leikkauskestävyys Fv,Rd **271,4** kN

Reunakenttä ylemmät välilaidat	N1	30,10	31	
Reunakenttä alemmat välilaidat	N1	30,10	31	
Reunakentän viereinen alue ylä.laip.	N2	23,84	24	
Reunakentän viereinen alue ala.laip.	N2	23,84	24	
Keskikenttä ylemmät välilaidat	N3	0,57	1	==> 18
Keskikenttä alemmat välilaidat	N3	0,57	1	==> 18
Ruuvimäärä yhteensä				Yht 256

UUMAAN JA VÄLILAIPOJEN VÄLISET HITSIT

Reunakentän hitsit			
f _{w,d}	241,2 N/mm ²		
F _w	2087,7 N/mm		
a	8,7 mm	9	mm
Reunakentän viereisen alueen hitsit			
f _{w,d}	241,2 N/mm ²		
F _w	1107,8 N/mm		
a	4,6 mm	5	mm
Keskikentän hitsit			
f _{w,d}	241,2 N/mm ²		
F _w	678,5 N/mm		
a	2,8 mm	3	mm

PÄÄTYJÄYKISTEELE TULEVAT KUORMAT

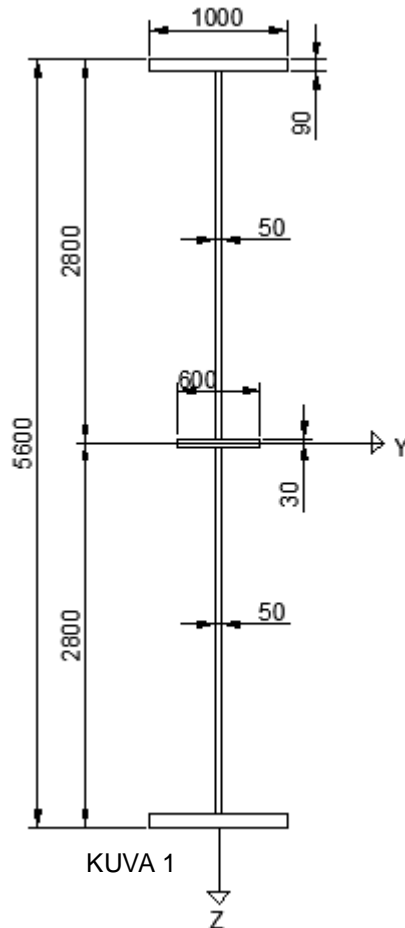
Pilarin ja primääripalkin rajapinnan kuormat	
M _d	2034,2 kNm
F _d	624 kN
Primääripalkin alemman välilaidan kuormat	
M _d	1156,3 kNm
F _d	624 kN
Primääripalkin ylemmän välilaidan kuormat	
M _d	582,192 kNm
F _d	624 kN

ALAPALKIN TAIPUMA
f **6,01** mm

UUMAN JA YLÄ- JA ALALAIPOJEN VÄLINEN HITSIT
a **23** mm

KAHTEEN OSAAN JAETUN PALKIN MITOITUS

Jos primääripalkki kahdessa osassa kuvan 1 mukaisesti



Käytetään seuraavia palkin alkuperäisiä mittoja.

$$h := 5600\text{mm}$$

$$h_w := 5420\text{mm}$$

$$b := 1000\text{mm}$$

$$b_w := 950\text{mm}$$

$$t_f := 90\text{mm}$$

$$t_w := 50\text{mm}$$

Väliäipat 600x30 mm

POIKKILEIKKAUSLUOKKA

Lasketaan poikkileikkausluokat uumalle ja laipalle (laskennassa ei oteta huomioon väliäippoja)

Kun teräs Q345. Standardi: National Standards of the People's Republic of the China GB/T 1591-94

Materiaalin myötölujuus kun $t=50-100$ mm

$$f_y := 275 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\epsilon := \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

Laippa

$$\frac{b - t_w}{2 \cdot t_f} = 5.278 \quad 9 \cdot \varepsilon = 8.320 \quad \text{PLL 1}$$

Uuma

$$\frac{h - 2 \cdot t_f}{t_w} = 108.4 \quad 124 \cdot \varepsilon = 114.628 \quad \text{PLL 3}$$

Poikkileikkaus kuuluu poikkileikkausluokka 3:n

Leikkauskestävyys

Muokauslujittumisen huomioon ottava tekijä

$$\eta := 1.0 \quad (\text{varmalla puolella oleva arvo})$$

Leikkauspinta – ala

$$A_V := \eta \cdot h_w \cdot t_w = 271000.00 \cdot \text{mm}^2$$

Plastisuusteorian mukainen leikkauskestävyys

$$f_y := 275 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \gamma_{M0} := 1.0$$

$$V_{plRd} := \frac{A_V \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 43027.03 \cdot \text{kN}$$

Poikkileikkauksessa vaikuttava suurin leikkausvoima

$$V_{Ed} := 31200 \text{ kN}$$

Kestävyysen ehto

$$\frac{V_{Ed}}{V_{plRd}} = 0.73 \quad \text{OK}$$

Leikkauslujuus

$$f_{vd} := \frac{f_y}{\sqrt{3}} = 158.77 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Taivutuskestävyys

Tarkastelussa ei ole huomioitu palkin stabiiliutta, joka on otettu huomioon varsinaisessa palkin mitoituksessa

Poikkileikkauksen neliömomentti (välilaippoja ei huomiota).

$$I_y := \frac{b \cdot h^3}{12} - \frac{b_w \cdot h_w^3}{12} = 2.03 \times 10^{12} \cdot \text{mm}^4$$

Poikkileikkauksen neutraaliakselin ja puristetun laipan ulomman reunan välinen etäisyys

$$y_c := \frac{h}{2} = 2800.0 \cdot \text{mm}$$

Poikkileikkauksen taivutusvastus

$$W_{el} := \frac{I_y}{y_c} = 7.25 \times 10^8 \cdot \text{mm}^3$$

Poikkileikkauksen taivutuskestävyys, kun palkki kuuluu poikkileikkausluokka 3:n

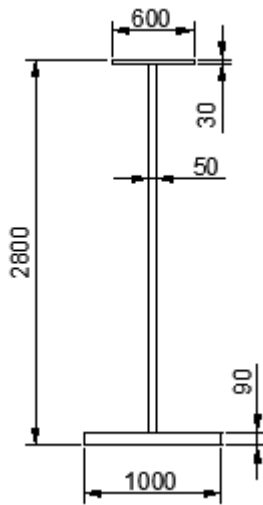
$$M_{c,Rd} := \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 199349.76 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Poikkileikkauksessa vaikuttava suurin taivutusmomentti

$$M_{Ed} := 181670 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Kestävyysen ehto

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = 0.91 \quad \text{OK}$$

Tarkastelu uuman liitoksessa

KUVA 2

Lasketaan staattinen momentti palkin osien väliseen liitoskohdan suhteen ruuvimäärän määrittämiseksi. Kuva 2.

$$S_{Z1} := 30\text{mm} \cdot 600\text{mm} \cdot 15\text{mm} = 2.7 \times 10^5 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{Z2} := 50\text{mm} \cdot 2680\text{mm} \cdot 1370\text{mm} = 1.836 \times 10^8 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{Z3} := 90\text{mm} \cdot 1000\text{mm} \cdot 2755\text{mm} = 2.479 \times 10^8 \cdot \text{mm}^3$$

Staattiseksi momentiksi saadaan

$$S_Z := S_{Z1} + S_{Z2} + S_{Z3} = 4.318 \times 10^8 \cdot \text{mm}^3$$

Leikkausjännitys uumassa (liitoskohdassa)

Poikkileikkauksessa vaikuttava suurin leikkauvoima

$$V_{Ed} := 31200\text{kN}$$

Poikkileikkauksen leveys (uuma)

$$t_w := 50\text{mm}$$

Jäyhyysmomentti y-akselin suhteen

$$I_y = 2.03 \times 10^{12} \cdot \text{mm}^4$$

Leikkausjännityksen arvo suunnittelukuormilla murtorajatilassa (liitoskohta)

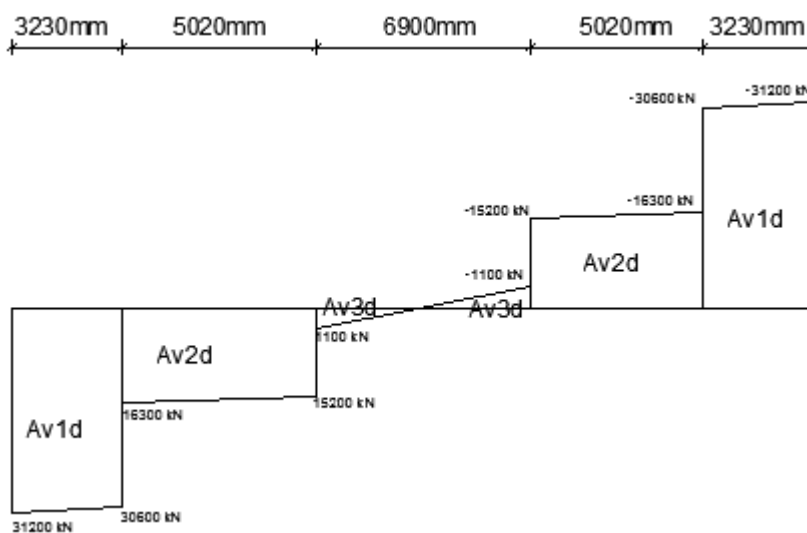
$$\tau_{xyd} := \frac{V_{Ed} \cdot S_z}{I_y \cdot t_w} = 132.75 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Ehto kestävyydelle

$$\frac{\tau_{xyd}}{f_{vd}} = 0.84 \quad \text{OK}$$

PALKIN OSIEN VÄLINEN LIITOS

Liitos toteutetaan ruuviliitoksena. Lasketaan leikkausvoimien pinta-alat leikkausvoima pinnasta. Kuva 3



KUVA 3

Leikkausvoimapinnan alat toiselta puolelta leikkausvoima pintaa

$$A_{V1d} := (3230\text{mm} \cdot 31200\text{kN}) - \left[\frac{(31200\text{kN} - 30600\text{kN}) \cdot 3230\text{mm}}{2} \right] = 9.981 \times 10^7 \cdot \text{kN} \cdot \text{mm}$$

$$A_{V2d} := (5020\text{mm} \cdot 16300\text{kN}) - \left[\frac{(16300\text{kN} - 15200\text{kN}) \cdot 5020\text{mm}}{2} \right] = 7.907 \times 10^7 \cdot \text{kN} \cdot \text{mm}$$

$$A_{V3d} := \frac{(3450\text{mm} \cdot 1100\text{kN})}{2} = 1.897 \times 10^6 \cdot \text{kN} \cdot \text{mm}$$

Käytetään liitoksessa 8.8M30 ruuveja.

Ruuvien leikkauskestävyys leikettä kohden kun kierteet eivät ole leikkautumistasossa

$$F_{V,Rd} := 271.4 \text{ kN} \quad (\text{Hitsatut profiilit EN 1993-käsikirja s.327})$$

Leikkausvoiman kuormittamissa kiinnityksessä ruuvien leikkausvoiman mitoitusarvon on oltava pienempi kuin leikkauskestävyyden ja reunapuristuskestävyyden mitoitusarvo

$$F_{V,Rd} \geq F_{b,Rd}$$

Ruuvimäärät reunakentässä ($l=3230$ mm)

$$N_1 := \frac{S_z \cdot A_{V1d}}{F_{V,Rd} \cdot l_y} = 78.23 \quad 79 \text{ kpl}$$
$$N_1 \equiv 79$$

Ruuvimäärä sekundäärien välillä ($l=5020$ mm)

$$N_2 := \frac{S_z \cdot A_{V2d}}{F_{V,Rd} \cdot l_y} = 61.97 \quad 62 \text{ kpl}$$
$$N_2 \equiv 62$$

Ruuvimäärä keskikentässä ($l=6900$ mm)

$$N_3 := \frac{S_z \cdot A_{V3d}}{F_{V,Rd} \cdot l_y} = 1.49 \quad 2 \text{ kpl}$$

Keskikentälle tulee lisätä ruuveja jotta standardin SFS EN 1993-1-8 ehdot ruuvi etäisyyksille toteutuu.

Käytetään ruuvien sijoittelussa poikkeuksellisesti p_1 etäisyytenä 400 mm. Tällöin saadaan keskikentän ruuvimääräksi 36 kpl.

$$N_3 \equiv 36$$

Ruuveja liitokseen tulee siis yhteensä

$$N_{\text{sum}} := N_1 \cdot 2 + N_2 \cdot 2 + N_3 = 318 \quad \text{kpl}$$

Jos liitoksissa käytetään 8.8 M24 ruuveja

Ruuvien leikkauskestävyys leikettä kohden kun kierteet eivät ole leikkautumistasossa

$$F_{v.Rd} := 173.7 \text{ kN} \quad (\text{Hitsatut profiilit EN 1993-käsikirja s.327})$$

Leikkausvoiman kuormittamissa kiinnityksessä ruuvien leikkausvoiman mitoitusarvon on oltava pienempi, kuin leikkauskestävyyden ja reunapuristuskestävyyden mitoitusarvo

$$F_{v.Rd} \geq F_{b.Rd}$$

Ruuvimäärä reunakentässä ($l=3230 \text{ mm}$)

$$N_{1.1} := \frac{S_z \cdot A_{V1d}}{F_{v.Rd} \cdot l_y} = 122.24 \quad 123 \text{ kpl}$$
$$N_{1.1} \equiv 123$$

Ruuvimäärä sekundäärien välillä ($l=5020 \text{ mm}$)

$$N_{2.1} := \frac{S_z \cdot A_{V2d}}{F_{v.Rd} \cdot l_y} = 96.83 \quad 97 \text{ kpl}$$
$$N_{2.1} \equiv 97$$

Ruuvimäärä keskikentässä ($l=6900 \text{ mm}$)

$$N_{3.1} := \frac{S_z \cdot A_{V3d}}{F_{v.Rd} \cdot l_y} = 2.32 \quad 3 \text{ kpl}$$

Keskikentälle tulee lisätä ruuveja jotta standardin SFS EN 1993-1-8 ehdot ruuvi etäisyyksille toteutuu.

Käytetään ruuvien sijoittelussa poikkeuksellisesti p1 etäisyytenä 400 mm. Tällöin saadaan keskikentän ruuvimääräksi 54 kpl.

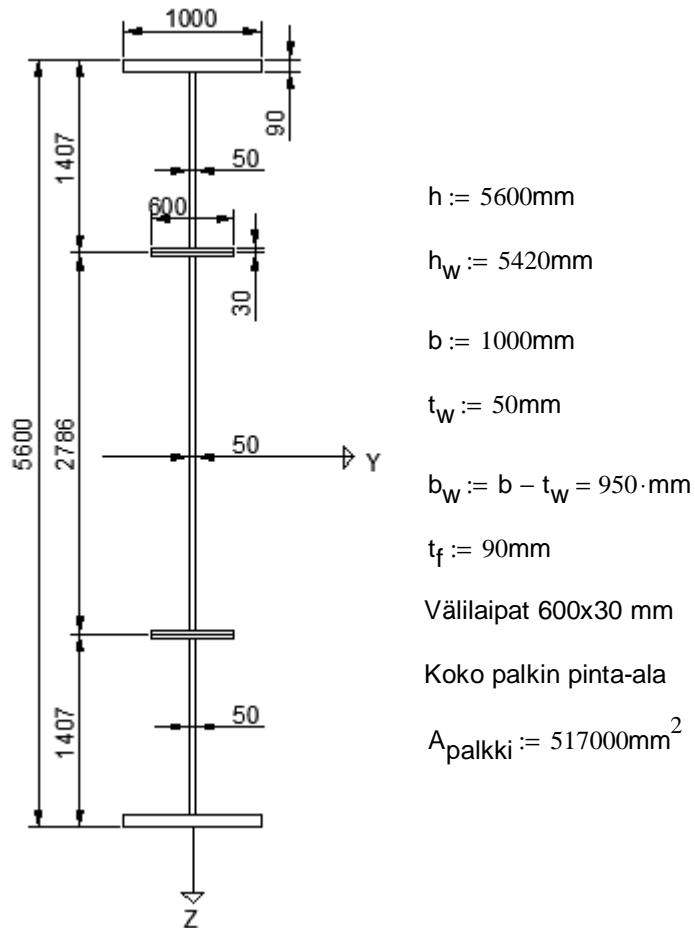
$$N_{3.1} \equiv 54$$

Ruuveja liitokseen tulee siis yhteensä

$$N_{\text{sum.1}} := N_{1.1} \cdot 2 + N_{2.1} \cdot 2 + N_{3.1} = 494 \quad \text{Kpl}$$

KOLMEEN OSAAN JAETUN PALKIN MITOITUS

Jos primääripalkki kolmessa osassa kuvan 1 mukaisesti. Kaikki profiilit saman painoisia.



KUVA 1

Poikkileikkausluokka

Lasketaan poikkileikkausluokat uumalle ja laipalle. (laskennassa ei oteta huomioon väliläippoja)

Kun teräs Q345. Standardi: National Standards of the People's Republic of China GB/T 1591-94

Materiaalin myötölujuus kun $t=50-100\text{ mm}$

$$f_y := 275 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\varepsilon := \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

Laippa

$$\frac{b - t_w}{2 \cdot t_f} = 5.28 \quad 9 \cdot \varepsilon = 8.320 \quad \text{PLL 1}$$

Uuma

$$\frac{h - 2 \cdot t_f}{t_w} = 108.4 \quad 124 \cdot \varepsilon = 114.628 \quad \text{PLL 3}$$

Poikkileikkaus kuuluu poikkileikkausluokka 3:n

Leikkauskestävyys

Muokauslujittumisen huomioon ottava tekijä

$$\eta := 1.0 \quad (\text{varmalla puolella oleva arvo})$$

Leikkauspinta – ala

$$A_V := \eta \cdot h_w \cdot t_w = 271000.00 \cdot \text{mm}^2$$

Plastisuusteorian mukainen leikkauskestävyys

$$V_{plRd} := \frac{A_V \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 43027.03 \cdot \text{kN} \quad \gamma_{M0} \equiv 1.0$$

Poikkileikkauksessa vaikuttava suurin leikkausvoima

$$V_{Ed} := 31200 \text{ kN}$$

Kestävyyden ehto

$$\frac{V_{Ed}}{V_{plRd}} = 0.73 \quad \text{OK}$$

Leikkauslujuus

$$f_{vd} := \frac{f_y}{\sqrt{3}} = 158.77 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Taivutuskestävyys

Tarkastelussa ei ole huomioitu palkin stabiiliutta, joka on huomioitu varsinaisessa palkin mitoituksessa

Poikkileikkauksen neliömomentti (välilaippoja ei huomioitu)

$$I_y := \frac{b \cdot h^3}{12} - \frac{b_w \cdot h_w^3}{12} = 2.03 \times 10^{12} \cdot \text{mm}^4$$

Poikkileikkauksen neutraaliakselin ja puristetun laipan uloimman reunan välinen etäisyys.

$$y_c := \frac{h}{2} = 2800.0 \cdot \text{mm}$$

Poikkileikkauksen taivutusvastus

$$W_{el} := \frac{I_y}{y_c} = 7.25 \times 10^8 \cdot \text{mm}^3$$

Poikkileikkauksen taivutuskestävyys, kun palkki kuuluu poikkileikkausluokka 3:n

$$M_{cRd} := \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 199349.76 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

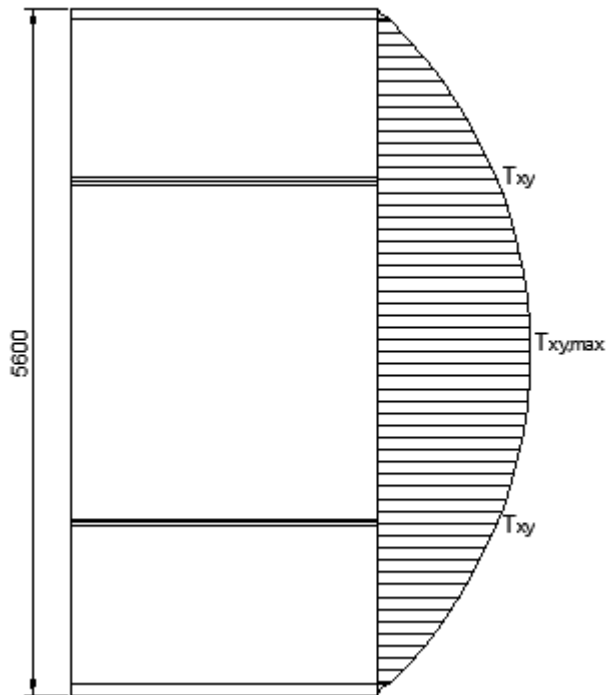
Poikkileikkauksessa vaikuttava suurin taivutusmomentti

$$M_{Ed} := 181670 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Kestävyysen ehto

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cRd}} = 0.91 \quad \text{OK}$$

Tarkastelu uuman liitoksessa



KUVA 2

Lasketaan staattinen momentti palkin osien liitoskohdan suhteen ruuvimäärän määrittämiseksi (kuva 2).

$$S_{Z1} := 30\text{mm} \cdot 600\text{mm} \cdot 15\text{mm} = 2.7 \times 10^5 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{Z2} := 50\text{mm} \cdot 1287\text{mm} \cdot 673.5\text{mm} = 4.33 \times 10^7 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{Z3} := 90\text{mm} \cdot 1000\text{mm} \cdot 1362\text{mm} = 1.23 \times 10^8 \cdot \text{mm}^3$$

Staattiseksimomentiksi saadaan

$$S_{Z,\text{liitos}} := S_{Z1} + S_{Z2} + S_{Z3} = 1.66 \times 10^8 \cdot \text{mm}^3$$

Leikkajännitys uumassa (liitoskohdassa).

Poikkileikkauksessa vaikuttava suurin leikkauvoima

$$V_{Ed} := 31200\text{kN}$$

Poikkileikkauksen leveys (uuma)

$$t_w = 50 \cdot \text{mm}$$

Jäyhyysmomentti y-akselin suuntaan

$$I_y = 2.03 \times 10^{12} \cdot \text{mm}^4$$

Leikkausjännityksen arvo suunnittelukuormilla murtorajatilassa (liitoskohta)

$$\tau_{xyd} := \frac{V_{Ed} \cdot S_{z,\text{liitos}}}{I_y \cdot t_w} = 51.091 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Ehto kestävyydelle

$$\frac{\tau_{xyd}}{f_{vd}} = 0.32 \quad \text{OK}$$

Staattinenmomentti poikkileikkauksen keskikohtaan

$$S_{z1.1} := 50\text{mm} \cdot 1363\text{mm} \cdot 681.5\text{mm} = 4.64 \times 10^7 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{z2.1} := 60\text{mm} \cdot 600\text{mm} \cdot 1393\text{mm} = 5.01 \times 10^7 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{z3.1} := 50\text{mm} \cdot 1287\text{mm} \cdot 2066.5\text{mm} = 1.33 \times 10^8 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_{z4.1} := 90\text{mm} \cdot 1000\text{mm} \cdot 2755\text{mm} = 2.48 \times 10^8 \cdot \text{mm}^3$$

Staattiseksimomentiksi saadaan

$$S_{z,\text{keskikohta}} := S_{z1.1} + S_{z2.1} + S_{z3.1} + S_{z4.1} = 4.78 \times 10^8 \cdot \text{mm}^3$$

Suurin leikkausjännitys uuman keskipisteessä

$$\tau_{xyd,\text{max}} := \frac{V_{Ed} \cdot S_{z,\text{keskikohta}}}{I_y \cdot t_w} = 146.8 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

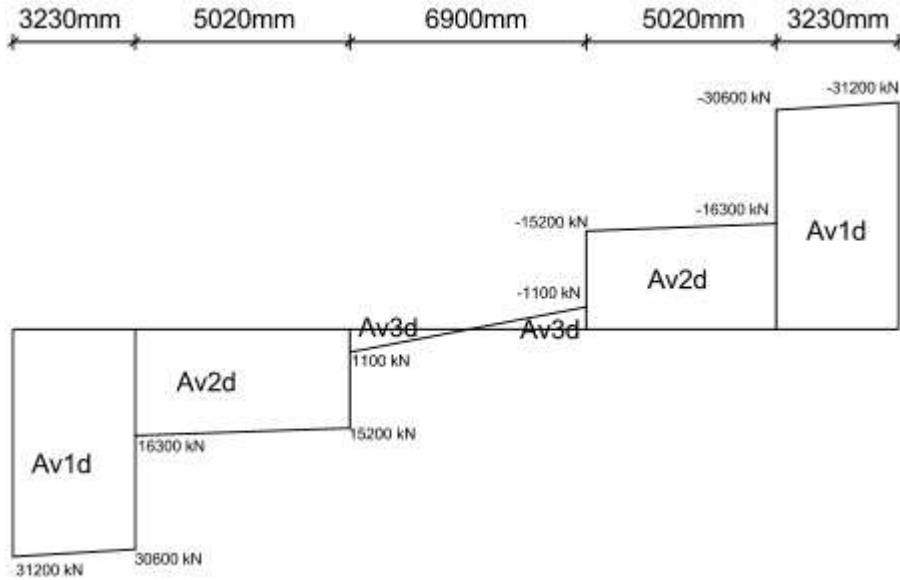
Ehto kestävyydelle

$$\frac{\tau_{xyd,\text{max}}}{f_{vd}} = 0.92 \quad \text{OK}$$

Palkin osien väliset liitokset

Liitokset toteutetaan ruuviliitoksina

Leikkauspinnan alat lasketaan kuvan 3 mukaan leikkausvoimapinnasta



KUVA 3

Leikkausvoimapinnan alat toiselta puolelta leikkausvoima pintaa

$$A_{V1d} := (3230\text{mm} \cdot 31200\text{kN}) - \left[\frac{(31200\text{kN} - 30600\text{kN}) \cdot 3230\text{mm}}{2} \right] = 9.981 \times 10^7 \cdot \text{kN} \cdot \text{mm}$$

$$A_{V2d} := (5020\text{mm} \cdot 16300\text{kN}) - \left[\frac{(16300\text{kN} - 15200\text{kN}) \cdot 5020\text{mm}}{2} \right] = 7.907 \times 10^7 \cdot \text{kN} \cdot \text{mm}$$

$$A_{V3d} := \frac{(3450\text{mm} \cdot 1100\text{kN})}{2} = 1.897 \times 10^6 \cdot \text{kN} \cdot \text{mm}$$

Liitoksissa käytetään 8.8M30 ruuveja.

Ruuvien leikkauskestävyys leikettäkohden, kun kierteet eivät ole leikkautumistasossa.

$$F_{v.Rd} := 271.5\text{kN} \quad (\text{Hitsatut profiilit EN 1993-käsikirja s.327})$$

Leikkausvoiman kuormittamissa kiinnityksissä ruuvien leikkausvoiman mitoitusarvon on oltava pienempi kuin leikkauskestävyyden ja reunapuristuskestävyyden mitoitusarvo.

$$F_{v.Rd} \geq F_{b.Rd}$$

Ruuvimäärä reunakentässä (l=3230 mm)

$$N_1 := \frac{S_{z.liitos} \cdot A_{V1d}}{F_{v.Rd} \cdot l_y} = 30.1 \quad 62 \text{ kpl (ruuveja kahdessa tasossa)}$$

$$N_1 \equiv 62$$

Ruuvimäärä sekundäärien välillä (l=5020 mm)

$$N_2 := \frac{S_{z.liitos} \cdot A_{V2d}}{F_{v.Rd} \cdot l_y} = 23.84 \quad 48 \text{ kpl (ruuveja kahdessa tasossa)}$$

$$N_2 \equiv 48$$

Ruuvimäärä keskikentässä (l=6900 mm)

$$N_3 := \frac{S_{z.liitos} \cdot A_{V3d}}{F_{v.Rd} \cdot l_y} = 0.57 \quad 2 \text{ kpl (ruuveja kahdessa tasossa)}$$

Keskikentälle tulee lisätä ruuveja jotta standardin SFS EN 1993-1-8 ehdot ruuvi etäisyyksille toteutuu.

Käytetään poikkeuksellisesti ruuvien sijoittelussa (p1) etäisyytenä arvoa 400 mm. Tällöin saadaan keskikentän ruuvi määräksi 36 kpl.

$$N_3 \equiv 36$$

Ruueja liitoksiin tulee yhteensä

$$N_{sum} := N_1 \cdot 2 + N_2 \cdot 2 + N_3 = 256 \text{ Kpl}$$

Jos liitoksissa käytetään 8.8 M24 ruuveja

Ruuvien leikkauskestävyys leikettäkohden, kun kierteet eivät ole leikkautumistasossa.

$$F_{v.Rd} \equiv 173.7 \text{ kN} \quad (\text{Hitsatut profiilit EN 1993-käsikirja s.327})$$

Leikkausvoiman kuormittamissa kiinnityksissä ruuvien leikkausvoiman mitoitusarvon on oltava pienempi kuin leikkauskestävyyden ja reunapuristuskestävyyden mitoitusarvo.

$$F_{v.Rd} \geq F_{b.Rd}$$

Ruuvimäärä reunakentässä (l=3230 mm)

$$N_{1.1} := \frac{S_{z.liitos} \cdot A_{V1d}}{F_{v.Rd} \cdot l_y} = 47.05 \quad 96 \text{ kpl (ruuveja kahdessa tasossa)}$$

$$N_{1.1} \equiv 96$$

Ruuvimäärä sekundäärien välillä (l=5020 mm)

$$N_{2.1} := \frac{S_{z.liitos} \cdot A_{V2d}}{F_{v.Rd} \cdot l_y} = 37.27 \quad 76 \text{ kpl (ruuveja kahdessa tasossa)}$$

$$N_{2.1} \equiv 76$$

Ruuvimäärä keskikentässä (l=6900 mm)

$$N_{3.1} := \frac{S_{z.liitos} \cdot A_{V3d}}{F_{v.Rd} \cdot l_y} = 0.89 \quad 2 \text{ kpl (ruuveja kahdessa tasossa)}$$

Keskikentälle tulee lisätä ruuveja jotta standardin SFS EN 1993-1-8 ehdot ruuvi etäisyyksille toteutuu.

Käytetään poikkeuksellisesti ruuvien sijoittelussa (p1) etäisyyttä 400 mm.
Tällöin saadaan keskikentän ruuvi määräksi 36 kpl.

$$N_{3.1} \equiv 36$$

$$N_{\text{sum1}} := N_{1.1} \cdot 2 + N_{2.1} \cdot 2 + N_{3.1} = 380 \text{ Kpl}$$