



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JAAKKO HUUSKO
HITSATUN I-PALKIN MASSAN MINIMOINTI POIKKILEIKKAUS-
LUOKASSA 4

Kandidaatintyö

Tarkastaja: TkT Kristo Mela

TIIVISTELMÄ

JAAKKO HUUSKO: Hitsatun I-palkin massan minimointi poikkileikkausluokassa 4, Weight minimization of welded I-beam in cross section class 4.

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 34 sivua, 0 liitesivua

Kesäkuu 2017

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Pääaine: Talonrakentaminen

Tarkastaja: tekniikan tohtori Kristo Mela

Avainsanat: optimointi, hitsattu I-palkki, poikkileikkausluokka 4

Tämän työn tarkoituksena on tutkia hitsatun I-palkin massan minimointia poikkileikkausluokassa 4. Palkki ja pienahitsi mitoitetaan Eurokoodien mukaisten mitoitusohjeiden mukaan. Pienahitsin vaikutusta palkin massaan ei huomioida.

Optimointialgoritmina käytetään heuristiikkaan pohjautuvaa parveilualgoritmia. Parveilualgoritmi on implementoitu Python (ver. 3.6.) -ohjelmointikielellä kirjoitetulle optimointiohjelmalle, jonka avulla optimitulokset lasketaan.

Optimoinnin kohdefunktiona käytetään palkin massaa, suunnittelumuuttujina uuman ja laippojen mittoja ja rajoitusehdot muodostuvat Eurokoodi 3:n mukaisten mitoitusohjeiden mukaan. Optimoitava palkki on homogeeninen sekä kaksoissymmetrinen ja suunnittelumuuttujia, eli poikkileikkauksen dimensioita käsitellään jatkuvina.

Työssä tutkitaan poikkileikkausluokan, jännevälin, teräslaadun, kiepahdustuennan sekä muuttujarajojen poiston vaikutusta palkin massaan. Tuloksista huomataan, että kiepahdus on mitoittava tekijä jokaisessa poikkileikkausluokassa. Tuloksena saadaan, että poikkileikkausluokan 4 palkki on yli 60 % kevyempi kuin kevein vakioprofiili ja keskimäärin 15 % kevyempi kuin poikkileikkausluokan 1 palkki.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö tehtiin Rakennustekniikan laitokselle kevään 2017 aikana. Aiempaa kokemusta rakenteiden optimoinnista kirjoittajalla ei ollut, mutta kiinnostus aiheeseen syntyi kandidaatintyöaiheiden esittelyn aikana. Python (ver. 3.6.) -ohjelmointikielellä kirjoitettu optimointiohjelma vei suuren osan työhön käytetystä ajasta, jonka avulla tulokset on laskettu. Haluan kiittää työn ohjaajaa ja tarkastajaa tekniikan tohtori Kristo Melaa hyvistä tietolähteistä sekä vinkeistä, joiden avulla työ on tieteellisempi ja helppolukuisempi.

Tampereella, 19.06.2017

Jaakko Huusko

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO.....	1
2.	OPTIMOINTITEHTÄVÄ.....	3
2.1	Kohdefunktio.....	4
2.2	Suunnittelumuuttujat.....	4
2.3	Poikkileikkausluokitus.....	4
2.4	Rajoitusehdot.....	5
2.4.1	Muuttujarajat.....	5
2.4.2	Taivutuskestävyys.....	6
2.4.3	Leikkauskestävyys.....	10
2.4.4	Leikkauslommahdus.....	11
2.4.5	Kiepahdus.....	13
2.4.6	Taipuma käyttörajatilassa.....	15
2.4.7	Hitsin kestävyys.....	16
2.5	Optimointitehtävän lauseke.....	18
3.	PARVEILUALGORITMI.....	21
3.1	Rajoitusehtojen huomiointi ja optimoinnin lopettaminen.....	21
3.2	Algoritmin implementointi.....	22
4.	TULOKSET.....	24
4.1	Optimointitehtävän ratkaisu.....	24
4.2	Poikkileikkausluokan vaikutus palkin massaan.....	25
4.3	Palkin pituuden vaikutus palkin massaan.....	27
4.4	Teräksen lujuuden vaikutus palkin massaan.....	28
4.5	Kiepahdustuennan vaikutus palkin massaan.....	29
4.5.1	Palkki tuettu kiepahdusta vastaan ja taipumaa ei rajoitettu.....	30
4.6	Muuttujarajojen poiston vaikutus palkin massaan.....	30
5.	YHTEENVETO.....	32
	LÄHTEET.....	34

LYHENTEET JA MERKINNÄT

PL poikkileikkausluokka

KA keskiarvo

a pienahitsin a-mitta/ poikkittaisjäykisteiden välinen etäisyys (kaava 41)

$A_{c,eff}$ puristetun levyn tehollinen pinta-ala

A_c puristetun levyn bruttopinta-ala

$A_{f,eff}$ laipan tehollinen pinta-ala

A_f laipan bruttopinta-ala

A_i rakenneosan tehollinen pinta-ala

A_v leikkauspinta-ala

\bar{b} tarkoituksenmukainen leveys

b_{e1} uuman tehottoman korkeuden yläpuolisen alueen korkeus

b_{e2} etäisyys neutraaliakselista uuman tehottomaan korkeuteen

b_{eff} tehollisen alueen leveys/ korkeus

b_f laipan leveys

b_i tarkasteltavan levyosan leveys

b_{neg} tehottoman alueen leveys/ korkeus

b_w uuman hitsien välinen etäisyys

c etäisyys hitsin reunasta laipan reunaan

C_1, C_2 ja C_3 vakioita, jotka riippuvat kuormituksesta

d välipohjalaatan paksuus

E teräksen kimmokerroin

e_c puristetun puolen korkeus

e_M	neutraaliakselin siirtymä
e_t	vedetyn puolen korkeus
f_{opt}	optimituloksen sisältävä skalaarisuure
f_u	teräksen nimellinen murtolujuus
$f_{vw,d}$	hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvo
f_y	teräksen nimellinen myötölujuus
f_{yf}	laipan teräksen nimellinen myötölujuus
f_{yw}	uuman teräksen nimellinen myötölujuus
$F_{w,Ed}$	hitsin pituusyksikköä kohti vaikuttavan voiman mitoitusarvo
$F_{w,Rd}$	hitsin kestävyuden mitoitusarvo
G	teräksen liukukerroin
$g_{k,betoni}$	teräsbetonin ominaispaino
$g_{k,palkki}$	teräspalkin ominaispaino
h	palkin korkeus
h_f	laippojen painopisteiden välinen etäisyys
h_w	uuman korkeus
$I_{eff,y}$	tehollinen neliömomentti y-akselin suhteen
I_{eff}	tehollinen neliömomentti
I_i	rakenneosan tehollinen neliömomentti
I_t	vääntöneliömomentti
I_z	neliömomentti z-akselin suhteen
I_ω	käyritysmisjäyhyys
k ja k_ω	teholliseen pituuteen liittyviä tekijöitä
K_{FI}	kuormakerroin

- k_σ lommahduskerroin
 L palkin jänneväli
 $m(x)$ palkin massan funktio
 M_{Ed} taivutusmomentin mitoitusarvo
 $M_{b.Rd}$ kiepahduskestävyyden mitoitusarvo
 $M_{c.Rd}$ taivutuskestävyyden mitoitusarvo
 M_{cr} kimnoteorian mukainen kriittinen kiepahdusmomentti
 $M_{f.Rd}$ poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo
 $pbest_i$ hetkellinen partikkelin paras tulos
 \vec{p}_g parven löytämä paras ratkaisu
 \vec{p}_i partikkelin paras sijainti
 q_d kuorman mitoitusarvo
 q_k kuorman ominaisarvo
 $q_{k,hyöty}$ hyötykuorman ominaisarvo
 s välipohjapalkkien k/k -jako
 t_f laipan paksuus
 t_i tarkasteltavan levyosan paksuus
 t_w uuman paksuus
 \vec{U} satunnaislukuvektori
 $V_{b.Rd}$ leikkauslommahduskestävyyden mitoitusarvo
 $V_{bf.Rd}$ laippojen osuus leikkauskestävyydestä
 $V_{bw.Rd}$ uuman osuus leikkauskestävyydestä
 $V_{c.Rd}$ palkin leikkauskestävyyden mitoitusarvo
 V_{Ed} leikkausvoiman mitoitusarvo

\vec{v}_i	partikkelin nopeus
w_1	pysyvistä kuormista aiheutuva taipuma
w_2	taipuman pitkäaikaisosuus pysyvien kuormien vaikuttaessa
w_3	muuttuvien kuormien aiheuttava taipuma
w_c	esikorotus kuormittamattomassa rakenneosassa
$W_{eff, min}$	poikkileikkauksen reunassa vaikuttavaan suurimman kimmoteorian mukaisen jännityksen avulla laskettu tehollinen taivutusvastus
w_{max}	taipuman maksimiarvo
w_{sall}	suurin sallittu taipuman arvo
W_y	poikkileikkausluokituksen mukainen tehollinen taivutusvastus y-akselin suunnassa
\mathbf{x}	suunnittelumuuttujat sisältävä vektori
\vec{x}_i	partikkelin nykyinen sijainti
\mathbf{x}_{opt}	optimimitat sisältävä vektori
z_0	neutraaliakselin sijainti palkin alareunasta
z_a	vaikutuspisteen koordinaatti
z_i	rakenneosan massakeskipisteen etäisyys palkin alareunasta
z_s	leikkauskeskiön koordinaatti
α_{LT}	kiepahduskäyrän mukainen epätarkkuustekijä
β_w	hitsin lujuuskerroin
γ_{M0}	poikkileikkauskestävyyden osavarmuusluku
γ_{M1}	kestävyyden osavarmuusluku
γ_{M2}	poikkileikkausten kestävyys vetomurtuman suhteen
σ_{cr}	kimmoteorian mukainen levyn lommahdusjännitys
χ_{LT}	kiepahduskestävyyden pienennystekijä

χ_w	uuman osuuden pienennystekijä
ϕ_i	kiihtyvyyserroin
$\bar{\lambda}_{LT}$	palkin muunnettu hoikkuus kiepahdukselle
$\bar{\lambda}_p$	muunnettu hoikkuus
$\bar{\lambda}_w$	uuman muunnettu hoikkuus
ε	teräksen lujuudesta riippuva kerroin
η	teräksen muokkauslujittumisen huomioon ottava tekijä
ρ	lommahduksen huomioon ottava pienennystekijä/ teräksen tiheys (kaava 2)
ψ	jännityssuhde
\otimes	tekijöiden välinen kertomisoperaattori

1. JOHDANTO

I-profiili on yleinen ja suositeltu profiilimuoto suuren taivutusvastuksensa ansiosta [9]. Niitä käytetään tyypillisesti erilaisina kannattajina talonrakenteissa, sekä teollisuusrakentamisessa. I-profiilit voidaan valmistaa joko hitsaamalla tai valsaamalla. Jos palkin korkeutta ei ole rajoitettu, I-palkki voidaan tehdä ns. ohutuumpalkkina [9]. Ohutuumpalkki on korkea ohutuuminen palkki, jonka kestävyys lasketaan kimmoteorian mukaan.

Teräsprofiilit luokitellaan Eurokoodi 3:ssa neljään eri poikkileikkausluokkaan puristettujen osien leveys-paksuussuhteiden perusteella. I-profiilin uuma ja laippa voivat kuulua eri poikkileikkausluokkiin. Poikkileikkausluokituksen tarkoitus on tunnistaa missä laajuudessa poikkileikkausten puristettujen osien paikallinen lommahdus rajoittaa poikkileikkausten kestävyyttä ja kiertymiskykyä. [4] Tässä työssä tarkastellaan poikkileikkausluokan 4 mukaista I-profiilin mitoitusta. Poikkileikkausluokat 4 ovat niitä, joissa paikallinen lommahdus esiintyy ennen kuin myötöraja saavutetaan poikkileikkauksen jossakin pisteessä [4].

Optimoimalla rakenteita voidaan säästää esimerkiksi materiaali- tai työkustannuksissa kohdefunktioista ja suunnittelumuuttujista riippuen, sekä automatisoida suunnitteluprosessia. Optimoinnilla tarkoitetaan menetelmää, jossa tarkasteltavalle kohdefunktiolle haetaan maksimi- tai minimiarvo. Kohdefunktiolla tarkoitetaan optimoitavan kohteen funktiota, jolle paras arvo halutaan löytää. Se voi olla esimerkiksi yksittäisen palkin massa tai rakenteen kokonaiskustannukset. Rakennesuunnittelijalle optimointi on hyvä työkalu, jonka avulla voidaan löytää paremmat ja kustannustehokkaammat ratkaisut.

Valmiin teräsrakenteen kustannukset jakautuvat likimäärin seuraavasti [7]:

- materiaalit 38 %
- konepajavalmistus 27 %
- suunnittelu 13 %
- asennus 12 %
- pintakäsittelyt 10 %

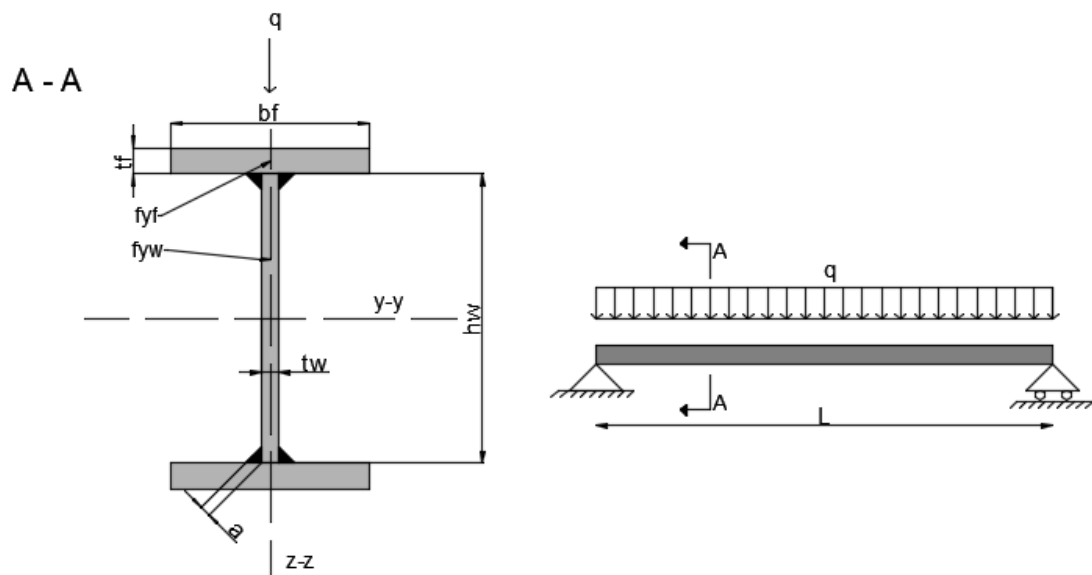
Profiilin optimikoko kustannusten kannalta riippuu siis materiaalin hankintakustannuksista ja konepajavalmistuksen kustannuksista, jotka muodostavat yhdessä 65 % rakenteen kokonaiskustannuksista. Sarjavalmistus kannattaa siinä vaiheessa, kun konepajavalmistuksessa saavutettavat säästöt ovat suuremmat kuin profiilikoon kasvattamisesta aiheutuvat lisäkustannukset materiaalin hankinnassa, kuljetuksessa ja mahdollisesti asennuksessa. [9]

Tämän työn optimointi käsittelee välipohjan kannatinpalkkina käytettävää hitsattua I-profiilia. Optimointi on rajattu koskemaan vain palkin massaa, jolla saavutetaan materiaalisäästöjä. Kokonaiskustannuksia minimoitaessa olisi otettava huomioon paljon enemmän muuttujia ja empiiristä tutkimusta, jotka laajentaisivat työn yli kandidaatintyön suosituspituuden. Palkki oletetaan sekä tasa-aineiseksi, että kaksoissymmetriseksi ja suunnittelumuuttujia eli poikkileikkauksen dimensioita käsitellään jatkuvina.

Luvussa 2 esitetään optimointitehtävä ja optimoinnissa käytettävät suunnittelumuuttujat, kohdefunktio sekä Eurokoodi 3:n mukaiset rajoitusehdot. Optimointialgoritmina käytetyn parveilualgoritmin toiminta ja implementointi optimointiohjelmaan on esitetty luvussa 3. Optimointiohjelmalla saadut tulokset on esitetty luvussa 4.

2. OPTIMOINTITEHTÄVÄ

Tässä työssä optimoidaan toimistorakennuksen välipohjan kannatinpalkkia. Palkkina toimii yksiaukkoinen hitsattu I-palkki, jonka jänneväli on L . Palkkia ei ole tuettu kiepahdusta eikä paikallista lommahdusta vastaan. Kuormitus oletetaan tasaiseksi, ja sen resultanti kulkee poikkileikkauksen leikkauskeskiön läpi kohtisuorasti, joten palkkiin ei aiheudu vääntöä. Kuvassa 1 on esitetty palkin mitat sekä kuormitustapa. Palkki on homogeeninen, eli palkin laipat ja uuma koostuvat samasta teräslaadusta. Poikkileikkaus on kaksoissymmetrinen, eli molemmat laipat ovat samankokoiset. Palkin teräslaatuena käytetään rakemeterästä S355, jonka nimelliselle myötölujuudelle käytetään arvoa $f_y = 355 \text{ MPa}$.



Kuva 1. Optimoitavan palkin tiedot

Eurokoodi 1:n mukaan toimistotilat kuuluvat käyttöluokkaan B [3], joten välipohjan hyötykuorman arvona käytetään $q_{k,hyöty} = 2,5 \text{ kN/m}^2$ [10]. Oletetaan betonisen välipohjalaatan paksuudeksi $d = 200 \text{ mm}$ ja välipohjapalkkien jaoksiksi $s = 4 \text{ m}$ sekä teräspalkin omasta painosta aiheutuvaksi kuormaksi $g_{k,palkki} = 1 \text{ kN/m}$. Betonin omapainolle käytetään arvoa $g_{k,betoni} = 25 \text{ kN/m}^3$. Toimistorakennukset kuuluvat seuraamusluokkaan CC2 [2], joten kuormakertoimelle käytetään arvoa $K_{FI} = 1,0$ [10].

Mitoitettava kuorma q_d saadaan laskettua Eurokoodi 0:n kansallisen liitteen mukaisesti [10]

$$q_d = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,15 (g_{k,palkki} + g_{k,betoni} s d) + 1,5 q_{k,hyöty} \\ 1,35 (g_{k,palkki} + g_{k,betoni} s d) \end{array} \right\}. \quad (1)$$

Ominaiskuormaksi saadaan $q_k = 31,0 \text{ kN/m}$ ja mitoituskuormaksi $q_d = 39,15 \text{ kN/m}$.

Mitoituskuorman avulla saadaan laskettua leikkausvoiman mitoitusarvo $V_{Ed} = \frac{q_d L}{2} = 117,45 \text{ kN}$ ja taivutusmomentin mitoitusarvo $M_{Ed} = \frac{q_d L^2}{8} = 176,18 \text{ kNm}$.

2.1 Kohdefunktio

Kohdefunktiolla tarkoitetaan funktiota, jolle halutaan löytää globaali minimi- tai maksimiarvo. Tässä työssä pyritään minimoimaan palkin massaa eli löytämään globaali minimi massan funktiolle

$$m(\mathbf{x}) = \rho L(h_w t_w + 2b_f t_f) \text{ [kg]} \quad (2)$$

missä ρ on teräksen tiheys $7850 \cdot 10^{-9} \text{ [kg/mm}^3\text{]}$, L on palkin pituus [mm] ja \mathbf{x} on suunnittelumuuttujat sisältävä vektori.

2.2 Suunnittelumuuttujat

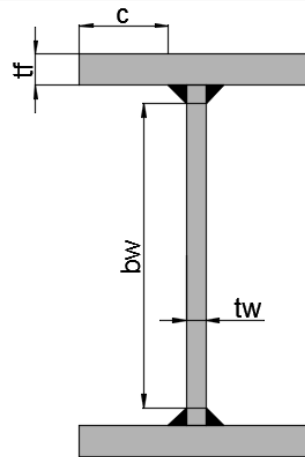
Suunnittelumuuttujilla tarkoitetaan optimoitavan kohteen muuttujia, joiden arvoa muuttamalla kohdefunktion maksimi- tai minimiarvo pyritään löytämään. I-palkin massaa minimoitaessa suunnittelumuuttujiksi valitaan palkin uuman korkeus (h_w) ja paksuus (t_w) sekä laippojen paksuudet (t_f) ja leveydet (b_f). Poikkileikkauksen suunnittelumuuttujat on esitetty kuvassa 1. Muuttujat kerätään vektoriin

$$\mathbf{x} = \{h_w, t_w, b_f, t_f\}^T \text{ [mm]}. \quad (3)$$

Muuttujia käsitellään jatkuvina, joten ne voivat saada mitä tahansa arvoja muuttujien rajoitusehtojen väliltä.

2.3 Poikkileikkausluokitus

Poikkileikkausluokituksen tarkoitus on tunnistaa missä laajuudessa poikkileikkausten puristettujen osien paikallinen lommahdus rajoittaa poikkileikkausten kestävyyttä ja kiertymiskykyä [4]. I-palkin uuma ja laippa luokitellaan omiin poikkileikkausluokkiinsa ja palkki luokitellaan korkeimpaan luokkaan sen puristettujen osien perusteella. Poikkileikkausluokitus riippuu taso-osien leveys-paksuussuhteista, palkin teräslaadusta sekä poikkileikkauksen rasituksesta. Tässä työssä uuma luokitellaan taivutettuna taso-osana ja laippa puristettuna taso-osana. Kuvasta 2 nähdään taso-osien poikkileikkausluokituksessa käytettävät mitat.



Kuva 2. Poikkileikkausluokittelussa käytettävät mitat [4]

Uma kuuluu poikkileikkausluokkaan 4, jos se täyttää seuraavan ehdon [4]:

$$\frac{b_w}{t_w} > 124\varepsilon \quad (4)$$

missä b_w on hitsien välinen etäisyys, ε on teräksen lujuudesta riippuva kerroin ($\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$) ja f_y on teräksen nimellinen myötölujuus.

Seuraavan ehdon toteutuessa, laippa kuuluu poikkileikkausluokkaan 4 [4]:

$$\frac{c}{t_f} > 14\varepsilon \quad (5)$$

missä c on etäisyys hitsin reunasta laipan reunaan.

2.4 Rajoitusehdot

Optimoitavan palkin rajoitusehdot määräytyvät Eurokoodi 3:n mukaisten mitoitusohjeiden mukaan. Palkin tulee täyttää kaikki eurokoodissa määritetyt ehdot, jotta se on rakenteellisesti turvallinen. Tässä työssä tasainen kuormitus aiheuttaa palkkiin vain leikkaus- ja taivutusjännityksiä, joten akselin suuntaista veto- tai puristusjännityksiä ei tarvitse tarkastella.

2.4.1 Muuttujarajat

Hitsatun I-palkin mitoille on suositeltu seuraavia arvoja Ruukin Hitsatut Profilit -käsikirjassa [9]:

$$300 \leq h_w \leq 3300 \quad (6)$$

$$6 \leq t_w \leq 100 \quad (7)$$

$$100 \leq b_f \leq 700 \quad (9)$$

$$5 \leq t_f \leq 100 \quad (10)$$

Jos mittasuosituksista poiketaan, profiilin hitsaus vaikeutuu [9].

2.4.2 Taivutuskestävyys

Poikkileikkausluokassa 4 taivutusmomentista aiheutuva puristusjännitys pienentää poikkileikkauksen tehollista taivutusvastusta, koska paikallinen lommahdus rajoittaa puristettujen osien kestävyttä.

Taivutusmomentin mitoitusarvon M_{Ed} tulee kaikissa poikkileikkauksissa täyttää seuraava ehto:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (11)$$

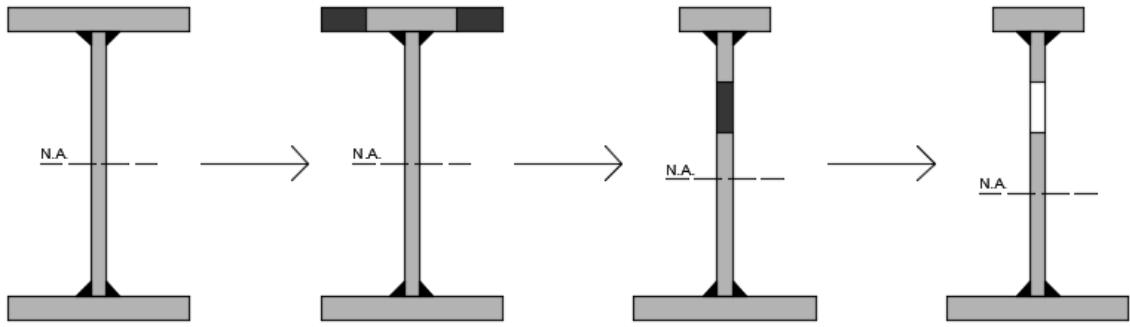
missä $M_{c,Rd}$ on taivutuskestävyyden mitoitusarvo.

Poikkileikkausluokassa 4 taivutuskestävyyden mitoitusarvo yhden pääjäyhyysakselin suhteen tapahtuvassa taivutuksessa lasketaan seuraavasti:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (12)$$

missä $W_{eff,min}$ on poikkileikkauksen reunassa vaikuttavaan suurimman kimmoteorian mukaisen jännityksen avulla laskettu tehollinen taivutusvastus ja γ_{M0} on poikkileikkauksen kestävyuden osavarmuusluku, kansallisen liitteen mukaisesti käytetään arvoa $\gamma_{M0} = 1,0$ [10].

Poikkileikkausluokkaan 4 kuuluvilla rakenneosilla paikallinen lommahdus pienentää kimmoteorian mukaisesti laskettua taivutusvastusta, joten tehollisen taivutusvastuksen laskemiseen käytetään poikkileikkauksen tehollista pinta-alaa. Kuvassa 3 on havainnollistettu, miten poikkileikkauksen neutraaliakseli laskee puristettujen osien lommahduksen seurauksena.



Kuva 3. Paikallisen lommahduksen vaikutus neutraaliakselin sijaintiin

Puristetulla alueella olevan levyn, jonka bruttopinta-ala on A_c , tehollinen pinta-ala lasketaan seuraavasti:

$$A_{c,eff} = \rho A_c \quad (13)$$

missä ρ on lommahduksen huomioon ottava pienennystekijä.

Poikkileikkausluokan 4 laipoille pienennystekijä lasketaan seuraavasti:

$$\rho = 1,0 \quad , \text{ kun } \bar{\lambda}_p \leq 0,748 \text{ tai} \quad (14)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p^{-0,188}}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad , \text{ kun } \bar{\lambda}_p > 0,748. \quad (15)$$

Pienennystekijä ρ lasketaan poikkileikkausluokan 4 uumalle seuraavasti:

$$\rho = 1,0 \quad , \text{ kun } \bar{\lambda}_p \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} \text{ tai} \quad (16)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p^{-0,055(3+\psi)}}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad , \text{ kun } \bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} \quad (17)$$

missä ψ on jännityssuhde.

Molemmille taso-osille muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}_p$ lasketaan seuraavasti:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}}, \quad (18)$$

missä \bar{b} on tarkoituksenmukainen leveys (uumalle b_w ja laipalle c), k_σ on jännityssuhdetta ψ ja reunaehtoja vastaava lommahduskerroin, t on rakenneosan paksuus ja σ_{cr} on kimmoiteorian mukainen levyn lommahdusjännitys.

Tasaisesti kuormitetulla laipalla jännityssuhteen arvo $\psi = 1$, joten lommahduskertoimelle käytetään arvoa $k_\sigma = 0,43$ [5].

Puristetun laipan tehollisen leveyden avulla saadaan laskettua tehottoman alueen leveys

$$b_{eff} = \rho c \quad (19)$$

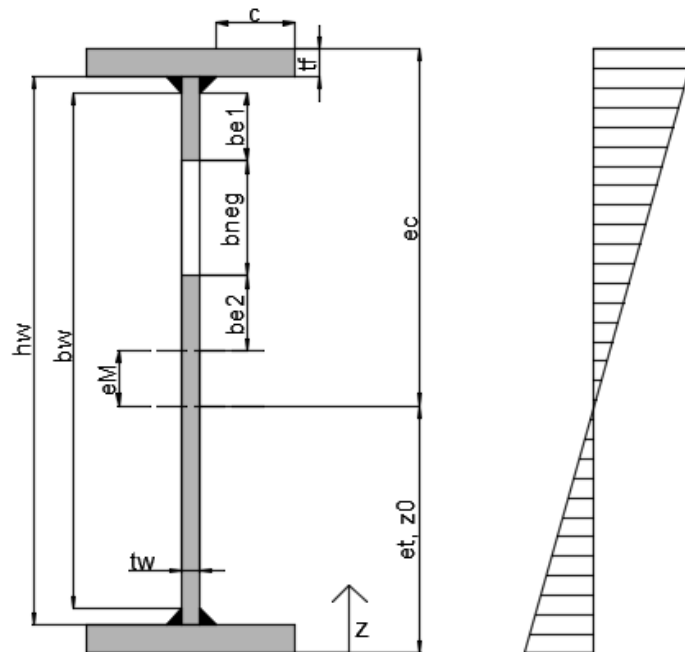
$$b_{neg} = b_f - 2b_{eff} - t_w - 2a\sqrt{2} \quad (20)$$

missä a on pienahitsin a -mitta.

Puristetun laipan tehollinen pinta-ala lasketaan tehottoman leveyden avulla

$$A_{f,eff} = A_f - b_{neg} t_f. \quad (21)$$

Kuvassa 4 on esitetty taivutusvastuksen laskennassa käytettävät mitat ja uuman lommuksuuden vaikutus neutraaliakselin sijaintiin ja poikkileikkauksen jännitysjakaumaan.



Kuva 4. Taivutusvastuksen laskennassa käytettävät mitat ja jännityksen jakautuminen

Taivutetun uuman puristetun alueen tehollinen korkeus lasketaan eurokoodin mukaisesti [5]

$$b_{eff} = \rho b_c = \rho b_w / (1 - \psi) \quad (22)$$

$$b_{e1} = 0,4 b_{eff} \quad (23)$$

$$b_{e2} = 0,6 b_{eff}. \quad (24)$$

Tehottoman alueen korkeus saadaan määritettyä seuraavasti:

$$b_{neg} = h_w - 2a\sqrt{2} - (z_0 - t_w) - b_{e1} - b_{e2} \quad (25)$$

missä h_w on uuman korkeus ja z_0 on poikkileikkauksen neutraaliakselin etäisyys palkin alareunasta.

Vedetyn puolen korkeus, eli poikkileikkauksen neutraaliakselin etäisyys palkin alareunasta, saadaan laskettua osien massakeskipisteiden ja tehollisten pinta-alojen avulla

$$e_t = z_0 = \frac{\sum A_i z_i}{\sum A_i} \quad (26)$$

missä A_i on rakenneosan tehollinen pinta-ala ja z_i on rakenneosan massakeskipisteen etäisyys palkin alareunasta.

Puristetun puolen korkeus lasketaan vedetyn puolen korkeuden avulla

$$e_c = h - e_t. \quad (27)$$

Neutraaliakselin siirtymä e_M bruttopoikkileikkauksen keskilinjasta

$$e_M = \frac{h}{2} - e_t. \quad (28)$$

Tehollinen neliömomentti uuden neutraaliakselin suhteen

$$I_{eff} = \sum I_i + \sum A_i (z_i - z_0)^2 \quad (29)$$

missä I_i on rakenneosan tehollinen neliömomentti.

Jos poikkileikkaukseen kohdistuisi tasainen puristus, laskenta voitaisiin lopettaa tähän. Taivutus aiheuttaa kuitenkin poikkileikkaukseen jännitysgradientin, jolloin poikkileikkauksen jännitysjakauma muuttuu samalla, kun osa poikkileikkauksesta jää tehottomaksi ja neutraaliakselin paikka siirtyy. Tämän takia tehollinen poikkileikkaus joudutaan määrittämään iteratiivisesti, joten jatketaan laskentaa seuraavalle laskentakierrokselle. [9]

Ensimmäisellä laskentakierroksella määritetyn tehollisen poikkileikkauksen perusteella saadaan uuman uudeksi jännityssuhteeksi

$$\psi = - \frac{e_t - t_f - a\sqrt{2}}{e_c - t_f - a\sqrt{2}} \quad (30)$$

Uuden jännityssuhteen avulla saadaan määritettyä uusi lommahduskerroin ja sen avulla uuden teholliset pinta-alat rakenneosille sekä uusi tehollinen neliömomenti. Iterointia voidaan jatkaa niin kauan, kunnes haluttu laskentatarkkuus saavutetaan. Tässä työssä iterointi lopetetaan, kun neliömomentin arvo muuttuu laskentakierrosten välillä vähemmän kuin 0,1 %.

Tehollinen taivutusvastus saadaan laskettua tehollisen neliömomentin ja jännityskorkeuksien avulla

$$W_{eff,min} = \min \left[\frac{I_{eff}}{e_c}, \frac{I_{eff}}{e_t} \right]. \quad (31)$$

2.4.3 Leikkauskestävyys

Leikkauskestävyyden arvo riippuu siitä, lasketaanko se plastisuus- vai kimmoteorian mukaan. Plastisuusteorian mukaisessa tarkastelussa kimmoteorian mukainen leikkausjännityksen paikallinen maksimi ei rajoita kestävyyttä, vaan poikkileikkaus voi ottaa vastaan lisää kuormaa, kunnes koko leikkausta kantavan pinta-alan keskimääräinen leikkausjännitys on saavuttanut leikkauslujuuden mitoitusarvon. [9]

Leikkausvoiman mitoitusarvon V_{Ed} tulee kaikissa poikkileikkauksissa täyttää ehto:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (32)$$

missä $V_{c,Rd}$ on palkin leikkauskestävyyden mitoitusarvo.

Tässä työssä leikkausvoiman mitoitusarvon sijainnissa poikkileikkaukseen ei kohdistu taivutusta, joten leikkauskestävyys voidaan laskea plastisuusteorian mukaisesti kaikissa poikkileikkausluokissa. Kun vääntöä ei ole, plastisuusteorian mukainen leikkauskestävyys lasketaan kaavasta

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (33)$$

missä A_v on leikkauspinta-ala.

Leikkauspinta-ala A_v lasketaan hitsaamalla valmistetuille I-profileille, joissa kuormitus on uuman suuntainen, seuraavasti:

$$A_v = \eta h_w t_w \quad (34)$$

missä η on teräksen muokkauslujittumisen huomioon ottava tekijä.

S235 – S460 lujuusluokan teräksille suositellaan arvoa $\eta = 1,2$, muille lujuusluokille käytetään arvoa $\eta = 1$ [5].

2.4.4 Leikkauslommahdus

Jos profiilin uuma on todella hoikka, se voi lommahtaa leikkausvoiman vaikutuksesta ennen kuin plastinen leikkauskestävyys saavutetaan. Leikkauslommahduskestävyys joudutaan yleensä tarkastamaan ohutumapalkkia mitoittaessa. [9] Pystyjäykisteiden avulla voidaan parantaa uuman leikkauslommahduskestävyyttä, mutta tässä työssä jäykisteitä käytetään vain palkin päädyissä.

Rakenteen leikkauslommahduskestävyys tulee tarkistaa, jos seuraava ehto toteutuu jäykistättömälle uumalle:

$$\frac{h_w}{t_w} > 72 \frac{\varepsilon}{\eta}. \quad (35)$$

Leikkauslommahduskestävyyden tulee täyttää ehto

$$\frac{V_{Ed}}{V_{b.Rd}} \leq 1,0 \quad (36)$$

missä $V_{b.Rd}$ on leikkauslommahduskestävyyden mitoitusarvo.

Jäykistämättömien tai jäykistettyjen uumien leikkauslommahduskestävyyden mitoitusarvo lasketaan kaavasta

$$V_{b.Rd} = V_{bw.Rd} + V_{bf.Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (37)$$

missä, $V_{bw.Rd}$ on uuman osuus leikkauskestävyydestä, $V_{bf.Rd}$ on laippojen osuus leikkauskestävyydestä, f_{yw} on uuman teräksen nimellinen myötölujuus ja γ_{M1} on kestävyiden osavarmuusluku, kansallisessa liitteessä suositellaan käytettäväksi arvoa $\gamma_{M1} = 1,0$ [10].

Uuman osuus lasketaan kaavasta

$$V_{bw.Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (38)$$

missä χ_w on uuman osuuden pienennystekijä.

Uumille, joissa on pystyjäykisteen vain tuilla ja uumille, joissa on joko poikittaiset välijäykisteet tai pituusjäykisteet tai molemmat, uuman osuus χ_w leikkauskestävyydestä määritetään taulukosta 1. [5]

Taulukko 1. Uuman osuus χ_w leikkauskestävyydestä [5]

	Jäykkä päätyjäykiste	Ei-jäykkä päätyjäykiste
$\bar{\lambda}_w < 0,83/\eta$	η	η
$0,83/\eta \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$0,83/\bar{\lambda}_w$	$0,83/\bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$1,37/(0,7 + \bar{\lambda}_w)$	$0,83/\bar{\lambda}_w$

Muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}_w$ voidaan laskea seuraavasti, kun vain tuilla on poikittaisjäykisteet:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 t_w \varepsilon}. \quad (39)$$

Jos laipan kestävyttä ei hyödynnetä täysin taivutuskestävyyttä laskettaessa ($M_{f,Rd} > M_{Ed}$), laippojen osuus leikkauskestävyyteen otetaan huomioon seuraavasti:

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right) \quad (40)$$

$$c = a \left(0,25 + \frac{1,6 b_f t_f^2 f_{yf}}{t_w h_w^2 f_{yw}} \right) \quad (41)$$

missä M_{Ed} on poikkileikkaukseen vaikuttavan taivutusmomentin mitoitusarvo murtorajatilassa, b_f ja t_f ovat sen laipan leveys ja paksuus, joka antaa pienimmän aksiaalisen kestävyden, b_f saa olla enintään $15 \varepsilon t_f$ uuman molemmilla puolin, a on poikittaisjäykisteiden välinen etäisyys (tässä työssä jänneväli L) ja f_{yf} on laipan nimellinen myötölujuus.

$M_{f,Rd}$ on poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo, kun vain teholliset laipat otetaan huomioon

$$M_{f,Rd} = \min \left[h_f A_{f1,eff} \frac{f_{yf1}}{\gamma_{M0}}; h_f A_{f2,eff} \frac{f_{yf2}}{\gamma_{M0}} \right] \quad (42)$$

missä $A_{f1,eff}$ ja $A_{f2,eff}$ ovat laippojen teholliset pinta-alat, f_{yf1} ja f_{yf2} ovat laippojen nimelliset myötölujuudet ja h_f on laippojen painopisteiden välinen etäisyys.

Tässä työssä leikkausvoiman mitoitusarvon sijainnissa poikkileikkaukseen ei kohdistu taivutusmomenttia, joten laippojen osuus leikkauslommahduskestävyyteen voidaan sieventää muotoon

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}}. \quad (43)$$

2.4.5 Kiepahdus

Vahvemman pääjyhyysakselin suhteen taivutettu sivusuunnassa tukematon palkki mitoitetaan siten, että kiepahduksen suhteen seuraava ehto on voimassa

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (44)$$

missä $M_{b,Rd}$ on kiepahduskestävyyden mitoitusarvo.

Sivusuunnassa tukemattoman palkin kiepahduskestävyys saadaan kaavasta

$$M_{b,Rd} = W_y \frac{\chi_{LT} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (45)$$

missä W_y on poikkileikkausluokituksen mukainen tehollinen taivutusvastus y-akselin suunnassa ja χ_{LT} on kiepahduskestävyyden pienennystekijä.

Vakiopoikkileikkauksisten taivutettujen palkkien muunnettua hoikkuutta vastaava pienennystekijä χ_{LT} lasketaan kaavasta

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0 \quad , \text{ kun } \bar{\lambda}_{LT} > 0,2 \quad (46)$$

$$\chi_{LT} = 1,0 \quad , \text{ kun } \bar{\lambda}_{LT} \leq 0,2 \quad (47)$$

$$\Phi_{LT} = 0,5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (48)$$

missä α_{LT} on sovellettavan kiepahduskäyrän mukainen epätarkkuustekijä ja $\bar{\lambda}_{LT}$ on palkin muunnettu hoikkuus kiepahdukselle.

Kiepahduskäyrä määritellään taulukosta 3 ja kiepahduskäyrän mukainen epätarkkuustekijä α_{LT} taulukon 2 avulla.

Taulukko 2. Kiepahduskäyrien suositeltavat epätarkkuustekijät [4]

Kiepahduskäyrä	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Taulukko 3. Suositus kiepahduskäyrän valitsemiseksi poikkileikkauksen mukaan [4]

Poikkileikkaus	Rajat	Kiepahduskäyrä
Hitsatut I-profiilit	$h / b_f \leq 2$	c
	$h / b_f > 2$	d

Palkin muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}_{LT}$ lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (49)$$

missä M_{cr} on kimmoteorian mukainen kriittinen kiepahdusmomentti.

Kimmoteorian mukainen kriittinen kiepahdusmomentti M_{cr} lasketaan heikomman pääjähyyksensä suhteen symmetriselle profiilille seuraavasti, kun sauvaan ei kohdistu primääristä eikä sekundaarista vääntömomenttia [9]:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(kL)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega} \right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(kL)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right] \quad (50)$$

missä C_1, C_2 ja C_3 ovat vakioita, jotka riippuvat kuormituksesta, I_z on bruttopoikkileikkauksen mukaan laskettu neliomomentti z-akselin suhteen, I_t on bruttopoikkileikkauksen vääntöneliomomentti, I_ω on käyritysmisjäyhyys, L on kiepahdustukien väli (tässä tehtävässä palkin pituus), E on teräksen kimmokerroin 210 000 MPa, G on teräksen liukukerroin 81 000 MPa ja k ja k_ω ovat teholliseen pituuteen liittyviä tekijöitä.

$$z_g = z_a - z_s \quad (51)$$

$$z_j = z_s - \frac{0,5 \int (y^2 + z^2) z dA}{I_y} \quad (52)$$

missä z_a on vaikutuspisteen koordinaatti (tässä tehtävässä $z_a = h$) ja z_s on leikkauskeskiön koordinaatti, kaksoissymmetriselle sauvalle käytetään arvoa $z_s = 0,5h$.

Kaksoissymmetriselle profiilille käytetään arvoa $z_j = 0$. Lisäksi kaksoissymmetriselle profiilille käyritysmisjäyhyden kaava voidaan esittää seuraavassa muodossa [9]:

$$I_\omega = 0,25 h_f^2 I_z \quad (53)$$

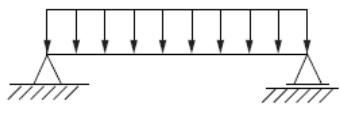
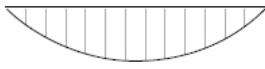
missä h_f on laippojen keskipisteiden välinen etäisyys.

Poikkileikkauksen vääntöneliomomntti saadaan I-poikkileikkauksen kaavasta:

$$I_t = \frac{1}{3} \sum b_i t_i^3 \quad (54)$$

missä b_i on tarkasteltavan levyosan leveys ja t_i on tarkasteltavan levyosan paksuus.

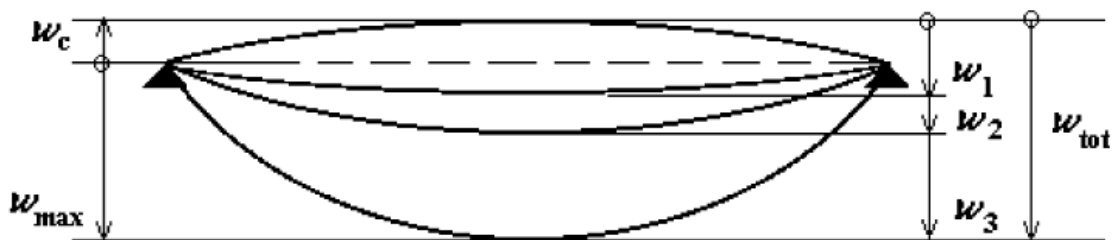
Tässä tehtävässä poikki-pinta voi käyristyä ja kiertymä on vapaa palkin molemmissa päissä, minkä seurauksena tekijät $k = 1,0$ ja $k_\omega = 1,0$ [9]. Tehollisen pituuden k avulla saadaan määritettyä kuormituksesta riippuville vakioille C_1, C_2 ja C_3 arvot kuvasta 5.

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

Kuva 5. Kriittisen kiepahdusmomentin laskennassa käytettävien vakioiden arvot

2.4.6 Taipuma käyttörajatilassa

Rakenteiden siirtymien ja taipumien rajoittamisen tarkoituksena on varmistaa rakenteiden tarkoituksenmukainen toiminta kaikissa tilanteissa. Taipumien rajoittamisen syynä saattaa olla myös ulkonäköseikat. [1] Kokonaistaipuma muodostuu monesta eri tekijästä, kuten kuvassa 6 havainnollistetaan. Usein sallitun taipuman suuruuden määrää tarkasteltavaan rakenteeseen liittyvät muut rakenteet. Tällaisia ovat esimerkiksi palkin tai laatan päällä olevat siirtymille herkät laitteet tai rakenteet, kuten lasirakenteet, väliseinät ja pintarakenteet. [1]



Kuva 6. Kokonaistaipuman muodostuminen yksiaukkoiselle palkille [2]

Taipumalle saadaan rajoitusehto

$$\frac{w_{max}}{w_{sall}} \leq 1,0 \quad (55)$$

$$w_{max} = w_1 + w_2 + w_3 - w_c \quad (56)$$

missä w_{sall} on suurin sallittu taipuman arvo, w_1 on pysyvistä kuormista aiheutuva taipuma, w_2 on taipuman pitkäaikaisosuus pysyvien kuormien vaikuttaessa, w_3 on muuttuvien kuormien aiheuttava taipuma ja w_c on esikorotus kuormittamattomassa rakenneosassa.

Välipohjapalkkien suurin sallittu taipuman arvo eurokoodin kansallisen liitteen mukaan

$$w_{sall} = \frac{L}{400}. \quad (57)$$

Tässä työssä ei esikoroteta palkkia. Yksiaukkoisella palkilla taipuman suurin arvo sijaitsee palkin keskellä.

Taipuman lauseke saadaan sievennettyä muotoon

$$w_{max} = w_1 + w_3 = \frac{5 q_k L^4}{384 E I_{eff,y}} \quad (58)$$

missä q_k on palkin ominaiskuorma ja $I_{eff,y}$ on tehollinen neliömomentti y-akselin suhteen.

2.4.7 Hitsin kestävyys

Pienahitsin kestävyys voidaan laskea yksinkertaistetulla menetelmällä olettaen hitsiin kohdistuvien voimien resultantin aiheuttavan hitsin laskentapoikkipintaan aina pelkkää leikkausta. Tämä on varmallalla puolella oleva yksinkertaistus, jolloin hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvolle saadaan johdettua komponenttimenetelmän avulla seuraava kaava [9]:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u/\sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad (59)$$

missä $f_{vw,d}$ on hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvo, f_u on heikoimman liitettävän osan nimellinen murtolujuus, β_w on kyseeseen tuleva lujuuskerroin (ks. taulukko 4) ja γ_{M2} on poikkileikkausten kestävyys vetomurtuman suhteen, kansallisessa liitteessä suositellaan käytettäväksi arvoa $\gamma_{M2} = 1,25$ [10].

Menetelmän etuna on, että hitsiin kohdistuvan voimaresultantin suuntaa ei tarvitse tuntea, koska näin laskien se ei vaikuta hitsin kestävyuden mitoitusarvoon. Riittää että tunnetaan hitsiin kohdistuvan voimaresultantin suuruus. Toisaalta menetelmä johtaa hieinan ylimateoituukseen riippuen voiman suunnasta. [9]

Taulukko 4. Hitsin lujuuskertoimet terästen eri lujuusluokille [9]

Teräksen lujuusluokka	Hitsin lujuuskerroin β_w
S235	0,8
S275	0,85
S355	0,9
S420	1,0
S460	1,0
Lujuusluokkien S500-S700 teräksille käytetään arvoa $\beta_w = 1,0$.	

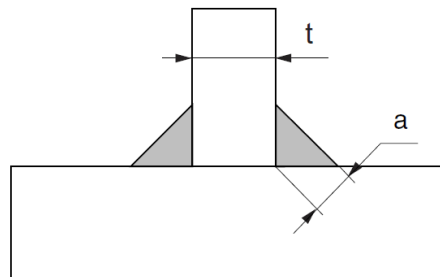
Pienahitsin mitoitusehto

$$F_{w.Ed} \leq F_{w.Rd} \quad (60)$$

$$F_{w.Rd} = f_{vw,d} a \quad (61)$$

missä $F_{w.Ed}$ on hitsin pituusyksikköä kohti vaikuttavan voiman mitoitusarvo, $F_{w.Rd}$ on hitsin kestävyuden mitoitusarvo ja a on pienahitsin a -mitta.

Pienahitsin efektiivinen a -mitta on suurimman kolmion (joko tasakylkinen tai erikylkinen) korkeus, joka voidaan piirtää railon kylkien ja hitsin pinnan sisään mitattuna kohtisuorassa suunnassa tämän kolmion uloimpaan pintaan nähden. Pienahitsin efektiiviseksi a -mitaksi valitaan vähintään 3 mm. [6] Hitsin mitoittamisessa käytettävät mitat on esitetty kuvassa 6.

**Kuva 7.** Hitsin mitoittamisessa käytettävät mitat

Kaavaan 59 perustuen voidaan määrittää tarvittava a-mitta kaksipuoliselle symmetriselle pienahitsille varmalla puolella yksinkertaistaen, kun oletetaan liitettävään levyyn pituusyksikköä koti kohdistuva voima kyseisen levyn plastisen vetokestävyyden suuruiseksi, jolloin vaadittavalle a-mitalle saadaan lauseke [9]

$$a = \max \left[\frac{\sqrt{3} \beta_w \gamma_{M2} f_y t_w}{2 \gamma_{M0} f_u}; 3 \right]. \quad (62)$$

Uuman ja laipan väliset hitsit voidaan mitoittaa nimelliselle leikkausvoulle V_{Ed}/h_w , jos $V_{Ed} \leq V_{bw.Rd}$. Suuremmilla leikkausvoiman arvoilla (kun $V_{Ed} > V_{bw.Rd}$) uuman ja laipan väliset hitsit voidaan mitoittaa varmalla puolella yksinkertaistaen leikkausvoulle [9]

$$F_{w.Ed} = \frac{\eta f_{yw} t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}. \quad (63)$$

Pienahitsin a-mitta saadaan nyt laskettua lausekkeella

$$a = \max \left[\frac{\eta \beta_w \gamma_{M2} f_{yw} t_w}{2 \gamma_{M1} f_{uw}}; 3 \right]. \quad (64)$$

Tässä työssä pienahitsin mitoitukselle käytetään kaavaa 64, koska sillä laskettaessa pienahitsin a-mitta voi olla jopa 31 % pienempi kuin kaavalla 62 laskettuna.

2.5 Optimointitehtävän lauseke

Suunnittelumuuttujien, kohdefunktion ja rajoitusehtojen avulla saadaan muodostettua optimointitehtävän lauseke standardimuotoon

$$\min m(\mathbf{x}) = \rho L(h_w t_w + 2b_f t_f) \quad (65)$$

$$\text{sit en, ett ä:} \quad (66)$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c.Rd}(\mathbf{x})} \leq 1,0$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c.Rd}(\mathbf{x})} \leq 1,0$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{b.Rd}(\mathbf{x})} \leq 1,0$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b.Rd}(\mathbf{x})} \leq 1,0$$

$$\frac{W_{sall}}{W_{max}(\mathbf{x})} \leq 1,0$$

$$\frac{F_{w.Ed}(\mathbf{x})}{F_{w.Rd}(\mathbf{x})} \leq 1,0$$

$$300 \leq h_w \leq 3300$$

$$6 \leq t_w \leq 100$$

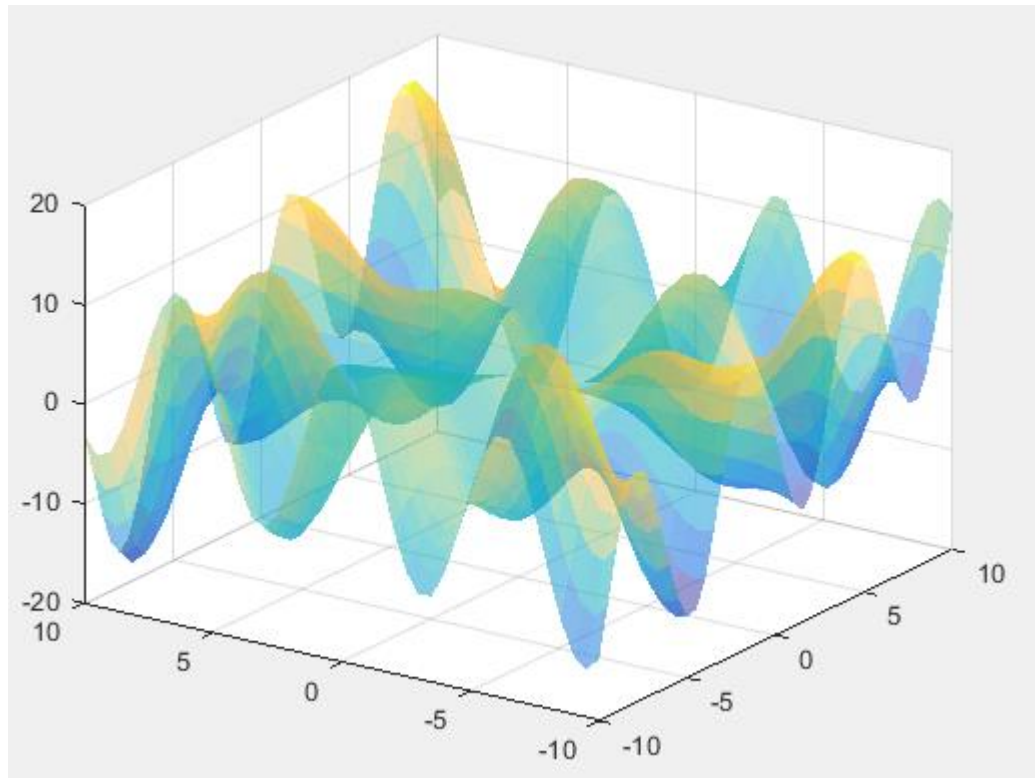
$$100 \leq b_f \leq 700$$

$$5 \leq t_f \leq 100$$

$$\mathbf{x} = [h_w, t_w, b_f, t_f]^T.$$

Optimointialgoritmin valinnassa on kiinnitettävä huomiota rajoitusehtojen jatkuvuuteen, suunnittelumuuttujien määrään sekä kohdefunktion muotoon. Mitä enemmän rajoitusehtoja on, sitä pienemmälle alueelle sallitut ratkaisut rajautuvat, kun taas mitä enemmän on suunnittelumuuttujia, sitä suurempi on muuttujien luoman ratkaisuavaruuden dimensio.

Suunnittelumuuttujien luoma ja rajoitusehtojen rajaama 4-ulotteinen avaruus lisää haastetta kohdefunktion globaalin minimiarvon löytämiseksi. Alla olevassa kuvassa on esitetty epäkonvekksi 3-ulotteinen funktion pinta, jonka lokaalit minimiarvot on esitetty tummansinisellä värillä. Moni lokaaleista minimeistä on arvoltaan lähes samanarvoisia, mikä vaikeuttaa teoreettisen globaalin minimin löytämistä.



Kuva 8. *Esimerkki 3-ulotteisesta pinnasta*

Optimointialgoritmiksi valitaan heuristiikkaan perustuva parveilualgoritmi, koska tehtävä on epälineaarinen ja epäkonvekksi. Gradienttipohjaisten menetelmien käyttö ei sovellu tämän tyyppisiin epälineaarisiin tehtäviin, joissa rajoitusehtojen sisällä on epäjatkuvuutta. Jos parveilualgoritmia ei haluta käyttää, yksi vaihtoehtoisista optimointialgoritmeista tehtävän ratkaisemiseksi on geneettinen algoritmi, joka perustuu evoluutioteoriaan.

3. PARVEILUALGORITMI

Parveilualgoritmi (Particle Swarm Optimization, PSO) on populaatiopohjainen heuristinen algoritmi, jonka sosiaalipsykologi James Kennedy ja sähköinsinööri Russel Eberhart esittivät vuonna 1995 [8]. Algoritmi pohjautuu analogiaan, jossa lintuparvi etsii maissia pellolta. Heuristisella algoritmilla tarkoitetaan sivistyneisiin arvauksiin perustuvaa ongelmanratkaisumenetelmää, jolla pyritään parempaan tulokseen, mutta jonka tuloksen ei voida osoittaa matemaattisesti olevan globaali optimi.

Parveilualgoritmissa luodaan joukko yksittäisiä ratkaisuja, partikkeleita, rajoitusehtojen rajaamaan avaruuteen, jossa jokaiselle partikkelille lasketaan kohdefunktion arvo nykyisessä sijainnissaan. Jokainen partikkeli koostuu kolmesta D -ulotteisesta vektorista, jossa D on etsintäavaruuden dimensio. Nämä kolme vektoria ovat nykyinen sijainti \vec{x}_i , paras sijainti \vec{p}_i ja nopeus \vec{v}_i . Jokaisella algoritmin iteraatiokierroksella uuden sijainnin koordinaateilla \vec{x}_i lasketaan kohdefunktion arvo. Jos kohdefunktion arvo on parempi kuin mikään ennestään löydetyistä, tallennetaan sijainnin \vec{x}_i koordinaatit vektoriin \vec{p}_i . Ennen koordinaattien sijoittamista vektoriin \vec{p}_i , partikkelin tämänhetkinen paras tulos tallennetaan muuttujaan $pbest_i$ seuraavia iteraatiokierroksia varten. Tarkoituksena on löytää parempia sijainteja ja päivittää vektoria \vec{p}_i ja muuttujaa $pbest_i$. Partikkeleiden uudet sijainnit määritetään seuraavasti:

$$\vec{v}_i \leftarrow \vec{v}_i + \vec{U}(0, \phi_1) \otimes (\vec{p}_i - \vec{x}_i) + \vec{U}(0, \phi_2) \otimes (\vec{p}_g - \vec{x}_i) \quad (67)$$

$$\vec{x}_i \leftarrow \vec{x}_i + \vec{v}_i \quad (68)$$

, missä $\vec{U}(0, \phi_i)$ kuvaa satunnaislukuvektoria, joka saa arvoja 0 ja ϕ_i väliltä, \vec{p}_g on parven löytämä paras ratkaisu ja \otimes on tekijöiden välinen kertomisoperaattori.

Parametrit ϕ_1 ja ϕ_2 määrittävät kuinka suuresti satunnaisuus vaikuttaa partikkelin ja parven löytämiin parhaisiin sijainteihin. Näitä parametreja kutsutaan kiihtyvyykskerroimiksi. Varhaisessa parveilualgoritmin tutkimuksessa näille kertoimille määritettiin arvot $\phi_1 = \phi_2 = 2,0$ [8], joita käytetään tässäkin työssä.

3.1 Rajoitusehtojen huomiointi ja optimoinnin lopettaminen

Optimointiparvi luodaan mittarajojen luomaan avaruuteen tasavälein. Jos partikkelin ratkaisu ei täytä kaikkia rajoitusehtoja, kyseisen partikkelin tulos hylätään. Parveilualgoritmin partikkelien nopeuden laskentaan on olemassa keinoja, jotka ottavat hylätyt tulokset huomioon, mutta tässä työssä niitä ei kuitenkaan käytetä.

Optimointi voi päättyä kolmella tavalla: iterointikierrokset suoritetaan loppuun, partikkelin paras arvo ei muutu iteraatiokierrosten välillä huomattavasti tai parhaiden partikkeleiden sijainnit eivät enää muutu. Tässä työssä suoritetaan 200 iteraatiokierrosta ja partikkeleiden optimisijaintien ja -arvojen muuttuessa kierrosten välillä enintään $1 * 10^{-6}$ yksikköä optimointi lopetetaan.

3.2 Algoritmin implementointi

Rajoitusehdot sekä optimointialgoritmi on implementoitu Python (ver. 3.6.) -ohjelmointikielelle. Jokainen optimointilaskenta on suoritettu 10 kertaa, koska heuristisessa menetelmässä ei aina löydetä funktion globaalia minimiarvoa.

Pythonissa parveilualgoritmi vaatii toimiakseen kohdefunktion, muuttujarajat, rajoitusehdot, optimoinnissa käytettävät vakiot sekä suoritettavien iteraatiokierrosten lukumäärän. Alla on esitetty, miten arvot syötetään pythonilla optimointialgoritmille. Muuttuja *xopt* on poikkileikkauksen optimimitat sisältävä vektori ja *fopt* on kohdefunktion optimiarvon sisältävä skalaarisuure.

```
# Optimointialgoritmin vaatimat argumentit
args = (yM0, yM1, yM2, qd, qk, L, E, fy, fu, tiheys)

# Muuttujarajat [bf, tf, hw, tw] [mm]
alaraja = [100, 5, 300, 6]
yläraja = [700, 100, 3300, 100]

# Iteraatioiden lukumäärä
iter = 200

# Optimointialgoritmin kutsu
xopt, fopt = pso(massa, alaraja, yläraja, f_ieqcons=rajoitusehdot,
                args=args, maxiter=iter)
```

Ohjelma 1. Parveilualgoritmin käyttö Pythonilla

Optimointiohjelmassa jokaiselle rajoitusehdolle on luotu funktio, joka laskee kyseisen rajoitusehdon käyttöasteen. Jokaisen rajoitusehdon käyttöaste tarkistetaan rajoitusehdot -funktiota kutsuttaessa. Rajoitusehdot -funktion tarkoituksena on tarkistaa kootusti, että kaikki käyttöasteet ovat alle 100 %. Alla on esitetty leikkauslommahduksen käyttöasteen laskenta optimointiohjelmalla.

Määritetään funktio, joka laskee ja palauttaa leikkauslommahduksen käyttöasteen poikkileikkauksen mittojen ja lähtötietojen avulla

```
def leikkauslommahdus(x, *args):

    # Poikkileikkauksen mitat
    bf, tf, hw, tw = x

    # Laskennassa käytettävät vakiot
    yM0, yM1, yM2, qd, qk, L, E, fy, fu, tiheys = args
    epsilon = sqrt(235 / fy)

    # Mitoituskuormat lasketaan funktion avulla
    Med, Ved = mitoituskuormat(qd, L)

    # Jäykisteiden välinen etäisyys a
    a = L

    # Teräksen lujuudesta riippuvan kertoimen määrittäminen
    if fy >= 460:
        n = 1
    else:
        n = 1.2

    # Uuman osuus Xw leikkauskestävyydestä
    lambdaw = hw / (86.4 * tw * epsilon)
    if lambdaw < 0.83 / n :
        Xw = n

    if lambdaw < 1.08 or lambdaw >= 0.83 / n :
        Xw = 0.83 / lambdaw

    else:
        Xw = 0.83 / lambda

    # Uuman leikkauslommahduskestävyyden laskenta
    VbwRd = Xw * fy * hw * tw / (sqrt(3) * yM1)

    # Laippojen osuus leikkauskestävyydestä
    c = a * (0.25 + (1.6 * bf * tf**2 * fy) / (tw * hw**2 * fy))
    VbFRd = bf * tf**2 * fy / (c * yM1)

    # Poikkileikkauksen leikkauslommahduskestävyyden laskenta
    VbRd = min(VbwRd + VbFRd, n * fy * hw * tw / (sqrt(3) * yM1))

    # Funktio laskee ja palauttaa leikkauslommahduksen käyttöasteen
    käyttöaste = abs((Ved / VbRd)) * 100
    return käyttöaste
```

Ohjelma 2. Leikkauslommahduskestävyyden laskenta

4. TULOKSET

Tässä luvussa käydään läpi optimointiohjelmalla saadut tulokset. Kussakin tapauksessa vain tarkasteltavan tekijän arvo muuttuu ja muut lähtötiedot pysyvät muuttumattomina. Lähtötiedot on kerätty alla olevaan taulukkoon.

Taulukko 5. Optimoinnin lähtötiedot

Palkin pituus, L [mm]	6000
Teräksen myötölujuus, f_y [MPa]	355
Mitoituskuorma, q_d [kN/m]	39,15

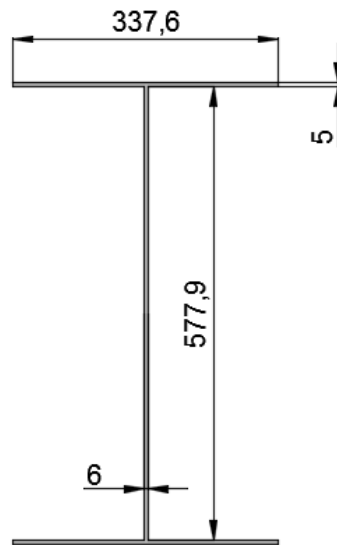
Poikkileikkausten välisessä vertailussa mitat on pyöristetty yhden desimaalin tarkkuuteen, mutta palkin pituuden ja teräksen lujuuden vaikutusten tarkasteluissa on käytetty absoluuttisia arvoja.

4.1 Optimointitehtävän ratkaisu

Luvussa 2 esitetyn tehtävän optimaalinen ratkaisu on palkki, jonka massa on 322,3 kg. Optimaalisen poikkileikkauksen laipat kuuluvat poikkileikkausluokkaan 4 ja uuma poikkileikkausluokkaan 3. Poikkileikkauksen mitat, palkin massa ja käyttöasteet on esitetty kuvassa 9. On hyvä huomata, että palkin uuman sekä laippojen paksuudet ovat mittarajojen alareunassa. Jos konepajalla pystyttäisiin hitsaamaan ohuempia levyjä, voitaisiin optimoimalla saada vieläkin kevyempi palkki.

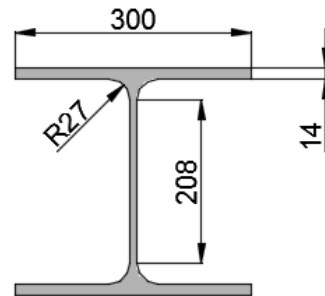
Vakioprofiileilla laskettuna tehtävän optimaaliseksi ratkaisuksi tulee profiili HEA300. Tämän vakioprofiilipalkin massa on 529,8 kg, joka on yli 64 % enemmän kuin optimoinnilla saadun hitsatun palkin massa. HEA -profiilin mitoituksessa ei tarvitse tarkastella leikkauslommahdusta, koska kyseinen profiili ei täytä kaavan 35 ehtoa.

Laipan PL: 4
 Uuman PL: 3
 Massa: 322.3 kg



Kiepahdus: 100.0 %
 Taipuma: 73.44 %
 Taivutus: 64.5 %
 Lommahdus: 27.16 %
 Leikkaus: 13.77 %

HEA300
 Massa: 529.8 kg



Kiepahdus: 64.71 %
 Taipuma: 90.93 %
 Taivutus: 35.88 %
 Leikkaus: 24.43 %

Kuva 9. Optimoitujen profiilien massat, mitat ja käyttöasteet

4.2 Poikkileikkausluokan vaikutus palkin massaan

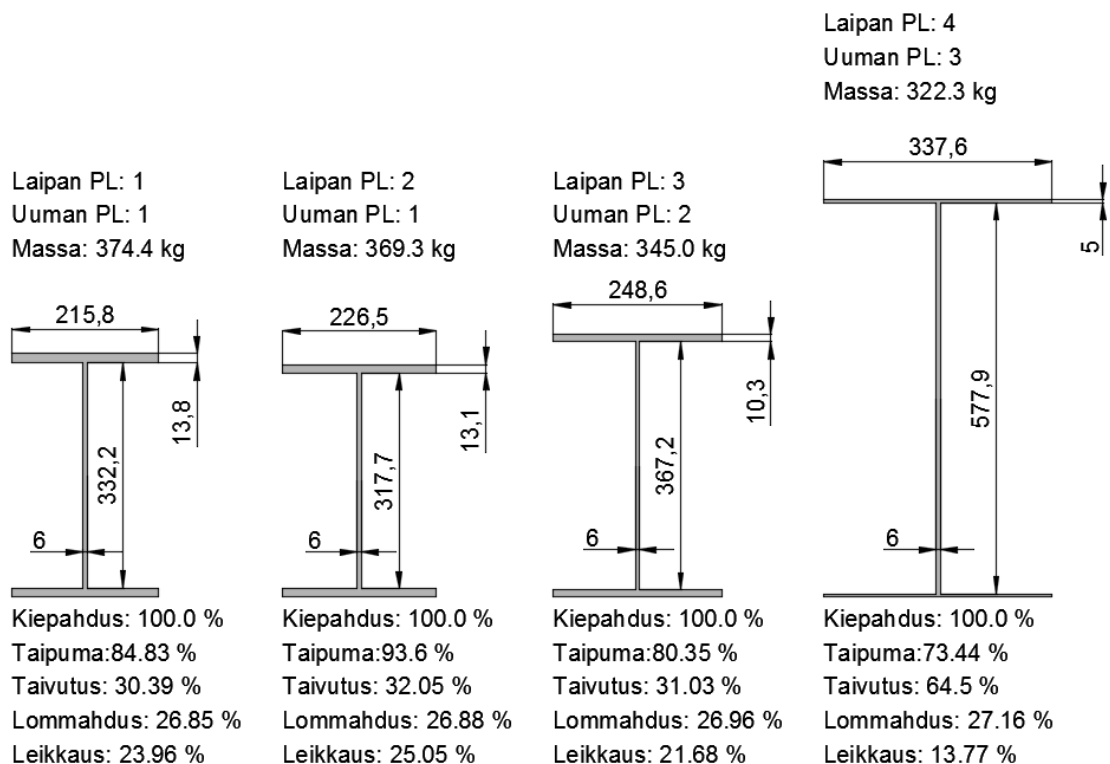
Tässä luvussa poikkileikkaukset on pakotettu kuulumaan samaan tai alempaan poikkileikkausluokkaan. Esimerkiksi rajattaessa optimointi poikkileikkausluokkaan 3, voi optimoitu laippa tai uuma kuulua poikkileikkausluokkiin 1-3.

Jokaisessa poikkileikkausluokassa rajoittavaksi tekijäksi muodostuu kiepahdus. Poikkileikkausten mitat, massat ja käyttöasteet on esitetty kuvassa 10. Alla olevassa taulukossa on vertailtu eri poikkileikkausten massaa poikkileikkausluokan 1 palkkiin. Kuten taulukosta 6 nähdään, poikkileikkausluokkaan 4 kuuluvan palkin massa on 14 % pienempi kuin poikkileikkausluokan 1.

Taulukko 6. Poikkileikkausten suhteellinen vertailu

PL	Massa [kg]	m_{rel} [%]	Erotus [kg]
1	374,4	100 %	0
2	369,3	99 %	5,1
3	345	92 %	29,4
4	322,3	86 %	52,1

Tuloksista voidaan päätellä, että palkki kannattaa tukea kiepahdusta vastaan. Tällöin laippojen leveyttä voidaan pienentää huomattavasti, koska laippojen leveydellä on vaikutusta kiepahduskestävyyden lisäksi vain taivutus- ja leikkauslommahduskestävyyteen, joiden käyttöasteet ovat todella alhaiset. Laippojen leveydet tulee kuitenkin valita siten, että palkki pystytään hitsaamaan ja palkki ei aiheuta välipohjan betonilaattaan liian suurta paikallista jännitystä.

**Kuva 10.** Optimipoikkileikkausten mitat ja käyttöasteet

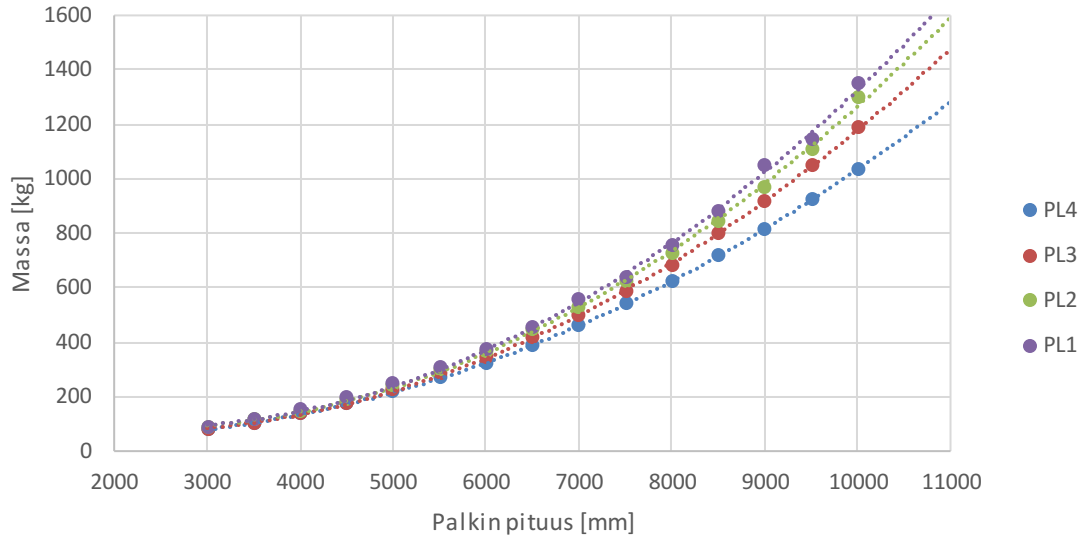
4.3 Palkin pituuden vaikutus palkin massa

Palkin massa optimoidaan 500 mm välein 3 m:stä 10 m:iin. Tuloksista huomataan, että mitä pidempi palkin jänneväli on, sitä suurempi ero on poikkileikkausluokan 1 ja 4 palkkien massojen välillä. Kuvassa 10 on esitetty palkin pituuden vaikutus palkin massaan jokaisessa poikkileikkausluokassa. Poikkileikkausluokkien 2, 3 ja 4 palkkien massa verrattuna poikkileikkausluokkaan 1 on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Poikkileikkausten massa verrattuna PL1:n massa

	PL		
	2	3	4
L [mm]	m _{rel} [%]	m _{rel} [%]	m _{rel} [%]
3000	98 %	93 %	94 %
4000	94 %	88 %	87 %
5000	98 %	92 %	90 %
6000	98 %	92 %	86 %
7000	95 %	89 %	82 %
8000	97 %	91 %	83 %
9000	92 %	88 %	78 %
10000	96 %	88 %	77 %
KA	97 %	91 %	85 %

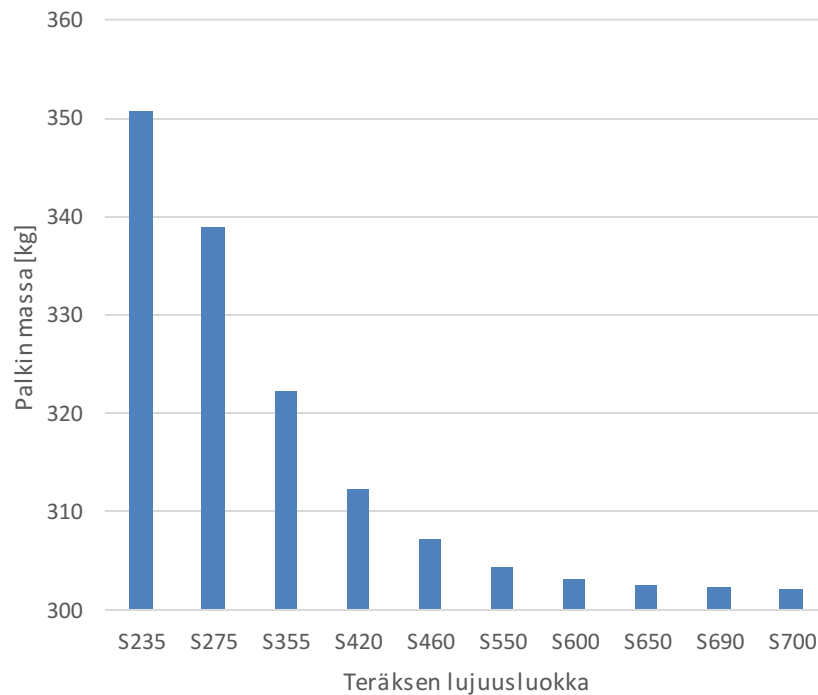
Suurilla jänneväleillä mitoittavaksi tekijäksi tulee kiepahduksen lisäksi taipuma, jolloin uuman korkeutta on kasvatettava, jotta poikkileikkaukselle saadaan tarpeeksi suuri taivutusvastus y-akselin suhteen. Kun poikkileikkaus on pakotettu luokkiin 1-3, kasvaa uuman paksuus samassa suhteessa uuman korkeuteen nähden, jolloin palkin massa kasvaa nopeammin verrattuna poikkileikkausluokan 4 palkkiin. Poikkileikkausluokilla 1-3 taipuma alkaa rajoittaa poikkileikkauksen kestävyyttä 8 m:n kohdalla, kun taas poikkileikkausluokalla 4 taipuma ei rajoita kestävyyttä tämän luvun tarkasteluvälillä.



Kuva 11. Palkin pituuden vaikutus palkin massaan

4.4 Teräksen lujuuden vaikutus palkin massaan

Kevein palkki saadaan käyttämällä korkealujuusterästä S700, jolloin kannatinpalkki on 6,5 % kevyempi verrattuna teräslaatuun S355. Teräslujuuksien vaikutus palkin massaan on esitetty kuvassa 11. Poikkileikkauksen kiepahduskestävyyteen ja taipumaan vaikuttaa teräksen myötölujuuden lisäksi tehollinen taivutusvastus sekä tehollinen neliömomenti.



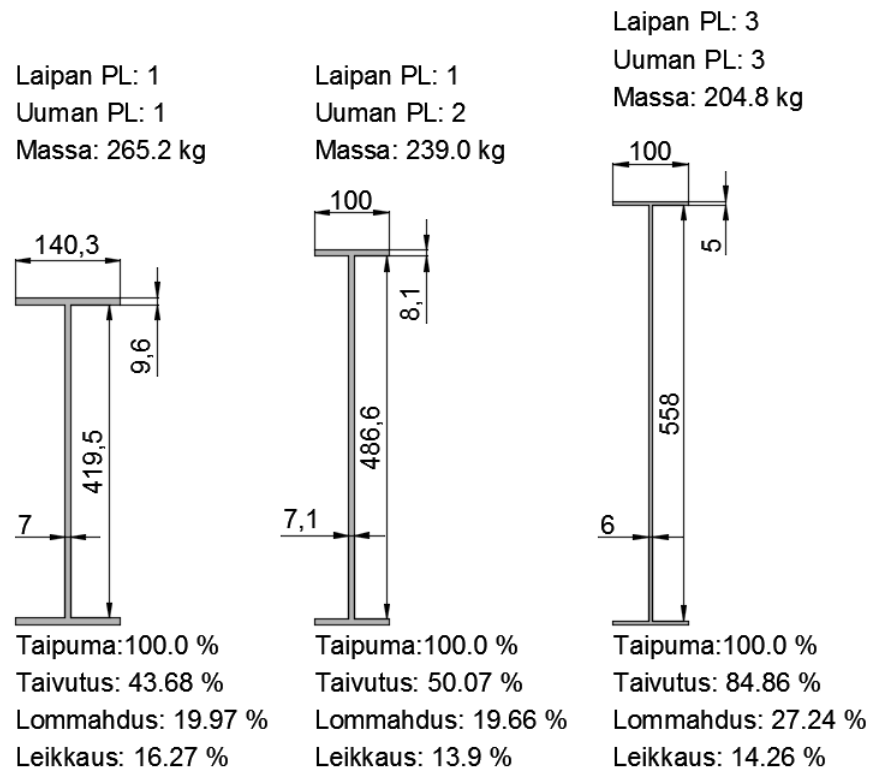
Kuva 12. Teräksen lujuuden vaikutus palkin massaan

Teräksen lujuuden kasvattaminen pienentää poikkileikkausluokittelussa käytettävää ε -kerrointa, jonka seurauksena poikkileikkauksen puristetut taso-osat kuuluvat herkemmin poikkileikkausluokkaan 4. Tämän seurauksena osa pinta-alasta on tehoton ja poikkileikkauksen mittoja joudutaan suurentamaan, jotta kaikki rajoitusehdot täyttyisivät.

Suurilla jänneväleillä palkin mitoittava tekijä on kiepahduksen lisäksi taipuma, jolloin teräksen lujuutta kasvattamalla ei voida enää pienentää palkin massaa. Taipuman arvoon ei vaikuta teräksen lujuus, vaan poikkileikkauksen tehollinen neliömomentti. Tehollista alaa laskettaessa kaavan 18 mukaan, mitä suurempi teräksen lujuus on, sitä suurempi on taso-osien muunneltu hoikkuus, jonka seurauksena tehottoman alueen korkeus on suurempi. Tämän takia lujuuden kasvattaminen ei aina pienennä palkin massaa.

4.5 Kiepahdustuennan vaikutus palkin massa

Kun palkki tuetaan kiepahdusta vastaan, tulee mitoittavaksi tekijäksi taipuma. Kiepahdustuetun palkin massa on yli 35 % pienempi kuin optimaalisen, tukemattoman palkin massa. Tuetun palkin poikkileikkausten optimitulokset on esitetty kuvassa 13.

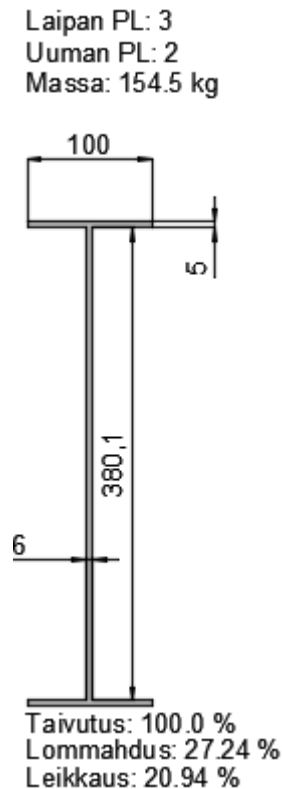


Kuva 13. Poikkileikkausten optimitulokset, kun palkki on tuettu kiepahdusta vastaan

Vaikka poikkileikkausluokkia ei rajata, kuuluu optimaalisin tulos poikkileikkausluokkaan 3. Tuloksista huomataan, että poikkileikkausluokissa 2 ja 3 laipan leveys on mitta-ajan alareunassa. Optimituloksessa laipan leveyden lisäksi, myös laippojen sekä uuman paksuudet ovat mittarajojen alareunassa. Tämän takia optimitulos ei kuulu poikkileikkausluokkaan 4.

4.5.1 Palkki tuettu kiepahdusta vastaan ja taipumaa ei rajoitettu

Kun palkin taipumaa ei rajoiteta ja palkki on tuettu kiepahdusta vastaan, rajoittavaksi tekijäksi tulee taivutusjännitys. Optimoidun palkin massa on nyt 24 % pienempi kuin pelkästään kiepahdustuetun palkin massa ja 52 % pienempi kuin tukemattoman ja taipumarajoitetun palkin massa. Kuvassa 14 on esitetty optimoidun poikkileikkauksen mitat.



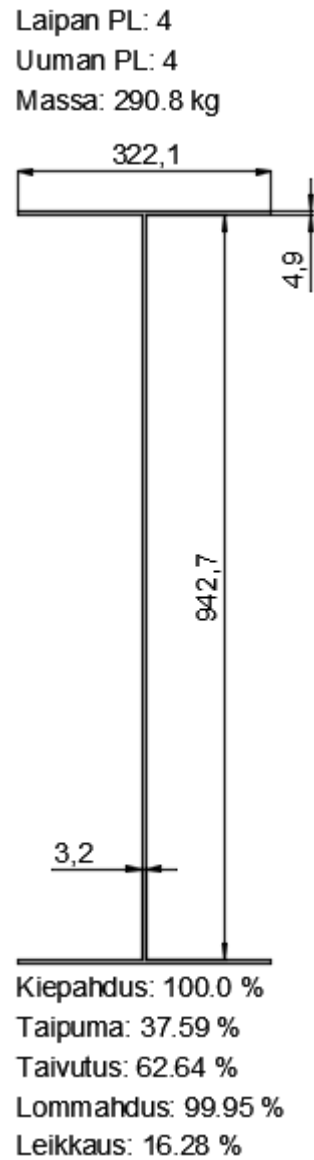
Kuva 14. Poikkileikkauksen optimimitat, kun palkin taipumaa ei ole rajoitettu ja palkki on tuettu kiepahdusta vastaan

Kuvaa 13 ja kuvaa 14 vertaamalla huomataan, että optimitulosten erona on ainoastaan uuman korkeus ja molemmissa tapauksissa poikkileikkausten muut mitat ovat mittarajojen alareunassa. Uuman korkeudella on suuri vaikutus neliömomentin laskentaan, jonka avulla lasketaan taipuman sekä taivutusjännityksen käyttöasteet. Kun poikkileikkauksen mitoittava tekijä on taivutusjännitys, voidaan palkin massaa pienentää kasvattamalla teräksen lujuutta.

4.6 Muuttujarajojen poiston vaikutus palkin massa

Tämän luvun optimiratkaisussa poikkileikkauksen mitat voivat saada mitä tahansa positiivisia arvoja. Tulosten laskennassa ei oteta huomioon palkkiin liittyviä rakenteita eikä profiilin hitsattavuutta.

Kuvassa 13 on esitetty luvun 2 mukaisen optimointitehtävän teoreettinen optimiratkaisu. Kiepahduksen lisäksi, poikkileikkauksen kestävyyttä rajoittaa nyt myös leikkauslommahdus, jonka seurauksena uumaa ei voi enää kaventaa. Jos konepajalla pystyttäisiin hitsaamaan kyseinen palkki, saataisiin kannatinpalkkia kevennettyä lähes 10 % verrattuna luvun 4.1 optimiratkaisuun.



Kuva 15. Teoreettinen optimaalisin poikkileikkaus

5. YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli tutustua teräspalkin mitoittamiseen poikkileikkausluokassa 4 sekä kantavien rakenteiden optimointiin. Optimoitavana rakenteena toimi yksiaukkoinen niveltuettu teräspalkki, jota kuormitti yläpuoliselta rakenteelta tuleva tasainen kuorma. Tavoitteena oli saada vastaukset seuraaviin kysymyksiin:

- Voidaanko optimoimalla säästää materiaalikustannuksissa?
- Miten palkin poikkileikkausluokka vaikuttaa palkin massaan?
- Millainen vaikutus jännevälin kasvattamisella on palkin massaan?
- Voidaanko teräksen lujutta kasvattamalla pienentää palkin massaa?
- Millaisia materiaalisäästöjä saadaan aikaan, kun palkki tuetaan kiepahdusta vastaan?
- Miten muuttujarajat vaikuttavat palkin massaan?

Tulokset laskettiin Python (ver. 3.6.) -ohjelmointikielellä kirjoitetulla ohjelmalla, jossa optimointialgoritmina käytettiin parveilualgoritmia. Heuristiikkaan pohjautuvalla parveilualgoritmillä ei koskaan saavuteta teoreettista optimiarvoa ja algoritmilla saaduissa tuloksissa on hajontaa. Tämän takia optimointi suoritettiin jokaiselle tarkasteltavalle tapaukselle 10 kertaa, jotta tulokset olisivat mahdollisimman optimaalisia. Taulukossa 8 on esitetty eri tarkastelutapausten tulokset kootusti ja massoja on verrattu luvussa 2 esitetyn tehtävän optimiratkaisuun.

Taulukko 8. Tulokset kootusti

	m_{rel} [%]	m [kg]
Optimipoikkileikkaus PL 4	100 %	322,3
Optimipoikkileikkaus PL 3	107 %	345,0
Optimipoikkileikkaus PL 2	115 %	369,3
Optimipoikkileikkaus PL 1	116 %	374,4
Vakioprofiili HEA300	164 %	529,8
Teräslaatu S700	94 %	302,2
Palkki tuettu kiepahdusta vastaan	64 %	204,8
Palkki on kiepahdustuettu ja taipumaa ei ole rajoitettu	48 %	154,5
Ei muuttujarajoja	90 %	290,8

Jokaisessa poikkileikkausluokassa mitoittavaksi tekijäksi tuli kiepahdus, jolloin palkin massaa voidaan pienentää kasvattamalla teräslujuutta. Tukemalla palkki kiepahdusta vastaan saadaan palkki 36 % kevyemmäksi kuin kiepahdustukematon palkki. Kiepahdustuetun palkin mitoittava tekijä on taipuma, jolloin palkin massaa ei voida enää pienentää teräksen lujuuksi kasvattamalla.

Kun palkin jänneväliä kasvatetaan, tulee kiepahduksen lisäksi taipuma mitoittamaan poikkileikkauksen kestävyyttä. Tämä näkyy tangentin kulmakertoimen suuruuden muutoksena jänneväli – massa -kuvaajassa. Tämän työn tarkasteluvälillä poikkileikkausluokan 4 palkilla taipuma ei ole mitoittava tekijä, jonka seurauksena poikkileikkausluokien 1 ja 4 välinen massojen suhteellinen ero kasvaa jännevälin kasvaessa. Jännevälin ollessa 10 m poikkileikkausluokan 4 palkki on yli 20 % kevyempi kuin poikkileikkausluokan 1 palkki.

Palkin massaa olisi mahdollista keventää lisää tekemällä akselin suuntaisia reikiä palkin uumaan sekä optimoimalla laipan ja uuman teräslaadut erikseen, jolloin kyseessä olisi nk. hybridipalkki. Tässä työssä tarkasteltiin vain homogeenisen, kaksoissymmetrisen I-palkin massan minimointia, mutta on mahdollista, että kevein palkkiratkaisu saataisiin jollain muulla poikkileikkauksen muodolla tai ristikkorakenteena.

Tuloksista huomataan, että poikkileikkausluokalla, teräslaadulla ja erilaisilla tuennoilla on suuri vaikutus palkin massaun. Vakioprofiiliin HEA300 verrattuna, optimoidulla I-profiililla saadaan aikaan huomattavia materiaalisäästöjä. On kuitenkin hyvä muistaa, että materiaalikustannukset eivät ole suoraan verrannollisia palkin kokonaiskustannusten kanssa [7].

LÄHTEET

- [1] Betoniteollisuus, Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan: Osa 8: Taipuma, 2011
- [2] SFS-EN 1990, Eurokoodi: Rakenteiden suunnitteluperusteet. Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2003
- [3] SFS-EN 1991, Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Yleiset kuormat, Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2002.
- [4] SFS-EN 1993-1-1, Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2005.
- [5] SFS-EN 1993-1-5, Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-5: Levyrakenteet, Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2006.
- [6] SFS-EN 1993-1-8, Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitus, Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2005.
- [7] Mäkinen P. 2006. Korkealujuus- ja palonkestävien terästen käyttö talonrakentamisessa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikka. 132 s.
- [8] Poli, R., Kennedy, J. & Blackwell, T. Swarm Intell, 2007, pp.33-57.
- [9] Ruukki, Hitsatut profiilit EN 1993 -käsikirja, 2010
- [10] Ympäristöministeriö, Suomen rakentamismääräyskokoelma: Rakenteiden lujuus ja vakaus: Teräsrakenteet, 2016