

Korkealujuusteräksen käyttö raskaasti kuormitetuissa kotelopilareissa

Juha Kukkonen

Tiivistelmä. Tässä artikkelissa käsitellään korkealujuusteräksen käyttöä raskaasti kuormitetuissa kotelopilareissa. Lujuusmitoitus suoritetaan standardien SFS-EN 1993-1-1 ja SFS-EN 1993-1-12 mukaisesti. Kotelopilarit mitoitetaan käyttäen normaaleja ja korkealujuusteräksiä. Tässä tutkimuksessa otetaan huomioon teräslajien erilaiset hinnat pilareiden edullisuutta vertailtaessa. Tutkimuksen kohteena ovat kahden rakennetun kattilalaitoksen kattilakannatuspalkistoa tukevat kotelopilarit. Tehdyn vertailun perusteella arvioidaan korkealujuusteräksen käyttöä vastaavissa rakenteissa.

Avainsanat: korkealujuusteräs, kattilalaitoksen teräsrunko, hitsattu kotelopilari, eurokoodi 3

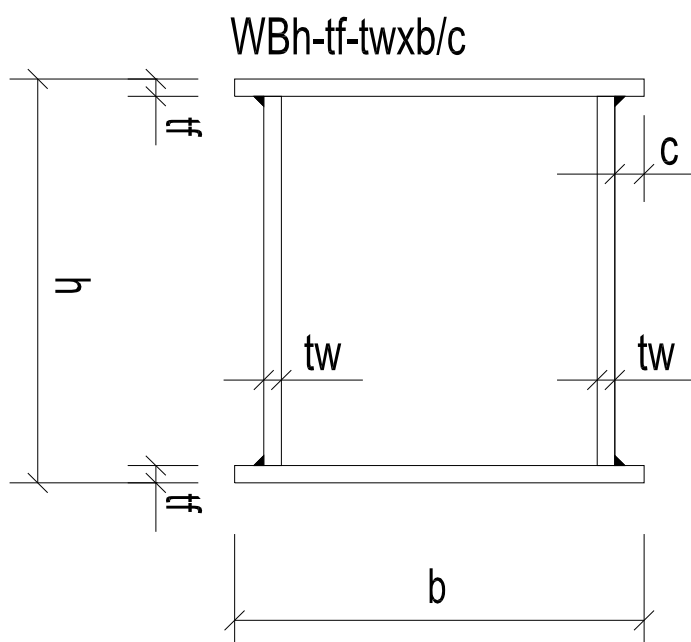
Johdanto

Korkealujuusteräksen käsite on vuosien saatossa muuttunut. Tällä hetkellä yleisin Euroopassa käytettävä teräslaji on S355. Teräslaji S355 miellettiin vielä viime vuosisadan puolivälissä korkealujuusteräkseksi [3]. Korkealujuusteräkselle ei kuitenkaan ole olemassa virallista määritelmää, mutta kirjallisuudessa tällainen käsite esiintyy ja sillä tarkoitetaan teräslajeja, jotka ovat lujempia kuin tavanomaisesti käytettävät teräkset. Tässä artikkelissa korkealujuusteräksellä tarkoitetaan teräslajeja, joiden myötölujuus on enemmän kuin 460 MPa, mutta vähemmän kuin 700 MPa. Tätä suurempiakin myötölujuuksia teräksellä on saavutettu, jolloin puhutaan ultralujista teräksistä. 1500 MPa:n lujuutta on kaupallisesti saatavilla ja onhan jännitetyissä betonirakenteissa käytettävien punosten myötölujuus ollut jo pitkään yli 1500 MPa.

Korkealujuusteräksen suuri myötölujuus saadaan parhaiten hyödynnettyä rakenteissa, joissa stabiilisuusilmiöt eivät vaikuta rakenteen kestävyyttä pienentävästi. Tällaisia rakenteita ovat vedetyt tai puristetut rakenteet, jotka eivät nurjahda tai lommahda. Edellä mainituissa rakenteissa korkealujuusteräksen menekki on korkealujuusteräksen ja normaalin teräksen myötölujuuksien suhteessa pienempi. Käytännössä kuitenkin käytettävissä olevat profiilit ja levynvahvuudet lisäävät teoreettista menekkiä, koska niiden koot kasvavat portaittain ja harvoin teoreettinen koko on sama valmistuskoon kanssa. Teräsrungon kokonaishinta ei kuitenkaan ole useimmiten suoraan teräsrakenteiden painoon verrannollinen, koska valmistus- ja asennushintaan vaikuttavia tekijöitä ovat mm. asennettavien ja kuljetettavien osien massa ja lukumäärä, lopullisen rakenteen mittasuhteet kuten korkeus, leveys, syvyys ja erilaisten liitosdetaljien lukumäärä sekä niiden yksityiskohdat.

Korkealujuusterästen hyötyjä tulee tarkastella kokonaisuutena, jossa edellä mainitut asiat otetaan huomioon. Pelkästään teräsmassan säästöä tarkastelemalla ei saada riittävää tietoa korkealujuusteräksen taloudellisuudesta, koska liitosten valmistus tai muu konepajavalmistukseen liittyvä tekijä saattaa tehdä rakenteesta kalliimman tai muuten epäedullisemmän. Tällainen tekijä on esimerkiksi liitosalueen vahvistaminen jäykisteillä lommahtamisen estämiseksi. Teräsmassan säästön tutkiminen on kuitenkin tärkeä tehdä ensi vaiheessa, jotta saadaan käsitys jatkotutkimusten tarpeellisuudesta. Korkealujuusterästä käyttämällä saadaan aikaan entistä kevyempiä rakenteita. Tämä tarkoittaa pienempiä profiileja, vähemmän pintakäsittelyä, asennettavien osien kevenemistä yms.. Korkealujuusterästen käytöllä on siis mahdollista saada aikaan kustannussäästöjä ja kilpailukyvyn edellyttämää erikoisosaamista.

Tässä artikkelissa vertaillaan teräksen massameneekkiä mitoittamalla eri teräslajeilla puristettu ja taivutettu kotelopilari, joka on valmistettu levyrainoista hitsaamalla. Vertailu suoritettiin 24:lle kotelopilarille. Hitsatun kotelopilarin poikkileikkaus on esitetty kuvassa 1.



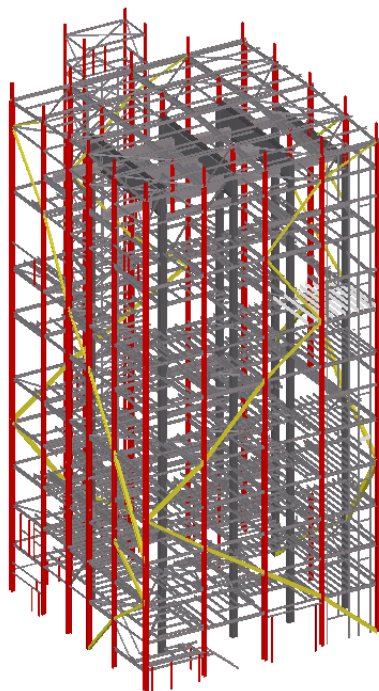
Kuva 1. Hitsatun kotelopilarin poikkileikkaus ja yleisesti käytetyt mittamerkinnot.

Hitsattujen kotelopilareiden käyttökohteista

Hitsaamalla koottuja kotelopilareita käytetään rakenteissa, joihin markkinoilla olevista valssatuista vakioprofiileista ei löydy rakenteen poikkileikkausmitoille ja kestävyydelle

asetettuja vaatimuksia täyttävää poikkileikkausta tai näiden poikkileikkausten käyttö ei ole muuten taloudellisesti mahdollista pienien erien, kuljetusmatkojen yms. takia. Vakioprofiileista kysymykseen voisivat tulla kuumavalssatut SHS- ja RHS-putkiprofiilit. Koteloprofiilin pääakselien suhteen lasketut poikkipintasuureet ovat neliömäisessä poikkileikkauksessa samaa suuruusluokkaa toisiinsa nähden, kun kuvassa 1 esitetty mitta c pidetään mahdollisimman pienenä. Näin molempien suuntien nurjahdustukien väli voi olla sama rakenteen nurjahduskestävyyden oleellisesti pienentymättä.

Hitsattuja kotelopilareita käytetään esimerkiksi tukemaan kattilalaitosten kattilan kannatuspalkistoa. Suuressa kattilalaitoksessa kattilaa ei ole mahdollista tukea alhaaltapäin suurten lämpöliikkeiden ja kattilan suuren massan takia vaan se ripustetaan pilareilla tuetun palkiston varaan. Kannatuspalkistoon tangoilla ripustettavan kattilan massa vaihtelee tavallisesti kattilan koosta ja käyttötarkoituksesta riippuen 2...10 miljoonan kg:n välillä, joten pilareille tuleva puristava normaalivoima on todella suuri. Kattilalaitoksen teräsrunko on pilari-palkkirakenteinen, joka jäykistetään yleensä ristikoimalla seinälinjat ja kerrostasot tietyin välein korkeussuunnassa. Kattilalaitosten teräsrungoissa seinäristikointiin yhdistetyt ristikoidut tasorakenteet toimivat pilareiden nurjahdustukina. Jäykistävien tasorakenteiden väli vaihtelee yleensä kattilalaitoksissa 8...15 m:n välillä, kerroskorkeuden ollessa yleensä 3..5 m. Kattilalaitosrakennuksen korkeus/syvyys – suhde on tyypillisesti välillä 1.5...2.5, jos esimerkiksi rakennuksen korkeus on 80 m niin syvyys ja leveys ovat 40 m. Kuvassa 2 on esitetty tyypillinen kattilalaitoksen teräsrunko.



Kuva 2. Kattilalaitoksen teräsrunko.

Korkealujuusterästä käytetään tällä hetkellä melko vähän talorakenteissa. Pääsyyinä tähän lienee se, että asia on melko uusi käytännön suunnittelun ja konepajavalmistuksen tasolla. Esimerkiksi Suomen Rakentamismääräyskokoelman osassa B7 on suunnitteluohjeet teräslajiin S420 asti ja eurokoodin esistandardissa ENV 1993 on suunnitteluohjeet teräslajiin S460 asti. Teräsrakenteiden konepajavalmistuksessa ei ole kenties vielä totuttu valmistamaan tämän lujemmasta teräksestä rakenteiden kokoonpanoja. Hitsattujen profiilien valmistaminen on myös haasteellista vaativan hitsauksensa takia.

Korkealujuusteräksen lujuuslaskennasta

Tässä työssä esitetyssä vertailussa korkealujuusteräksen mitoituksessa käytettiin SFS-EN 1993-1-1 [1] ja SFS-EN 1993-1-12 [2] standardeja. Standardissa SFS-EN 1993-1-1 [1] annetaan mitoitusohjeet teräslajeihin S460 asti ja standardilla SFS-EN 1993-1-12 [2] mitoitusohjeet laajennetaan teräslajiin S700 asti. Kirjallisuudesta löytyy ehdotuksia suurempien lujuuksien mitoitusmenetelmiksi, mutta näitä ei tässä artikkelissa kuitenkaan käsitellä.

Korkealujuusteräksestä valmistetun puristetun ja taivutetun sauvan mitoituksessa ei eurokoodia käytettäessä ole mitään eroa verrattuna normaaliteräksestä valmistettuun sauvaan, koska standardissa SFS-EN 1993-1-12 [2] ei ole esitetty näihin mitoituskaavoihin poikkeuksia. Huomioitavaa on se, että teräksen myötölujuus vaikuttaa poikkileikkausluokkaan ja joidenkin poikkileikkausmuotojen nurjahduskäyriin. Hitsatun kotelopilarin tapauksessa myötölujuudella ei ole vaikutusta nurjahduskäyriin standardin SFS-EN 1993-1-1 [1] mukaan. Poikkileikkausluokan valinnassa käytettävien rajajoikkuuksien laskennassa oleva tekijä ϵ määritellään kaavalla [1]

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}. \quad (1)$$

missä f_y on käytettävän teräksen myötölujuus [MPa]. Poikkileikkausluokan rajajoikkuudet on esitetty standardin SFS-EN 1993-1-1 [1] taulukossa 5.2. Standardissa EN 1993-1-12 [2] ei ole määritetty tähän kohtaan tarkentavaa tietoa, joten tätä kaavaa voidaan käyttää siksi myös teräslajiin S700 asti. Puristetun ja taivutetun sauvan mitoitukseen ei ole myöskään esitetty tarkentavaa tietoa, joten osassa 1-1 [1] esitetyjä mitoituskaavoja voidaan käyttää teräslajiin S700 asti. Puristetun ja taivutetun sauvan mitoituksessa tarvittavien yhteisvaikutustekijöiden laskentaan ei osassa 1-12 [2] ole annettu rajoituksia, joten molempia menetelmiä voidaan käyttää. Tässä vertailussa käytettiin menetelmää 2, koska se on kirjoittajalle tutumpi.

Vertailun lähtökohdat

Vertailua varten valittiin kahdesta erisuuruudesta kattilalaitoksesta yhteensä 24 kotelopilaria, joiden poikkileikkaukset, voimasuureet ja nurjahduspituudet vaihtelivat. Kotelopilarit mitoitettiin vertailua varten useilla teräslajeilla. Tämän jälkeen laskettiin niiden massat. Pilarit on mitoitettu siten, että niiden käyttöaste eli rasitus/kestävyys-suhde on enimmillään 1.00. Tässä vertailussa rakenteiden voimasuureita ei laskettu uusiksi poikkileikkauksen muuttuessa laskennan yksinkertaistamisen vuoksi. Pilarin taivutusjäyhyydellä on tietenkin vaikutusta taivutusmomentin suuruuteen rakennuksen teräsrungon globaalissa FE - analyysissä ja sillä on pieni vaikutus käyttöasteeseen. Vertailu suoritettiin teräslajien S355, S420, S500, S550, S620 ja S690 kesken. Käytetyt levynvahvuudet olivat 15, 16, 18, 20, 22, 25, 30, 35, 40, 45 ja 50 mm. Poikkileikkauksen korkeutta h ja leveyttä b vaihdettiin 25 mm:n askelin siten, että h ja b olivat aina yhtä suuret.

Poikkileikkaukset valittiin siten, että poikkileikkausluokkana olivat luokat 1, 2 ja 3 laskennan yksinkertaistamiseksi. Poikkileikkausluokassa 4 pitää laskea tehollinen poikkileikkaus, mitä monet ohjelmistot eivät osaa tehdä ja on käsin laskumenetelmin työläs tehdä. Toteutettujen pilareiden hoikkuusluku vaihteli 35...65 välillä, mikä on tyypillinen hoikkuusluku tämän kaltaisissa rakenteissa. Esitetyt voimasuureet ovat mitoitaneet toteutuneen kohteen poikkileikkauksen. Pilareiden lähtötiedot on esitetty taulukossa 1.

Tulokset

Mitoituksen tuloksena saatujen pilareiden massat teräslajeittain on esitetty taulukossa 2. Pilareiden todellinen pituus on sama kuin nurjahduspituus, paitsi pilareiden 3, 4, 13, 14, 15 ja 16. Niiden todellinen pituus on saatu jakamalla nurjahduspituus luvulla 0.8. Luku 0.8 on seurausta siitä, että kyseiset pilarit ovat perustuksissa momenttijäykästi kiinni, jolloin niiden nurjahduspituus on saatu kertomalla todellinen pituus 0.8:lla.

Taulukko 1. Pilareiden lähtötiedot.

Pilarin numero	Alkuperäinen poikkileikkaus	Voimasuureet N, M_y , M_z (kN, kNm)	Nurjahduspituus L_y , L_z (mm)	Hoikkuusluku $\max(\lambda_y, \lambda_z)$
1	WB700-25-25x700/25	13600, 200, 200	10300	39.4
2	WB800-35-35x800/25	24300, 250, 250	10300	34.5
3	WB700-40-40x700/25	21700, 670, 670	10800	42.2
4	WB800-50-50x800/25	30760, 1175, 1075	10800	36.9
5	WB800-35-35x800/25	24600, 400, 500	11600	38.9
6	WB700-25-25x700/25	14000, 335, 420	11600	44.4
7	WB700-35-35x700/25	17700, 430, 520	12200	47.4
8	WB700-35-35x700/25	17700, 360, 400	12200	47.4
9	WB800-40-40x800/25	27800, 870, 230	12200	41.2
10	WB800-40-40x800/25	27800, 320, 360	12200	41.2
11	WB700-35-35x800/25	16300, 350, 600	12700	49.3
12	WB800-40-40x800/25	25200, 430, 630	12700	42.9
13	WB500-25-25x500/25	8250, 450, 450	6800	37.8
14	WB450-18-18x450/25	5500, 250, 250	6800	41.9
15	WB450-18-18x450/25	5000, 250, 250	6800	41.9
16	WB450-22-22x450/25	6500, 300, 300	6800	42.3
17	WB500-25-25x500/25	7250, 250, 250	10000	55.6
18	WB450-18-18x450/25	4600, 200, 200	10000	61.7
19	WB425-15-15x425/25	3500, 150, 150	10000	65.3
20	WB500-16-16x500/25	4000, 250, 500	10000	54.6
21	WB500-22-22x500/25	7000, 200, 300	10500	58.0
22	WB450-16-16x450/25	4200, 150, 150	10500	64.5
23	WB450-15-15x450/25	3200, 200, 200	10500	64.3
24	WB450-16-16x450/25	2100, 500, 400	10500	64.5

Taulukko 2. Pilareiden massat (kg) teräslajeittain.

Pilari	S355	S420	S500	S550	S620	S690
1	5548	4825	4468	4113	3756	3756
2	8659	7471	5862	6500	5458	5531
3	11190	9866	8520	8520	7884	7884
4	15896	14401	11349	10609	11609	9865
5	9752	8413	7867	7321	7321	6774
6	6147	5433	5032	5032	5241	5241
7	8916	7699	6465	6465	5985	5985
8	8916	7699	6465	6465	5985	5985
9	11646	10257	8850	8276	8276	7699
10	11646	10257	8850	8276	8276	7699
11	9282	8015	6730	6730	6231	6231
12	12123	10677	9216	8616	8616	8015
13	3170	3003	2835	2669	2295	2161
14	2562	1856	1742	1747	1640	1533
15	2076	1853	1742	1641	1541	1533
16	2513	2295	1955	1955	1955	1747
17	3729	3014	2857	2583	2583	2583
18	2442	2180	2049	2054	2054	2054
19	1931	1929	1813	1804	1697	1697
20	2432	2432	2306	2306	2180	2159
21	3467	3165	2860	2712	2712	2712
22	2289	2151	2151	2028	2025	2025
23	2151	2028	1904	1904	1894	1781
24	2289	2151	2151	2158	2025	1894

Jotta pilareiden kustannustiedot saadaan keskenään vertailukelpoisiksi, tulee tarkastelussa ottaa huomioon myös teräslajien välinen hintakerroin. Hintakerroin on teräslajin hinnan suhde toisen teräslajin hintaan, tässä vertailussa suhteessa teräslajiin S355. Eri teräslajien välinen materiaalin hintakerroin riippuu monista tekijästä kuten esimerkiksi yleisestä markkinatilanteesta ja suhdanteista, joten yleispätevää kerrointa ei voida esittää. Tässä tutkimuksessa kertoimet on määritetty lähteessä [4] esitetyn kuvaajan avulla. Nämä kertoimet ovat todellisuudessa valmistajakohtaisia, joten tarkkaa yleistä kerrointa ei ole saatavilla. Käytetyssä kuvaajassa on esitetty hinnan ja myötölujuuden suhde eri teräslajeille. Taulukossa 3 on esitetty kuvaajan avulla määritetyt hintakertoimet suhteessa teräslajiin S355.

Taulukko 3. Teräslajien materiaalin suhteellinen hintakerroin.

teräslaji	S420	S500	S550	S620	S690
hintakerroin	1.13	1.17	1.25	1.38	1.42

Taulukossa 3 esitettyjä kertoimia käyttäen voidaan muuntaa pilareiden massat niin, että ne edustavat teräslajia S355. Taulukossa 4 on esitetty hintakertoimella muunnetut massat. Pieniä eroja esiintyy hintakertoimien pyöristyksestä johtuen.

Taulukossa 4 pienin massa osoittaa edullisimman teräslajin. Taulukon 5 avulla nähdään mikä teräslaji antaa materiaalikustannuksen perusteella edullisimman rakenteen. Taulukossa 5 on verrattu muunnettua massaa pilarin S355 massaansa. Luvun ollessa pienempi kuin 1.00 on kyseinen teräslaji edullisempi ratkaisu kuin S355. Luvun ollessa suurempi kuin 1.00 on kyseinen teräslaji kalliimpi ratkaisu kuin S355. Edullisin ratkaisu esitetty tummennetulla fontilla.

Taulukko 4. Hintakertoimella muunnetut pilareiden massat (kg).

Pilari	S355	S420	S500	S550	S620	S690
1	5548	5428	5213	5141	5165	5321
2	8659	8405	6839	8125	7505	7836
3	11190	11099	9940	10650	10841	11169
4	15896	16201	13241	13261	15962	13975
5	9752	9465	9178	9151	10066	9597
6	6147	6112	5871	6290	7206	7425
7	8916	8661	7543	8081	8229	8479
8	8916	8661	7543	8081	8229	8479
9	11646	11539	10325	10345	11380	10907
10	11646	11539	10325	10345	11380	10907
11	9282	9017	7852	8413	8568	8827
12	12123	12012	10752	10770	11847	11355
13	3170	3378	3308	3336	3156	3061
14	2562	2088	2032	2184	2255	2172
15	2076	2085	2032	2051	2119	2172
16	2513	2582	2281	2444	2688	2475
17	3729	3391	3333	3229	3552	3659
18	2442	2453	2391	2568	2824	2910
19	1931	2170	2115	2255	2333	2404
20	2432	2736	2690	2883	2998	3059
21	3467	3561	3337	3390	3729	3842
22	2289	2420	2510	2535	2784	2869
23	2151	2282	2221	2380	2604	2523
24	2289	2420	2510	2698	2784	2683

Taulukko 5. Pilareiden edullisuusvertailu .

Pilari	S355	S420	S500	S550	S620	S690	Hoikkuusluku
1	1.00	0.98	0.94	0.93	0.93	0.96	39.4
2	1.00	0.97	0.79	0.94	0.87	0.90	34.5
3	1.00	0.99	0.89	0.95	0.97	1.00	42.2
4	1.00	1.02	0.83	0.83	1.00	0.88	36.9
5	1.00	0.97	0.94	0.94	1.03	0.98	38.9
6	1.00	0.99	0.96	1.02	1.17	1.21	44.4
7	1.00	0.97	0.85	0.91	0.92	0.95	47.4
8	1.00	0.97	0.85	0.91	0.92	0.95	47.4
9	1.00	0.99	0.89	0.89	0.98	0.94	41.2
10	1.00	0.99	0.89	0.89	0.98	0.94	41.2
11	1.00	0.97	0.85	0.91	0.92	0.95	49.3
12	1.00	0.99	0.89	0.89	0.98	0.94	42.9
13	1.00	1.07	1.04	1.05	1.00	0.97	37.8
14	1.00	0.81	0.79	0.85	0.88	0.85	41.9
15	1.00	1.00	0.98	0.99	1.02	1.05	41.9
16	1.00	1.03	0.91	0.97	1.07	0.98	42.3
17	1.00	0.91	0.89	0.87	0.95	0.98	55.6
18	1.00	1.00	0.98	1.05	1.16	1.19	61.7
19	1.00	1.12	1.10	1.17	1.21	1.24	65.3
20	1.00	1.13	1.11	1.19	1.23	1.26	54.6
21	1.00	1.03	0.96	0.98	1.08	1.11	58
22	1.00	1.06	1.10	1.11	1.22	1.25	64.5
23	1.00	1.06	1.03	1.11	1.21	1.17	64.3
24	1.00	1.06	1.10	1.18	1.22	1.17	64.5

Johtopäätökset

Taulukosta 5 nähdään, että hoikkuusluvun ollessa pienempi kuin 55 saadaan teräslajilla S500 yleensä edullisin ratkaisu. Hoikkuusluvun ollessa suurempi kuin 55 saadaan teräslajilla S355 yleensä edullisin ratkaisu. Joitakin yksittäisiä poikkeustapauksia esiintyy hoikkuusluvun 55 molemmin puolin. Eri teräslajien kesken tehtävä edullisuusvertailu on herkkä suhteellisen hintakertoimen vaihtelulle, minkä takia ehdotonta totuutta ei voida sanoa yksittäisen teräslajin kohdalla. Tehdyn vertailun perusteella korkealujuusteräksen käyttö kattilalaitosten pilareissa voi olla perusteltua.

Jatkotutkimuskohteina voisivat tulla kysymykseen hintakertoimen vaikutusten herkkyytarkastelu tarkennetuilla hintakertoimilla, projektikohtainen kokonaisvaltainen kustannusvertailu sekä konepajavalmistuksen nykytilan valmiuskartoitus korkealujuusterästen osalta suomalaisissa konepajoissa. Lisäksi olisi hyödyllistä selvittää myös korkealujuusterästen sovelluskohteita muissa rakennesovelluksissa kuten esimerkiksi ristikoissa, raskaasti kuormitetuissa palkistoissa ja liitoksissa.

Viitteet

- [1] SFS EN 1993-1-1. Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: *Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt*, 15.8.2005.
- [2] SFS-EN 1993-1-12+AC. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-12: *EN 1993 laajennus teräslajeihin S 700 asti*, 16.4.2007.
- [3] Heinisuo M., Mäkinen P., *Use of high strength and fire resistant steels in buildings*, International Research And Development Convention in Steel Construction, 13-14 September 2006, Hämeenlinna, Finland
- [4] Johansson B., *Buckling resistance of Structures of High Strength Steel, in Use and Application of High-Performance Steel for Steel Structures*, Structural Engineering Documents 8, IABSE, 2005

Juha Kukkonen
KPM-Engineering Oy
Kalevantie 7 C, 33100 TAMPERE
juha.kukkonen@kpmeng.fi