

Teräsrakenteiden T&K-päivät
Teräsrakenneyhdistys ry

Hitsatun I- ja kotelopalkin optimointi ja FE-mallinnus

Sisältö	Sivu
1 Johdanto	1
2 Tarkasteltavat tapaukset	2
3 Palkkien kestävyyslaskenta	3
4 Optimointi	3
5 FE-mallinnus	3
6 Tulokset	4
7 Johtopäätökset	6
8 Lähdeluettelo	7

1 Johdanto

Hitsattujen teräsprofiilien käyttö rakenteissa antaa suunnittelijalle hyvät mahdollisuudet valita tietyn kokoinen profiili kuhunkin käyttökohteeseen. Käytännössä ainakin poikkileikkauksen minimi- ja maksimiulkomitat, suositeltavat levykoot, valmistussarjat ja liitosten vaatimukset rajoittavat profiilin valintaa. Silti kuhunkin käyttökohteeseen sopivien profiilien lukumäärä saattaa olla niin suuri, että pelkän kokemuksen tai yksinkertaistettujen kaavojen perusteella keveimmän profiilin valinta ei usein onnistu. On hyvä muistaa, että profiilin korkea käyttöaste ei ole riittävä ehto optimaaliselle (kevein, halvin, jäykin) profiilille.

Kantavien rakenteiden optimoinnilla tarkoitetaan hyvien lujuusopillisten rakennevaihtoehtojen systemaattista hakua optimoinnin tarjoamia keinoja hyväksikäyttäen. Tavoitteena on löytää sellaisia ratkaisuja, jotka perinteisellä suunnittelijan kokemukseen ja intuition perustuvalla menetelmällä olisivat muuten jääneet löytymättä. Erilaisten numeeristen ratkaisumenetelmien lisäksi on sovellusten kannalta ensiarvoisen tärkeää osata muodostaa optimointimalli järkevästi. Hitsatut teräsprofiilit sopivat hyvin optimoinnin kohteeksi.

Epälineaarista elementtimenetelmää (suuret siirtymät, epälineaarinen materiaalmalli ja mahdollisesti kontakti) voidaan käyttää lopullisen teräsprofiilin todellisen kantokyvyn selvittämiseen teräsrakennenormin lähtökohdista. Tarkasteluissa on mahdollista ottaa huomioon tarkka geometria ja todelliset materiaaliominaisuudet, jolloin saadaan tarkempia tuloksia kuin normien yleiskäyttöisemmällä menetelmällä. Tarkemmat laskentamenetelmät varmistavat, että optimoidun teräsprofiilin kantokyky on edelleen riittävä ja rakenne turvallinen käyttää.

Tämä artikkeli on tavallaan jatkoa edellisille vuoden 2010 Tampereella pidettyjen Teräsrakenteiden T&K-päivien artikkeleille [Jalkanen, 2010] ja [Laine et al, 2010].

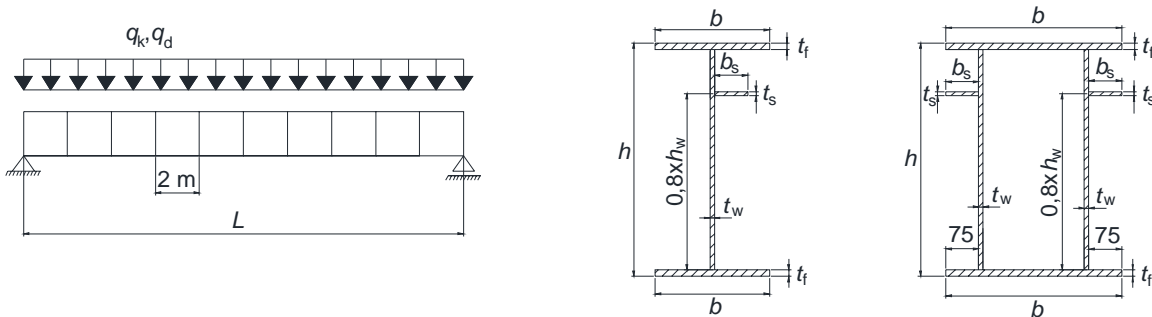
2 Tarkastellut tapaukset

Tässä tarkastelussa käsitellään Kuvan 1 mukaisia hitsattua I- (WI) ja kotelo profiilia (WB). Molemmissa tapauksissa optimoitavien palkkien lujuusluokkaa, pituutta, kuormitusta ja taipumarajaa muutetaan Taulukon 1 mukaisesti. Lähteessä [Parra et al, 2012] on esitetty Münchenin teknillisessä yliopistossa tehdyn tutkimuksen tulokset kotelopoikkileikkauksen optimoinnista. Tämän tarkastelun tapaus WB-0 on valittu samanlaiseksi tulosten vertailemiseksi. Tapaus WI-0 on vastaava kuin WB-0, mutta siinä optimointi tehdään I-profiilille. Tarkastellut profiilit ovat mitoiltaan esimerkiksi kattilalaitoksissa tyypillisesti esiintyviä palkkeja, jotka tosin ovat ilman jäykisteitä.

Kaikissa tapauksissa tutkitaan tasaisesti kuormitettua, nivelellisesti tuettua palkkia. Palkki on poikkileikkaukseltaan kaksoisyyppinen lukuun ottamatta jäykisteitä. Poikittaisjäykisteitä palkissa on kahden metrin välein. Jäykisteiden paksuus lasketaan lähteessä [Rautaruukki Oyj, 2010] esitetyllä likimääräisellä kaavalla siten, että ne täyttävät jäykälle poikittaisjäykisteelle asetetut vaatimukset. Pituussuuntaisen jäykisteen korkeusasemaksi on valittu 80 % uuman korkeudesta. Tapauksissa WB-0 ja WI-0 kiepahdus ei ole potentiaalinen murtumismuoto. Kaikissa muissa tapauksissa palkkien ylälaippojen on ajateltu olevan tuettu sivusuunnassa 2 m:n välein.

Tässä tutkimuksessa optimiratkaisu tarkoittaa poikkileikkausta, jolla on pienin poikkipinta-ala, A . Kirjoittajien tiedossa on, että kevein teräsrakenne ei välttämättä tarkoita edullisinta mahdollista. Jatkossa tarkoitus onkin optimoida palkin kustannuksia painon sijaan. Teräsrakenteiden kustannusfunktioita löytyy esim. lähteistä: [Farkas, Jarmai, 2008] ja [Haapio, 2012].

Tapauksissa WI-0 ja WB-0 optimoinnin tulokset verifioitiin FE-laskennalla. Lisäksi palkille WB-0 määritettiin palkin kriittinen lämpötila ja verrattiin sitä standardin [SFS-EN 1993-1-2, 2005] ja sen kansallisen liitteen [Ympäristöministeriö, 2007] antamaan tulokseen.



Kuva 1. Tarkasteltavien palkkien rakennemalli ja poikkileikkaukset.

Taulukko 1. Tarkasteltavat tapaukset.

Tapaus	Teräs	L [m]	q_k [kN/m]	q_d [kN/m]	Taipumaraja	Ylälaipan tuentaväli [m]
WB-0	S235	20	73,5	73,5	-, $L/800$	jatkuva
WI-0	S235	20	-	73,5	-	jatkuva
WB-1	S355	10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24	52,5	73,5	$L/300$	2
WB-2	S355	12, 16, 20, 24	105	147	$L/300$	2
WB-3	S355	12, 16	105	147	$L/500$	2
WI-1	S355	12, 16, 20, 24	52,5	73,5	$L/300$	2
WI-2	S355	12, 16	105	147	$L/500$	2

Suunnittelumuuttujina tehtävissä olivat poikkileikkauksen ulkomitat (b , h), uuman ja laipan paksuudet (t_w , t_f) sekä jäykisteiden koko (b_s , t_s). Suunnittelumuuttujat olivat diskreettejä ja saivat vaihdella Taulukon 2 osoittamissa rajoissa. Tapauksissa WB-0 ja WI-0 poikkileikkauksen leveys ja korkeus vaihtelivat 50 mm välein. Koska käytössä on vain tiettyjä arvoja kullekin suunnittelumuuttujalle, on optimointiongelmalla jokin tietty rajallinen määrä kandidaattiratkaisuita. Enimmillään optimiratkaisua etsittiin n. 37 miljoonan palkin joukosta. Näiden kaikkien läpikäynti eli ns. totaalinen enumeraatio ei ole enää suuressa optimointitehtävässä järkevää.

Taulukko 2. Suunnittelumuuttujat ja niille optimoinnissa sallitut arvot.

Muuttuja	Kuvaus	Käyvät arvot	Vaihtoehtojen lkm
b	Poikkileikkauksen leveys [mm]	200, 210, ..., 990, 1000	81
h	Poikkileikkauksen korkeus [mm]	400, 410, ..., 2990, 3000	261
t_w	Uuman paksuus [mm]	6, 8, 10, 12, 15, 20, 25	7
t_f	Laipan paksuus [mm]	12, 15, 20, 25, 30, 35, 40	7
b_s	Jäykisteen leveys [mm]	20, 30, 40, 50, 60, 70	6
t_s	Jäykisteen paksuus [mm]	5, 6, 8, 10, 12, 15	6
			37 292 724

3 Palkkien kestävyyslaskenta

Palkkien kestävyys laskettiin taulukkolaskennalla eurokoodien [SFS-EN 1993-1-1, 2005] ja [SFS-EN 1993-1-5, 2006] mukaisesti. Laskentapohjan toimivuus tarkastettiin vertaamalla tuloksia lähteen [Rautaruukki, 2010] esimerkkeihin. Laskennassa tarkastettiin profiilin leikkaus-, leikkauslommahdus-, taivutusmomentti- ja kiepahduskestävyys sekä taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutus. Lisäksi laskettiin palkin taipuma. Edellä mainittujen kohtien lisäksi käyvältä ratkaisulta vaadittiin myös, että ylälaippa ja jäykiste eivät kuuluneet poikkileikkausluokka 4:n ja että jäykiste ei voi vääntönurjautaa.

4 Optimointi

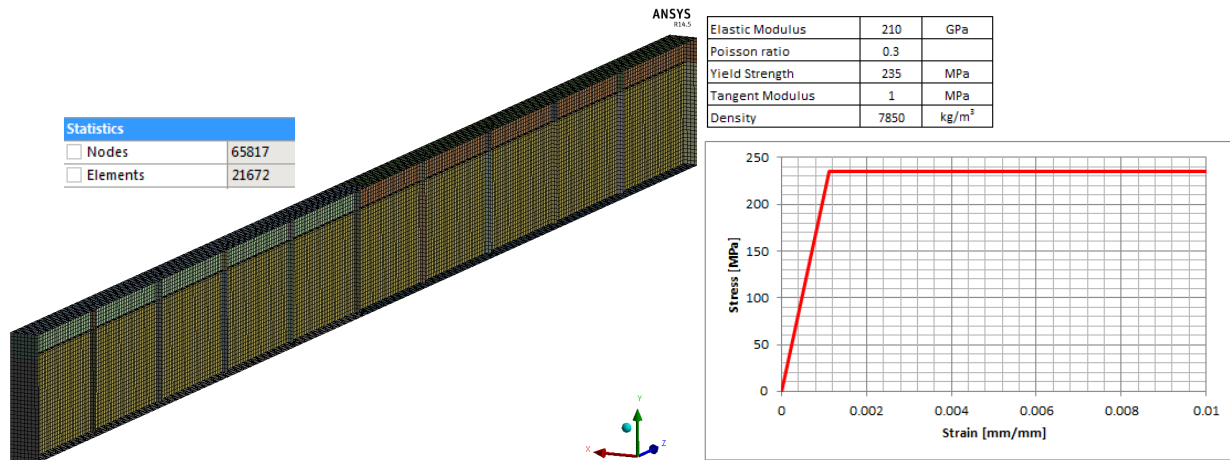
Teräsprofiilin optimointiongelman ratkaisualgoritmi on valittu populaatiopohjainen parveilualgoritmi (particle swarm optimization, PSO). Parveilualgoritmi on perusidealtaan suhteellisen yksinkertainen ja melko tuore heuristinen optimointimenetelmä. Se sopii hyvin varsinkin diskreettejä suunnittelumuuttujia sisältävien laskennallisesti työläiden optimointiongelmiin likimääräiseen ratkaisemiseen. Vaikka PSO ei pystykään takaamaan globaalin optimin löytymistä, päädytään usein hyviin ratkaisuihin, jotka ovat selvästi parempia kuin mitä parhaat siihen mennessä tiedetyt ovat olleet.

Teräsprofiilien optimointiongelmat on ratkaistu 5-10 kertaa peräjälkeen parveilualgoritmillä käyttäen kussakin optimointiajossa 30 yksilön kokoista parvea ja 100 iteraatiokierrosta. Koska PSO on stokastinen optimointialgoritmi, yksi optimointiajo ongelmaa kohden ei riitä. Alkuperäiset arvot ja rajoitusehdot käsitellään sakottamalla.

5 FE-mallinnus

Palkit WB-0 ja WI-0 mallinnettiin ANSYS Mechanical V.14.5 - ohjelmalla käyttäen kvadraattisia kuorielementtejä. Kuvassa 2 on esitetty palkin WI-0 verkotus ja materiaalimalli normaalilämpötilassa. Palotilanteessa käytettiin eurokoodin [SFS-EN 1993-1-2, 2005] mukaista epälineaarista materiaalimallia. Geometrisenä alkuhäiriönä käytettiin suurta määrää lokaaleja ja

globaaleja lommahdusmuotoja siten, että siirtymän maksimiampplitudi olivat eurokoodin [SFS-EN 1993-1-5, 2005] mukaiset (= n. 7 mm levykentissä).



Kuva 2. Palkin WI-0 verkotus ja materiaalimalli.

6 Tulokset

6.1 Tapaus WB-0

Optimointialgoritmia ja kestävyuden laskentaa testattiin tapauksessa WB-0 (kts. Taulukko 1). Lähteessä [Parra et al, 2012] optimointi suoritettiin myös palkille, jossa ei ollut jäykistettä sekä palkille, jonka taipumaraja oli $L/800$. Vertailu näihin tuloksiin on esitetty Taulukoissa 3-5. Taulukoiden viimeisessä sarakkeessa oleva käyttöaste tarkoittaa tässä tutkimuksessa käytetyllä pohjalla laskettua arvoa.

Taulukko 3. Optimoitujen palkkien WB-0 vertailu (ei jäykistettä, ei taipumarajaa).

	h [mm]	b [mm]	t_w [mm]	t_f [mm]	A [mm ²]	Käyttöaste
Parra et al, 2012	1166	470	9	22	40 876	1,01
Tämä tutkimus	1450	400	6	25	36 800	0,99

Tulosten vertailemiseksi tapauksissa WB-0 ja WI-0 käytettiin samaa jäykistettä (5 mm x 45 mm) kuin lähteessä [Parra et al, 2012].

Taulukko 4. Optimoitujen palkkien WB-0 vertailu (jäykiste 5 x 45, ei taipumarajaa).

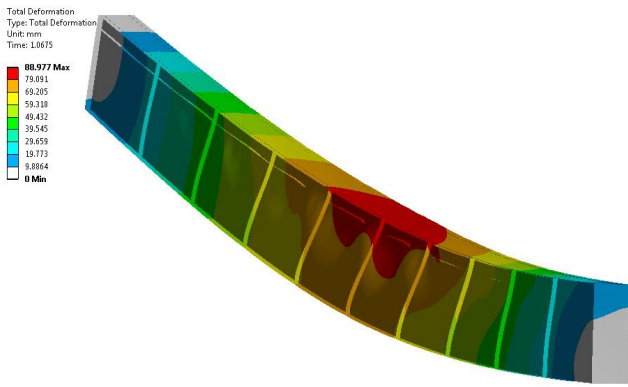
	h [mm]	b [mm]	t_w [mm]	t_f [mm]	A [mm ²]	Käyttöaste
Parra et al, 2012	1628	427	7	16	36 458	1,00
Tämä tutkimus	1500	350	6	25	35 350	0,99

Taulukko 5. Optimoitujen palkkien WB-0 vertailu (jäykiste 5 x 45, taipumaraja $L/800$).

	h [mm]	b [mm]	t_w [mm]	t_f [mm]	A [mm ²]	Käyttöaste
Parra et al, 2012	1981	576	9	17	55 278	1,02*
Tämä tutkimus	1950	300	10	35	59 248	0,99

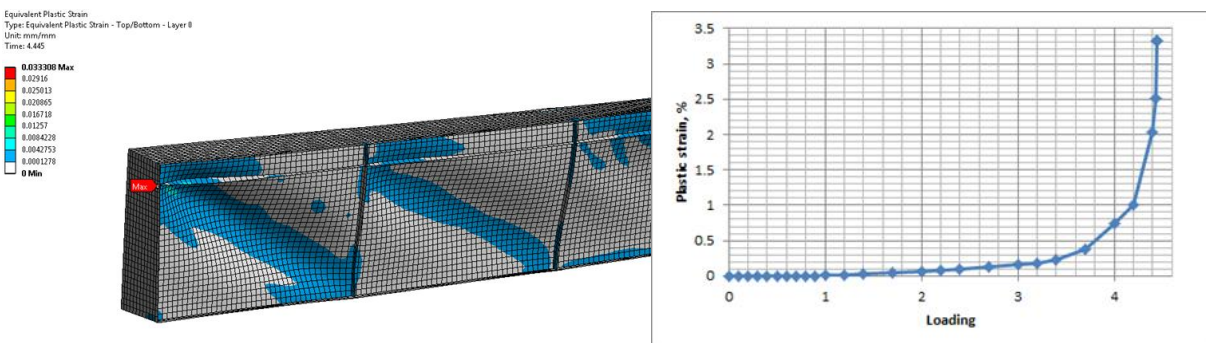
*Puristetun levykentän lopullista pienennystekijää olisi täytynyt pienentää vielä -> käyttöaste kasvaisi tällöin hieman.

Kuvassa 3 esitetään FE-laskennasta saadut palkin WB-0 (tässä tutkimuksessa optimoitu) siirtymät kuormituksen funktiona ja lopputilanteessa. FE-laskennan mukaan palkki kesti kuormitusta n. 7 % enemmän kuin laskentapohjasta saatiin tulokseksi.



Kuva 3. Palkin WB-0 siirtymät FE-laskennasta.

Palkille WB-0 määritettiin FE-laskennalla myös kriittinen lämpötila. Palotilanteen kuormana käytettiin 65 % normaalilämpötilan kuormasta. Kuvassa 4 on esitetty uuman vetokentät palotilanteessa (vasemmalla) sekä plastisten venymien kehittyminen palkin lämpötilan funktiona (oikealla). Yksi loading stepin yksikkö vastaa 100 astetta. Palkki WB-0 menetti kantokykynsä lämpötilassa 445 °C. Eurokoodin [SFS-EN 1993-1-2, 2005] mukainen kriittinen lämpötila on n. 400 °C.



Kuva 4. Palkin WB-0 uuman vetokentät ja plastiset venymät palotilanteessa.

6.2 Tapaus WI-0

Taulukossa 6 on esitetty tapauksessa WI-0 saatu optimiratkaisu.

Taulukko 6. Optimoitu palkki WI-0 (jäykiste 5 x 45, ei taipumarajaa).

	h [mm]	b [mm]	t_w [mm]	t_f [mm]	A [mm ²]
WI-0	1700	400	8	20	29 505

Palkille WI-0 tehtiin vastaavat FE-laskelmat kuin palkille WB-0. Palkki WI-0 kesti normaalilämpötilassa 4 % enemmän kuormitusta kuin laskentapohjasta oli saatu tulokseksi. Palotilanteessa kriittiseksi lämpötilaksi saatiin 459 °C kun kuormitusta oli 65 % normaalilämpötilan kuormasta. Eurokoodin [SFS-EN 1993-1-2, 2005] mukainen kriittinen lämpötila on n. 400 °C.

6.3 Tapaukset WB-1, WB-2 ja WB-3

Taulukossa 7 on esitetty tapauksista WB-1, WB-2 ja WB-3 saadut optimiratkaisut. Viimeisessä sarakkeessa on esitetty poikkileikkauksen massan suhde verrattuna jäykisteettömään palkkiin.

Taulukko 7. Optimoidut palkit WB-1, WB-2 ja WB-3.

	h [mm]	b [mm]	t_w [mm]	t_f [mm]	b_s [mm]	t_s [mm]	A [mm ²]	Suhde
WB-1 ($L=10$ m)	710	250	5	12	20	12	13 340	1,00
WB-1 ($L=12$ m)	880	270	5	12	30	12	15 760	1,00
WB-1 ($L=14$ m)	1040	290	5	12	70	12	18 800	1,00
WB-1 ($L=16$ m)	1220	320	5	12	50	12	21 640	0,93
WB-1 ($L=18$ m)	1360	390	5	12	70	12	23 840	0,81
WB-1 ($L=20$ m)	1510	420	5	12	70	15	27 040	0,85
WB-1 ($L=22$ m)	1600	520	5	12	70	12	29 920	0,82
WB-1 ($L=24$ m)	1800	540	5	12	70	12	32 820	0,80
WB-2 ($L=12$ m)	1320	330	5	12	70	12	22 560	0,92
WB-2 ($L=16$ m)	1500	450	6	15	70	15	32 820	0,95
WB-2 ($L=20$ m)	1890	600	6	15	70	10	41 720	0,87
WB-2 ($L=24$ m)	1860	380	8	35	70	12	56 920	0,90
WB-3 ($L=12$ m)	1430	300	5	12	70	12	22 940	0,81
WB-3 ($L=16$ m)	1860	330	6	15	70	12	33 540	0,77

6.4 Tapaukset WI-1 ja WI-2

Taulukossa 8 on esitetty tapauksista WI-1 ja WI-2 saadut optimiratkaisut. Viimeisessä sarakkeessa on esitetty poikkileikkauksen massan suhde verrattuna jäykisteettömään palkkiin.

Taulukko 8. Optimoidut palkit WI-1 ja WI-2.

	h [mm]	b [mm]	t_w [mm]	t_f [mm]	b_s [mm]	t_s [mm]	A [mm ²]	Suhde
WI-1 ($L=12$ m)	1090	270	6	12	50	5	13 126	0,98
WI-1 ($L=16$ m)	1370	300	6	15	70	12	17 880	0,90
WI-1 ($L=20$ m)	1990	320	6	15	70	12	22 200	0,88
WI-1 ($L=24$ m)	1760	380	8	20	70	12	29 800	0,98
WI-2 ($L=12$ m)	1270	340	8	15	70	8	20 680	0,99
WI-2 ($L=16$ m)	1680	360	8	20	70	12	38 360	0,91

7 Johtopäätökset

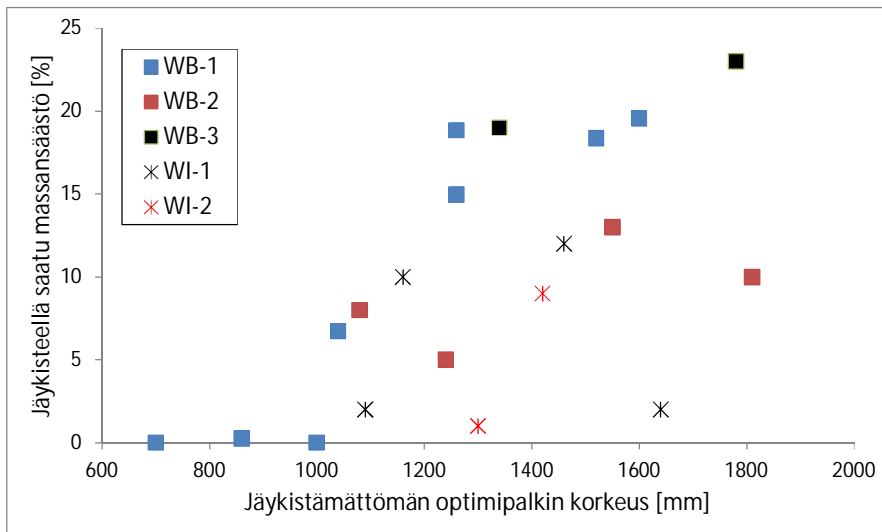
Optimointi on hyvin luonnollinen jatke teräsrakenteiden tietokoneavusteiselle analysoinnille. Suunnittelijan ei kannata tyytyä muutaman vaihtoehdon keskinäiseen vertailuun, vaan on paljon järkevämpää pistää tietokone hakemaan optimoinnin avulla uusia entistä parempia ratkaisuja. Parhaan löydetyn ratkaisun käyttökelpoisuudesta ja todellisesta käyttöasteesta voidaan varmistua epälineaarisen elementtimenetelmän avulla.

Vertailu Münchenin teknillisessä yliopistossa tehtyyn tutkimukseen [Parra et al, 2012] ja FE-laskennalla verifioidut tapaukset osoittavat, että tässä tutkimuksessa käytetty laskentapohja antaa luotettavia tuloksia. Kaikista tapauksista saatiin tulos muutamassa minuutissa, joten optimoinnin käyttö käytännön suunnittelussa on luontevaa. Toisaalta optimointitehtävien kokoa voidaan tarvittaessa myös kasvattaa laskenta-aikojen pysyessä vielä kohtuullisina.

Edellä mainittujen vertailujen lisäksi tässä tutkimuksessa tarkasteltiin yhteensä 14 WB- ja 6 WI-palkkia. Kaikissa tapauksissa palkki optimoitiin siten, että siinä ei ollut pituussuuntaista jäykistettä

ja se kuului poikkileikkausluokkaan 3 tai 4. Lisäksi optimointi suoritettiin siinä tapauksessa, että palkissa oli pituussuuntainen jäykiste.

Kun pituussuuntaista jäykistettä ei käytetty ja palkin haluttiin kuuluvan poikkileikkausluokkaan 3, palkin massa oli keskimäärin 20 % (WI: 15 %, WB: 22 %) suurempi kuin, jos se sai kuulua poikkileikkausluokkaan 4. Pituussuuntaisen jäykisteen käyttö puolestaan johti noin 10 % (WI: 6 %, WB: 11 %) kevyempään ratkaisuun verrattuna jäykisteettömään palkkiin. Jäykisteestä saatava hyöty lisääntyi palkkien korkeuden kasvaessa. Kun ilman jäykistettä optimoidun palkin korkeus oli vähintään 1250 mm, jäykisteestä saatu massansäästö oli keskimäärin 14 % (WI: 6 %, WB: 18 %). Kuvassa 5 on esitetty jäykistetyllä palkilla saavutettu massansäästö jäykistämättömän optimipalkin korkeuden funktiona.



Kuva 5. Jäykisteellä saadut säästöt massassa tutkituissa tapauksissa.

Lähteen [Rautaruukki Oyj, 2010] mukaan palkkien varustaminen pituussuuntaisilla jäykisteillä lisää suunnittelu- ja valmistuskustannuksia helposti liikaa massansäästöön verrattuna. Lähteiden [Johansson, 2005] ja [COMBRI+, 2008] vasta yli 3 metriä korkeissa I-profiileissa pitkittäisjäykisteiden käyttö on kannattavaa. Tätä voidaan arvioida tässä tarkastelussa kehitetyllä laskentapohjalla, kun siihen lisätään kustannusfunktiot ja optimoidaan massan sijasta kustannuksia.

8 Lähdeluettelo

COMBRI+, COMBRI Design Manual – Part II: State-of-the-Art and Conceptual Design of Steel and Composite Bridges, RFCS project RFS2-CT-2007-00031, 2008

Farkas J., Jarmai K., *Design and Optimization of Metal Structures*, Horwood Publishing Limited, 2008

Haapio J., *Feature-Based Costing Method for Skeletal Steel Structures based on the Process Approach*, Väitöskirja, Tampereen teknillinen yliopisto, 2012

Jalkanen J., *Teräsrakenteiden optimointi*, Teräsrakenteiden T&K-päivät, 2010

Johansson B., *Att konstruera med stål. Läromedel för konstruktörer, Modul 5: Tvärsnittsbärförmåga*, Luleå Tekniska Universitet, Kungliga Tekniska Högskolan, Stålbyggnadsinstitutet, 2005

Laine V., Jalkanen J., *Epälineaarinen elementtimenetelmä teräsrakenteiden mitoituksessa*, Teräsrakenteiden T&K-päivät, 2010

Parra R., Ndogmo J., Mensinger M., Design of Stiffened Plates for Steel Bridges Based on Eurocode 3 Part 1-5: Genetic Algorithm Approach, in *Nordic Steel Construction Conference 2012*, Norwegian Steel Association, 2012

Rautaruukki Oyj, *Hitsatut profiilit, EN 1993-käsikirja*, 2010

SFS-EN 1993-1-1, Eurocode 3: *Teräsrakenteiden Suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset Säännöt ja Rakennuksia Koskevat Säännöt*, Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2005

SFS-EN 1993-1-2, Eurocode 3: *Teräsrakenteiden Suunnittelu. Osa 1-2: Rakenteen Palomitoitus*, Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2005

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

Ympäristöministeriö, *Ympäristöministeriön asetus Eurocode-standardien soveltamisesta talonrakentamisessa*, 2007