

Kasper Korhonen

LIITTOPALKIN EDUT

Teräs–betoni-liittopalkin säästämä materiaali

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja: Kristo Mela
Toukokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Kasper Korhonen: Liittopalkin edut – Teräs–betoni-liittopalkin säästämä materiaali
(Advantages of composite beams – Material reduction of steel–concrete composite beams)
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan kandidaatin tutkinto
Toukokuu 2023

Tässä työssä tutkitaan liittopalkkirakenteen etuja verrattuna tavanomaiseen teräspalkkirakenteeseen. Tämä työ keskittyy tuottamaan rakennesuunnittelijalle helposti käsiteltäviä tuloksia liittopalkkirakenteella säästetystä teräsmäärästä. Tilannetta tutkitaan valitsemalla useita erilaisia lähtöarvoja ja vertaamalla näissä tilanteissa liittopalkkirakennetta teräspalkkirakenteeseen. Palkit ovat jokaisessa tapauksessa yksiaukkoisia sekä umpibetonilaatat kaksiaukkoisia. Tutkimuksessa mitoitetaan 162 rakennetta ilman liittovaikutusta, sekä liittovaikutuksella. Yhteensä mitoitettiin siis 324 erilaista palkkia ja lisäksi 18 erilaista betonilaattaa.

Mitoitusta varten tuotettiin python-koodi, mikä pystyi mitoittamaan kaikki tapaukset silmukalla. Mitoitukset suoritettiin eurokoodien mukaisesti. Tulokseksi haettiin mahdollisimman ohut betonilaatta sekä mahdollisimman kevyt teräsprofiili. Ohjelma vertaili keskenään kaikkia IPE ja HEA teräsprofileja. Tuloksena havaitaan, että liittovaikutus säästää keskimäärin 34 % rakenneterästä. Tämä arvo muuttuu merkittävästi, jos jänneväli on suurempi kuin 7,5 m, betonin lujuus on pienempi kuin C30/37 tai laatan jänneväli on 5 m tai alle. Säästetyt teräsmäärät ovat yleistettävissä jännevälien pysyessä alle 10 m ja mitoitusapojen ollessa riittävän lähellä työssä käytettyä mitoitusapua. Työssä esitellään, kuinka paljon nämä muuttujat vaikuttavat säästetyn rakenneteräksen määrään.

Työn tuloksena saatu arviointimenetelmä materiaalisäästöille tuottaa suuntaa antavan arvion. Aiheesta tarvitaan jatkotutkimusta arvion tarkentamista varten. Jatkotutkimusta tarvitaan liittopalkkiprofiilin vaikutuksesta säästöihin. Lisäksi on tarpeen tarkastella, kuinka tulokset muuttuvat, kun laattakin optimoidaan liittopalkkirakenteelle mahdollisimman suotuisaksi.

Avainsanat: Liittopalkki, teräsmäärän säästö, rakennesuunnittelu, mitoitus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Kandidaatin työtä tehdessä opin, kuinka suurta tiedon määrää voidaan käyttää tarkasteltavan ongelman ratkaisuun. Laitoin itselleni tavoitteeksi työn laatuun ja työmäärään koskien ja pääsin mielestäni niihin tässä työssä. Lähestyin työn tekemistä siten, etten turhaan venyttäisi työn tekemistä pitkälle aikavälille, jolloin saisin työstä yhtenäisemmän tuntuisen. Työn tarkassa ajankohdassa suorittaminen helpotti minua siinä, ettei välissä kerennyt unohtaa, mihin edellisellä kerralla työ oli jäänyt. Näin missään välissä ei kerennyt syntyä suurta kynnystä jatkaa työtä. Haluan kiittää ohjaajaani ja muita te-räsryhmän jäseniä rakentavasta palautteesta. Näiden ansiosta työstä saatiin hiottua vielä viimeisetkin kohdat kuntoon.

Tampereella, 22.5.2023

Kasper Korhonen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
2. LIITTOPALKIN TAIVUTUS.....	4
3. MITOITUS.....	8
3.1. Teräsbetoni-laatta.....	9
3.2. Teräspalkki.....	10
3.3. Liittopalkki.....	11
4. MUUTTUJIEN VAIKUTUS SÄÄSTÖIHIN.....	13
4.1. Tavanomainen yksittäistapaus.....	13
4.2. Säästöt.....	15
4.3. Yhden muuttujan vaikutus.....	17
4.3.1. Laatan jänneväli.....	17
4.3.2. Betonin lujuus.....	20
4.3.3. Hyötykuorma.....	23
4.3.4. Palkin jänneväli.....	25
4.3.5. Teräksen lujuus.....	27
4.4. Yksittäisen muuttujan painoarvo.....	29
5. YHTEENVETO.....	30
LÄHTEET.....	31
LIITTEET.....	32

LYHENTEET JA MERKINNÄT

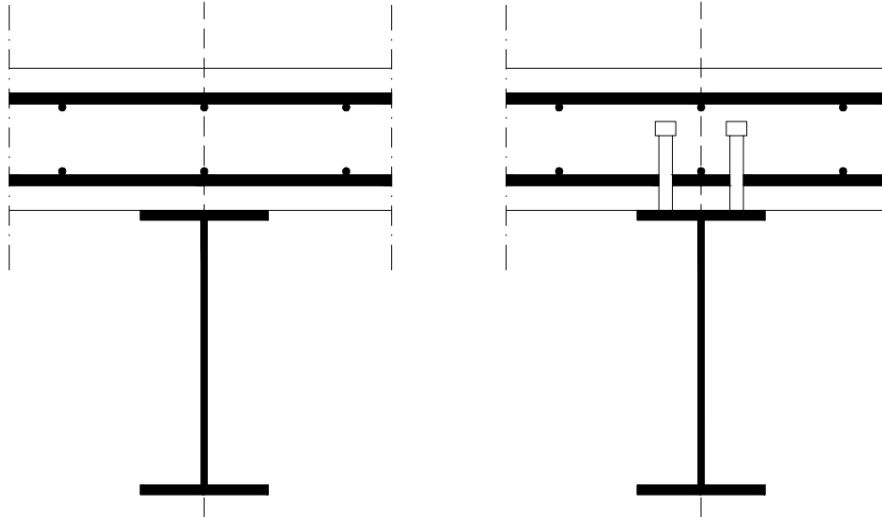
A_a	teräsosan poikkipinta-ala
b_{eff}	betonilaatan tehokas leveys liittopalkissa
e_i	Liittopalkin sisäinen momenttivarsi
EI	taivutusjäykkyys
EI_0	Liittopalkin lyhytaikaisten kuormien taivutusjäykkyys
EI_{com}	Liittorakenteen taivutusjäykkyys
EI_P	Liittopalkin pitkäaikaisten kuormien taivutusjäykkyys
EI_S	Liittopalkin kutistumat huomioon ottava taivutusjäykkyys
f_{cd}	betonin mitoittava puristuslujuus
f_{ck}	Betonin lieriölujuus
f_{yd}	teräksen mitoittava vetolujuus
f_{yk}	Teräksen ominaisvetolujuus
g_{Ed}	Mitoitusarvo pysyväälle kuormalle
h_c	betonilaatan kokonaispaksuus
h_l	Liittolaatan kokonaispaksuus. Tässä työssä sama kuin h_c
h_w	Teräsosan uuman korkeus
I_x	Poikkileikkauksen x neliömomentti
Jl	betonilaatan jänneväli
Jp	Palkin jänneväli
k	Seppäsen (1980, s. 70) määrittämä kerroin momentille
k'	Seppäsen (1980, s. 70) määrittämä kerroin leikkausvoimalle
l	jänneväli yleisesti
M	Momentti
M_{EK1}	Liittopalkin teräsosalle tuleva momentti käyttörajatilassa
M_{EK2}	Liittopalkille tuleva momentti käyttörajatilassa
$M_{pl.Rd}$	Liittopalkin Taivutuslujuus
Q	Leikkausvoima
q	tasainen kuorma
q_{Ek}	Hyötykuorma
q_{Ed}	Mitoitusarvo muuttuvalle ja tasaiselle kuormalle.
R_a	teräksen jännitysresultantti
R_c	betonin jännitysresultantti
R_f	Teräsosan laipan suurin jännitysresultantti
R_w	Teräsosan uuman suurin jännitysresultantti
t_f	Teräsosan laipan paksuus
$V_{pl.Rd}$	Liittopalkin leikkauslujuus
W_a	Teräspalkin taivutusvastus
y_x	Poikkileikkauksen osan x pintakeskiön pystyettäisyys koko poikkileikkauksen vetojäykkyysskeskiöstä
ψ_1	Kuormitusyhdistelmän pienennyskerroin
ψ_2	Kuormitusyhdistelmän pienennyskerroin

1. JOHDANTO

Liittopalkki on hyvin tunnettu rakentamistapa. Varsinkin Yhdysvalloissa liittorakenteita on hyödynnetty jo pitkään. Suomessa liittorakenteet ovat hieman harvemmin käytössä, mutta aihealueelta hyvin tunnettu. Liittorakenteiden mitoittamiselle on tehty hyviä oppaita kuten SFS-EN 1994-1-1 + AC (2005) Eurokoodi 4: Betoni-teräs -liittorakenteiden suunnittelu, Peltomaan, M. (2009) Betoni-teräs -liittorakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan ja Dujmovic, D., Androic, B. & Lukacevic, I. (2015). Composite structures According to Eurocode: Worked Examples. Liittorakenteiden säästöjen määristä ei kuitenkaan löydetty tarkempaa tietoa.

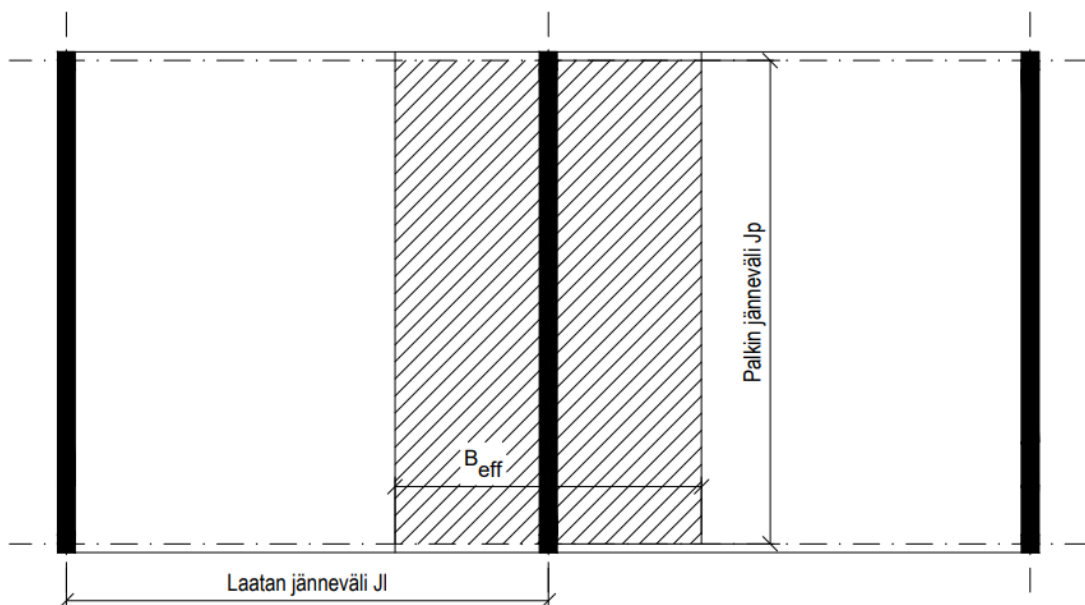
Tässä työssä keskitytään teräs–betoni-liittopalkin ja teräspalkilla tuetun betonilaatan vertailuun. Tarkoitus on selvittää, kuinka paljon palkin liittovaikutus säästää materiaalia. Työssä käsitellään myös liittopalkin vaikutusta välipohjarakenteen korkeuteen. Lisäksi tavoitteena on tutkia, kuinka materiaalien ominaisuudet, jännevälit ja kuormat vaikuttavat säästetyn materiaalin määrään. Hypoteesina on, mitä suurempia rasituksia palkille aiheutuu, sitä suurempi hyöty liittopalkista saadaan. Tässä halutaan kuitenkin tarkentaa käsitystä, kuinka suurta hyöty oikeasti on.

Työ toimii suuntaa antavana materiaalina rakennesuunnittelijoille, jotka harkitsevat liittopalkin hyödyntämistä omissa rakenteissaan. Työn tulokset esitetään siten, että niitä on mahdollisimman helppo ja nopea hyödyntää omissa laskuissa. Materiaalimäärien lisäksi on hyvä huomioida myös rakennusvaiheessa syntyvät lisäkustannukset, kuten rakenteen tuentaan tai liitostappien hitsaamiseen tarvittava työmäärä. Tässä työssä ei oteta kantaa tähän, eikä materiaalien hintoihin, koska kumpikin näistä muuttuvat ajan mittaan.



Kuva 1. Tarkasteltavat poikkileikkaukset, jossa vasemmanpuoleinen poikkileikkaus ilman liittovaikutusta ja oikeanpuoleinen liittovaikutuksella. Kuva mukailee eurokoodin 4, SFS-EN 1994-1-1 + AC (2005, kuva 6.1) ensimmäistä poikkileikkausta.

Tässä työssä käsitellään teräsbetonisen umpilaatan ja I-profiilisen teräspalkin täydellistä liittovaikutusta. Työssä vertaillaan samaa rakennetta liittovaikutuksella ja ilman liittovaikutusta kuvan 1 tavoin. Mitoitettavat rakenteet ovat yhteen suuntaan kantava kaksiaukkoinen teräsbetonilaatta sekä yksiaukkoinen teräspalkki. Laatta rakennetaan kolmen yksiaukkoisen teräspalkin päälle kuvan 2 mukaisesti.



Kuva 2. Mitoitettavan tilanteen yleistetty tasokuva.

kuvassa 2 B_{eff} tarkoittaa liittopalkille laskettavan betonilaatan leveyttä. Palkeista tarkastellaan keskimmäistä, koska sille tulee suurin rasitus. Lisäksi keskimmäisellä palkilla

betonilaatan toimiva leveys saadaan kummallekin puolelle palkkia ja näin optimoidaan liittovaikutuksen teho.

Mitoitukseen valitaan muuttujiksi laatan jänneväli, palkin jänneväli, hyötykuorma, betonin lujuusluokka ja rakenneteräksen lujuusluokka taulukon 1 mukaisesti. Lähtöarvoista mitoitetaan jokainen mahdollinen kombinaatio. Laatan mitoitukseen vaikuttavat lähtöarvot ovat laatan jänneväli, betonin lieriölujuus sekä hyötykuorma. Näistä saadaan 18 erilaista kombinaatiota. Jokainen muuttuja vaikuttaa palkin mitoitukseen, joten kummallekin palkille tulee 162 erilaista kombinaatiota. Tällöin mitoitettavia rakenteita on yhteensä 342 kappaletta.

Koska rakenteita on niin suuri kappalemäärä, ei mitoitusta ole järkevä suorittaa mekaanisesti laskien jokainen rakenne erikseen. Siksi tehdäänkin Python-ohjelma, joka osaa mitoittaa kaikki rakenteet yhdessä silmukassa. Tulostetaan ohjelmasta tulokset Exceliin ja käsitellään tuloksia sitä kautta. Selvitetään, kuinka eri muuttujat vaikuttavat hyötyihin, ja luodaan taulukkoarvoja, joilla säästettyä teräsmäärää voidaan arvioida.

2. LIITTOPALKIN TAIVUTUS

Kun palkki koostuu kahdesta päällekkäin asetetusta palkista a ja b eikä palkeilla ole liittovaikutusta, voidaan palkin kokonaistaivutusjäykkyys laskea kummankin palkin taivutusjäykkyyksien summana (1) (Peltomaa 2008, s. 15–17)

$$(EI)_{a+b} = (EI)_a + (EI)_b. \quad (1)$$

Kaavassa (1) $(EI)_{a+b}$ tarkoittaa palkkien kokonaisjäykkyyttä ilman liittovaikutusta, $(EI)_a$ tarkoittaa palkin a omaa jäykkyyttä ja $(EI)_b$ palkin b omaa jäykkyyttä. Jos palkkien a ja b välillä on liittovaikutus, Hartikaisen (2022, s. 24–26) mukaan saadaan palkkien yhteisjäykkyys kaavalla (2)

$$EI_{com} = E_a(I_a + y_a^2 A_a) + E_b(I_b + y_b^2 A_b), \quad (2)$$

kun kimmokerroin E on osa-alueittain vakio. kaavassa (2) EI_{com} tarkoittaa liittovaikutuksessa olevien palkkien taivutusjäykkyyttä. E_a tarkoittaa palkin a kimmokerrointa, I_a palkin a neliömomenttia, y_a palkin a pintakeskiön etäisyyttä kummankin palkin yhteisestä pintakeskiöstä ja A_a palkin a poikkipinta-alaa. Kyseiset merkinnät alaindeksillä b tarkoittavat palkin b kyseisiä arvoja. Näin esimerkiksi kahdelle identtiselle palkille liittovaikutuksella toimivan palkin jäykkyys on kolminkertainen verrattuna samaan tilanteeseen ilman liittovaikutusta.

Teräs–betoni-liittopalkin taivutuksen teoriana on hyödyntää betonin hyvää puristuslujuutta sekä teräksen hyvää vetolujuutta. Betoni asetetaan palkin puristuspinnaksi ottaen vastaan kaavan (3) mukaisen puristusjännityksen

$$R_c = b_{eff} h_c \cdot 0,85 f_{cd}, \quad (3)$$

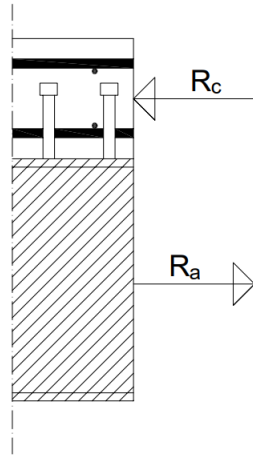
missä hyödyllinen leveys lasketaan kaavalla (4). Kaavassa (3) R_c tarkoittaa betonin jännitysresultanttia, b_{eff} liittopalkille laskettavan betonin poikkileikkauksen leveyttä, h_c betonilaatan kokonaispaksuutta ja f_{cd} betonin mitoittavaa puristuslujuutta.

$$b_{eff} = \min \left(2 \cdot \frac{J_p}{8}; J_l \right). \quad (4)$$

Kaavassa (4) J_p tarkoittaa palkin jänneväliä ja J_l laatan jänneväliä. Teräs asetetaan vastaanottamaan taivutuksesta aiheutunut vetojännitys, jonka suuruus lasketaan kaavalla (5)

$$R_a = f_{yd} A_a. \quad (5)$$

Kaavassa (5) R_a tarkoittaa teräsosan jännitysresultanttia ja f_{yd} teräksen mitoittavaa vetolujuutta.



Kuva 3. Liittopalkin sivuleikkaus ja sen taivutuksen laskennalliset rasitukset

Plastinen neutraaliakseli asettuu betonin puolelle, kun kaava (6) toteutuu

$$R_a < R_c. \quad (6)$$

Tällöin ajatellaan vain neutraaliakselin puristuspuolen betonin ottavan vastaan puristusta. Neutraaliakselin vetopuolella olevaa betonia ei lasketa vetolujuuteen vaan ajatellaan teräsosan kantavan koko vetojännityksen. Neutraaliakseli on teräsosan puolella, kun kaava (7) toteutuu

$$R_a > R_c. \quad (7)$$

Tällöin hyödynnetään neutraaliakselin puristuspuolella oleva teräs taivutetun liittopalkin puristuslujuuteen. Terästä hyödynnetään siis vetoon sekä puristukseen, mutta betonia hyödynnetään vain puristukseen. (Mela 2022, s. 29–31)

Näin ollen liittopalkin taivutuslujuus täytyy laskea eri tavoin riippuen siitä, kuinka kuormat palkkiin jakautuu. Tähän käytetään kaavaa (8)

$$M_{pl,Rd} = \begin{cases} R_a \cdot \left(e_i - h_l + \frac{h_c}{2} \right) + R_c \cdot \left(h_l - \frac{h_c}{2} \right) - \frac{(R_a - R_c)^2}{4 \cdot R_f} \cdot t_f, & \text{kun } R_c > R_a - 2 \cdot R_f \\ R_a \cdot \left(e_i + \frac{h_c}{2} \right) - \frac{R_a^2}{2 \cdot R_c} \cdot h_c, & \text{kun } R_c \geq R_a \\ R_a \cdot \left(e_i - h_l - t_f + \frac{h_c}{2} \right) + R_c \cdot \left(h_l + t_f - \frac{h_c}{2} \right) + R_f \cdot t_f - \frac{(R_a - R_c - 2 \cdot R_f)^2}{4 \cdot R_w} \cdot h_w \end{cases} \quad (8)$$

Kaavassa (8) $M_{pl,Rd}$ tarkoittaa liittopalkin taivutuslujuutta, e_i liittopalkin sisäistä momenttivartta, h_l liittolaatan kokonaispaksuutta, mikä on tässä työssä sama kuin betoni-
laatan kokonaispaksuus h_c . R_f tarkoittaa teräsosan laipan suurinta jännitysresultanttia, R_w teräsosan uuman suurinta jännitysresultanttia, t_f teräsosan laipan paksuutta ja h_w teräsosan uuman korkeutta. Pystysuuntaiseen leikkauslujuuteen otetaan huomioon vain teräsosan leikkauslujuus. Leikkauslujuus lasketaan siis yksinkertaisesti kaavalla (9)

$$V_{pl,Rd} = A_v \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}. \quad (9)$$

Kaavassa (9) $V_{pl,Rd}$ tarkoittaa liittopalkin leikkauslujuutta ja A_v leikkausta vastustavaa pinta-alaa. Lisäksi murtorajatilan mitoituksessa määritetään tarvittava leikkausliitinten määrä, palkin irti leikkautumisen estävä raudoitus sekä palomitoitus. (Peltomaa 2008, liite 7)

Käyttörajatilassa tarkistetaan, etteivät kaavan (10) sallitut jännitykset

$$\sigma_{sall} = \begin{pmatrix} 0,6 \cdot f_{ck} \\ 0,6 \cdot f_{ck} \\ f_{yk} \\ f_{yk} \end{pmatrix} \quad (10)$$

ylity betonissa eikä teräksessä. Seuraavaksi kaavalla (11) lasketaan koko liittopalkille aiheutuvat jännitykset

$$\sigma = \begin{pmatrix} \left| -\frac{M_{EK2}}{2 \cdot n_0 \cdot I_i(2 \cdot n_0)} \cdot e_{c0.el}(2 \cdot n_0) \right| \\ \left| \frac{M_{EK2}}{2 \cdot n_0 \cdot I_i(2 \cdot n_0)} \cdot (h_c - e_{c0.el}(2 \cdot n_0)) \right| \\ \frac{M_{EK2}}{I_i(2 \cdot n_0)} \cdot (h_l - e_{c0.el}(2 \cdot n_0)) \\ \frac{M_{EK2}}{I_i(2 \cdot n_0)} \cdot (h_a + h_l - e_{c0.el}(2 \cdot n_0)) \end{pmatrix}. \quad (11)$$

ja tarkastetaan, ettei kaavan (11) jännitykset ylitä kaavan (10) sallittuja jännityksiä. Kaavassa (11) M_{EK2} tarkoittaa liittopalkille tulevaa momenttia käyttörajatilassa, n_0 lyhytaikaisten kuormien vaikutusta ja $e_{c0.el}$ tarkoittaa leikkausliitoksen vaikutusta. Vektoriin tulee neljä eri jännitystä, mitkä kuvaavat jännityksiä liittopalkin eri kohdissa edellä

esitetyn mukaisesti $\begin{pmatrix} \textit{Betonilaatan yläpinta} \\ \textit{Betonilaatan alapinta} \\ \textit{Teräsosan yläpinta} \\ \textit{Teräsosan alapinta} \end{pmatrix}$.

Jokaista vektorin σ jännitystä vertaillaan samalla sijainnilla olevaan sallittujen jännitysten kohtaan. Jännitys ei saa missään kohdassa ylittää sen kohdan sallittua jännitystä. (Peltomaa 2008, liite 7)

Toinen vaihe käyttörajatilan mitoituksessa on varmistaa, etteivät taipumat ylitä sallittua arvoa. Kun liittopalkki rakennetaan tuettuna rakenteena, taipuma lasketaan pysyvien kuormien taipuman alkuarvon, kaava (12)

$$w_1 = \frac{5 \cdot L^4}{384 \cdot EI_0} \cdot (g_k \cdot k + g_a), \quad (12)$$

pysyvien kuormien pitkäaikaisosuuden, kaava (13)

$$w_2 = \frac{5 \cdot L^4}{384} \cdot \left(\frac{1}{EI_P} - \frac{1}{EI_0} \right) \cdot (k \cdot g_k + g_a), \quad (13)$$

sekä muuttuvien kuormien aiheuttamien taipumien, kaava (14)

$$w_3 = \max \left(\frac{5 \cdot L^4}{384 \cdot EI_0} \cdot \psi_1 \cdot k \cdot q_k, \frac{5 \cdot L^4}{384 \cdot EI_P} \cdot \psi_2 \cdot k \cdot q_k \right), \quad (14)$$

summana kaavalla (15).

$$w_{max} = w_1 + w_2 + w_3 \quad (15)$$

Tämän täytyy olla pienempää kuin sallittu taipuma. Kaavoissa (12), (13) ja (14) w tarkoittaa taipumaa, L palkin jänneväliä, EI_0 liittopalkin lyhytaikaisten kuormien taivutusjäykkyyttä, EI_P liittopalkin pitkäaikaisten kuormien taivutusjäykkyyttä, k suositellun jännitysrajatilan ominaisarvon pienennyskerrointa, g_k laatan omapainoa, g_a teräsprofiilin omapainoa, q_k hyötykuorman ominaisarvoa ja ψ kuormitusyhdistelmän pienennyskerrointa (Peltomaa 2008, liite 7)

3. MITOITUS

Palkkirakenne mitoitetaan eurokoodien SFS-EN 1992-1-1 + AC (2015), SFS-EN 1993-1-1 + AC (2005) ja SFS-EN 1994-1-1 + AC (2005) mukaisesti useilla eri lähtöarvoilla. Muuttujina mitoituksessa käytetään taulukon 1 arvoja. Muuttujalle valitaan tavanomaisen arvon lisäksi tavanomaiseen verrattuna pieni sekä suuri arvo. Hyötykuormalle valitaan arvoiksi tavanomainen toimistorakennuksen hyötykuorma sekä suuri hyötykuorma. Hyötykuorman oletetaan sisältävän myös ripustuskuorman. Näistä lähtöarvoista mitoitetaan jokainen mahdollinen kombinaatio.

Taulukko 1. Lähtöarvot

Muuttuja	Pieni	Tavanomainen	Suuri
Palkin jänneväli	5 m	7,5 m	10 m
Laatan jänneväli	5 m	7,5 m	10 m
Hyötykuorma		2,5 kN/m ²	5 kN/m ²
Betoni	C20/25	C30/37	C60/75
Rakenneteräs	S235	S355	S460

Kaikki mitoitukset tehdään eurokoodeja mukaillen murto- sekä käyttörajatilassa. Eurokoodista tehdään muutamia omia valintoja ja yksinkertaistuksia. Kaikki mitoitukset tehdään python-koodilla. Käydään hieman läpi, millaisia ratkaisuja kussakin vaiheessa käytettiin. Lisäksi käydään läpi tapausten mitoittavat tekijät. Lopuksi koodi tulostaa tarkasteltavat tulokset Exceliin. Tuloksia ovat

- käytetyt lähtöarvot
- laatan korkeus
- laatan betonimäärä neliötä kohden
- raudoitusterästen määrän kiloina neliötä kohden
- ilman liittovaikutusta olevan rakenteen valitun I-profiilin nimi
- ilman liittovaikutusta olevan I-profiilin paino metriä kohden

- ilman liittovaikutusta olevan rakenteen kokonaispaksuus
- liittopalkin I-profilin nimi
- liittopalkin I-profilin paino metriä kohden
- liittopalkin kokonaispaksuus.

Näillä tiedoilla suoritetaan tulosten vertailu Excelissä.

3.1 Teräsbetonilaatta

Laattaan vaikuttavia muuttujia ovat laatan jänneväli, betonin lujuusluokka sekä hyötykuorma. Siispä nämä valitaan muuttujiksi laatan mitoituspohjaan. Valitaan loput mitoitukseen tarvittavat lähtöarvot seuraavasti:

- Suojabetoni on 35 mm.
- Arvioitu pääteräksen halkaisija on 16 mm.
- Arvioitu jakoraudan halkaisija on 6 mm.
- Arvioitu laatan tehokas korkeus on $J/200$.

Mitoituksessa jätetään huomioimatta välipohjan minimipaksuus 150 mm sekä hyötykuormalle ei tehdä pinta-alavähennystä. Laattaa ei myöskään palomitoiteta. Laatan leikkausmitoitus suoritetaan leikkausraudoittamattomalle laatalle, koska leikkausraudoitetun laatan minimipaksuus on 200 mm (SFS-EN 1992-1-1 + AC 2015, s. 157). Taipumalle sallitaan maksimiarvoksi $J/400$. Mitoitus suoritetaan metrin kaistaleelle kerrallaan, ja oletetaan, että jokainen metrin kaistale on identtinen.

Kuormien laskentaan käytetään Seppäsen (1980, s. 70) mitoitus-taulukoita, missä momentti lasketaan kaavalla (16)

$$M = kql^2 \quad (16)$$

ja leikkausvoima kaavalla (17)

$$Q = k'ql. \quad (17)$$

Kaavassa (16) k tarkoittaa Seppäsen (1980, s 70) taulukoimaa kerrointa momentille. Kaavassa (17) k' tarkoittaa Seppäsen (1980, s 70) taulukoimaa kerrointa leikkausvoimalle. Maksimitaipumaa arvioidaan kaavalla (18)

$$v_{max} = \frac{(0,540 g_{Ed} + 0,92q_{Ed}) \cdot l^4}{100 \cdot EI} \quad (18)$$

Seppänen (1980, s. 70). Kaavassa (18) otetaan huomioon mitoittava kuormitustilanne, missä hyötykuorma vaikuttaa vain yhdellä puolella palkkia. Muut kaavat eivät ota tätä

huomioon, mutta mitoituksessa kaavaa sovelletaan määräävälle kuormitustilanteelle sopivaksi.

Ohjelma lähtee mitoittamaan ja raudoittamaan laattaa lähtöarvoilla. Kun jokin mitoitus-ehdoista ei toteudu, lisätään laatan tehollista korkeutta 10 mm. Mikäli tehollista korkeutta joudutaan lisäämään, kasvaa laatan omapaino. Tällöin täytyy tarkistaa, että laatta kestää vielä uudella omalla painolla. Näinpä koodi jatkaa mitoitusilmukkaa, kunnes laatan tehollista korkeutta ei enää tarvitse lisätä. Tehollisen korkeuden mitoittavaksi tekijäksi tulee keskenään tasaisesti taivutusrasitus, leikkausrasitus ja jännitysten rajoittaminen. Vaikka taipuman raja-arvon asettaa $Jl/400$, ei taipumasta tule määräävä mitoittava tekijä.

Seuraavaksi koodi laskee tarvittavan pää- sekä jakoraudoituksen määrän ylä- ja alapintaan. Ohjelma valitsee sopivan teräskoon ja teräsjaon siten, että teräsjako on 100–250 mm. Mitoitetusta laatasta tallennetaan tuloksena keskipalkille siirtyvä tukivoima eri mitoitus-tilanteissa, raudoitusteräksen määrä kilogrammoina neliometriä kohden, betonin kuutiomäärä neliometrillä sekä laatan kokonaiskorkeus.

3.2 Teräspalkki

Teräspalkin mitoittamiseen vaikuttavat kaikki luvun 1.1 lähtöarvoina annetuista muuttujista. Teräspalkin mitoittavassa ohjelmassa tilanne kuitenkin yksinkertaistetaan valmiiksi mitoitetun laatan avulla. Laatan mitoittava ohjelma antaa tuloksena jokaisen laatan keskituen tukireaktion. Tähän sisältyy jo valmiiksi muuttujista laatan jänneväli, betonin lujuusluokka sekä hyötykuorma. Siispä teräspalkin mitoittavaan ohjelmaan tarvitaan lähtötietoina vain laatalta tulevat tukireaktiot, teräksen lujuus ja palkin jänneväli. Ohjelma mitoittaa jokaisen teräksen lujuuden ja palkin jännevälin kombinaation jokaiselle laatalle, eli 9 erilaista palkkia jokaiselle laatalle. Palkille maksimitaipumaksi on asetettu $Jl/400$, eikä palkkia palomitoiteta.

Teräspalkille taivutuslujuus lasketaan kaavalla (19)

$$M_{c,Rd} = W_{pl} \cdot f_{yd} , \quad (19)$$

missä W_{pl} on teräspalkin plastinen taivutusvastus. Leikkauslujuus lasketaan kaavalla (9) ja maksimitaipuma kaavalla (20)

$$v = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_k \cdot J_p^4}{EI} . \quad (20)$$

Taipumaan ei oteta huomioon palkin omaa painoa, koska palkki suunnitellaan esikoroituksella. Taipuman kuormitusyhdistelmät lasketaan käyttörajatilassa kaavan (21) mukaisesti

$$q_k = 1.25 \cdot (g_{Ek} + q_{Ek}) \cdot J_l. \quad (21)$$

Kaavassa (21) g_{Ek} tarkoittaa laatan omapainoa. Nämä ovat palkin pinta-alalle tulevia tasokuormia. Kertoimilla 1.25 ja J_l saadaan keskimmäisen palkin aiheuttama tukireaktio laatalle viivakuormana. Kyseinen tukireaktio on yhtä suuri kuin laatan aiheuttama voima palkille.

Palkin mitoitus suoritetaan sovittamalla jokaista IPE- ja HE-poikkileikkausta palkiksi. Kun kyseinen palkki täyttää kaikki mitoitusehdot, otetaan palkin tiedot talteen. Kaikista mitoitusehdon täyttäneistä palkeista valitaan se, jolla on pienin poikkipinta-ala. Näin saadaan mahdollisimman kevyt rakenneteräs. Taipuma on mitoittavana tekijänä kaikille tapaukselle. Ohjelma antaa tuloksena valitun I-profiilin nimen, - korkeuden sekä - painon metriä kohden.

3.3 Liittopalkki

Liittopalkki tarvitsee lähtöarvoina paljon enemmän tietoa verrattuna aiempiin tapauksiin. Lähtöarvoina annetaan

- laatan jänneväli
- laatan kokonaispaksuus
- betonin lujuus
- teräksen lujuus
- palkin jänneväli
- laatalta tuleva kuorma.

Liittorakenne mitoitetaan täydellisellä leikkausliitoksella ja rakentamisen aikana tuettuina 2 metrin välein. Näin teräspalkkia ei tarvitse mitoittaa työn aikaisille kuormille. Pystysuuntainen leikkausvoima oletetaan menevän vain teräspalkille. Irti leikkautumisen estävää raudoitusta ei lisätä erikseen, koska niiden lisääminen ei aiheuta merkittävää muutosta raudoitusterästen kokonaismäärässä. Liittotappien määrää ei optimoida, koska tässä työssä ei tarkastella tappien kiinnittämisen hintaa. Tappien paino otetaan kuitenkin rakenneteräksen painoon mukaan. Taipuman maksimiarvoksi valitaan *Jl/400* välipohjarakenteen ohjeen mukaisesti.

Mitoituksessa käytetään apuna Peltomaan (2008, Liite 7) laskuesimerkkiä. Siinä tarkastellaan muuten samanlaista tilannetta kuin tässä työssä, mutta siinä käytetään liitto-laattaa. Epäselvissä kohdissa verrataan tietoa Dujmovicin et. al. (2015) laskuesimerkkeihin.

Liittopalkin mitoitus suoritetaan samaan tyyliin teräspalkin kanssa, eli silmukalla jokaisen IPE- ja HE-profiilin läpikäymisellä. Laatta oletetaan samaksi kuin teräspalkilla. Silmukassa koodi tekee mitoitus murto- sekä käyttörajatilassa. Valitaan mitoitusehdon täyttäneistä I-profiileista se, jolla on pienin poikkipinta-ala. Taipuma tulee mitoittavaksi tekijäksi noin 90 % tapakusista sekä taivutuskestävyys noin 10 % tapauksista.

Jos otettaisiin rakentamiskustannukset huomioon, voisi olla hyödyllistä tarkastella myös tarvittavien leikkausliitinten määrää I-profiilia valittaessa. Profiilin korkeus on yksi määrittävistä tekijöistä tarvittavien liittimien määrän valinnassa. Korkeus vaikuttaa suuresti siihen, kuinka suuren vaakasuuntaisen leikkausvoiman liittimet joutuvat ottamaan vastaan. Tästä syystä matalampi HE-profiili voikin olla edullisempi kuin kevyempi, mutta korkeampi IPE-profiili. Ohjelmasta tuloksena annetaan valitun teräsprofiilin nimi, - korkeus, - paino, sekä liittimien kokonaispaino.

4. MUUTTUJIEN VAIKUTUS SÄÄSTÖIHIN

Tulokset koitetaan suhteuttaa, että niitä olisi mahdollisimman helppo yleistää. Materiaalimääriä ei olisi järkevä tarkastella kokonaismateriaalimäärinä, koska niitä ei pystyisi vertailla enää keskenään jännevälien muuttuessa. Siispä teräspalkin painoa tarkastellaan yksikössä kg/m , betonimäärä tarkastellaan yksikössä m^3/m^2 , ja raudoitusteräsmäärää yksikössä kg/m^2 . Betonin yksikkö, kuutiota neliömetrille, näyttää siltä, että sen voisi sieventää yksikköön m , mikä kuvaisi laatan korkeutta. Betonin tilavuudesta kuitenkin vähennetään raudoitusten tilavuus, joten se ei vastaa enää laatan korkeutta. Tästä syystä kuvaavampi yksikkö on betonin tilavuus neliometriä kohden.

4.1 Tavanomainen yksittäistapaus

Tutustutaan ensimmäisenä yhden tilanteen tuloksiin, jotta ymmärretään paremmin, kuinka tulosten tilastot lasketaan. Valitaan tarkasteltavaksi yksittäistapaukseksi mahdollisimman tavanomainen tilanne taulukon 2 mukaisesti.

Taulukko 2. Valitun yksittäistapauksen lähtöarvot

	Laatan jänneväli	Palkin jänneväli	Betoni	Rakenne- teräs	Hyöty- kuorma
Lähtötiedot	7,5 m	7,5 m	C30/37	S355	2,5 kN/m ²

Hyötykuormaksi valitaan 2,5 kN/m², koska se on oletettu laskennoissa tavanomaisen toimistorakennuksen hyötykuormaksi. Jatkossa, kun viitataan tiettyyn yksittäistapaukseen, viitataan siihen sen lähtötiedoilla muodossa "[J_i; J_p; f_{ck}; f_{yk}; q_{EK}]" ilman yksiköitä. Tähän yksittäistapaukseen viitattaisiin muodossa [7,5; 7,5; 30; 355; 2,5].

Taulukko 3. Teräsbetoni-laatan vertailuun käytettävät tiedot

Kokonaispaksuus	161 mm
Betonimäärä	0.1575 m ³ /m ²
Raudoitusteräsmäärä	27.2 kg/m ²

Taulukon 2 lähtöarvoilla laatan mitoituksesta saadaan taulukon 3 mukainen teräsbetoni-laatta. Taulukosta 3 on helppo huomata betonimäärän ja kokonaispaksuuden ero. Raudoitusteräsmäärä lasketaan ohjelmassa taulukon 4 mukaisten raudoitusvalintojen kokonaispoikkipinta-alasta. Poikkipinta-ala kerrotaan yhdellä metrillä, jotta saadaan raudoituksen tilavuus yhdellä neliömetrillä.

Taulukko 4. Laatan raudoituksen tarkat tiedot

Raudoitus	Pääteräs	Jakoraudoitus
<i>Yläpinta</i>	T16 k110	T8 k125
<i>Alapinta</i>	T16 k200	T8 k200

Teräkselle käytetään tiheytenä $\rho_s = 7850 \text{ kg/m}^3$ massan määrittämiseen. Raudoitus oletetaan samanlaisena koko laatalle yksinkertaisuuden vuoksi. Raudoitus yläpintaan mitoitetaan kestävämmän momentti keskituella ja raudoitus alapintaan kestävämmän momentti kentässä. Laattaan jää siis laskennallisesti enemmän raudoitusterästä kuin tarvitsisi, mutta voidaan ajatella tämän korvaavan puuttuvaa irti leikkautumiseen käytettävää raudoitusta.

Taulukko 5. Palkkien I-profiilien tulokset ja vertailu

	Ilman liittovaikutusta	Liittovaikutuksella	Säästö	Suhteutettu säästö
<i>I-profiili</i>	IPE 600	IPE 450		
<i>Teräksen paino</i>	122,5 kg/m	77,6 kg/m	44,9 kg/m	37 %
<i>Rakenteen kokonaispaksuus</i>	761 mm	611 mm	150 mm	20 %

Taulukossa 5 rakenteen kokonaispaksuus kuvaa palkin sekä laatan yhteen laskettua korkeutta. Säästö lasketaan ilman liittovaikutusta olevan rakenteen ja liittovaikutuksella toimivan rakenteen erotuksena. Tämän jälkeen suhteutettu säästö lasketaan säästön ja ilman liittovaikutusta suunnitellun rakenteen osamääränä.

4.2 Säästöt

Tarkastellaan mitoituksesta saatuja ääriarvoja sekä keskiarvoja. Taulukosta 6 on hyvä huomioida, ettei säästetty määrä ja suhteellinen säästetty määrä ole aina samasta tapauksesta. Vaikka säästö olisi suurin mahdollinen, ei sen suhteellinen säästö ole välttämättä suurin. Keskimääräiset säästöt lasketaan kaikkien säästömäärien keskiarvona, eikä mediaanina. Lisäksi ääriarvot kuvaavat säästetyn teräsmäärän vaihteluväliä. Näin saadaan tarkempaa käsitystä tulosten hajonnasta.

Taulukko 6. Liittopalkilla säästetty teräsmäärä ja rakennekorkeus

	Säästö	Suhteellinen säästö
<i>Keskimääräinen säästetty teräsmäärä</i>	42 kg/m	32 %
<i>Säästetyn teräsmäärän vaihteluväli</i>	13–113 kg/m	18–53 %
<i>Keskimääräinen säästetty rakenne- korkeus</i>	130 mm	17 %
<i>Säästetyn rakennekorkeuden vaihteluväli</i>	40–300 mm	5–26 %

Kaikissa tilanteissa tarkastellaan säästettyä teräsmäärää sekä rakennekorkeutta. Vaikka rakennekorkeus ei olisi mitoituksessa merkityksellinen, on sen tarkastelusta hyötyä. Tämä johtuu siitä, että rakenneteräksen paino riippuu poikkileikkauksen pinta-alasta, mikä on toisen asteen riippuvuus palkin mitoista, kun taas rakenteen korkeudella riippuvuus on ensimmäistä astetta. Näin saadaan näkökulmaa myös yhden asteen pienemmistä riippuvuuksista, mikä voi helpottaa tulosten tulkitsemista.

Tapauksia, missä teräsmäärän säästöt ovat pienimmillään, yhdistää pieni laatan jänneväli (5 m), suuri betonin lujuus (C60/75), pieni hyötykuorma (2.5 kN/m²) sekä pieni palkin jänneväli (5 m). Näistä kaikilla teräsmäärän säästö on 13 kg/m, mutta suhteellinen säästö lähes jokaisessa 27 %. Tämä on vain 5 prosenttiyksikköä vähemmän kuin kaikkien tapausten suhteellisen säästön keskiarvo. Näissä tapauksissa valitut teräsprofiilit ilman liittovaikutusta ovat IPE 330 ja liittovaikutuksella IPE 270. Poikkileikkaukset ovat siis valmiiksi jo melko pieniä, eikä poikkileikkaus muutu paljoa pienemmäksi liittovaikutuksella. Tuloksia voi tarkastella liitteestä A.

Näiden tapausten säästetty rakennekorkeus on 60 mm ja suhteellinen koko rakenteen korkeuden säästö on 14 %. Tämä on hieman pienempää luokkaa kuin koko joukon keskimääräinen suhteellinen säästö. Rakennekorkeuden suhteellinen säästö on pienimmillään, kun rakenne ilman liittovaikutusta tarvitsee juuri ja juuri IPE-profiilin suurinta profiilia suuremman profiilin, mutta liittovaikutuksella voidaankin käyttää vielä IPE-profiilia. Tällöin ilman liittovaikutusta käytetään HE profiilia, mikä on matalampi profiili.

Mikäli suhteellinen korkeuden säästö laskettaisiin itse teräksen korkeudelle, arvot olisivat huomattavasti suurempia. Tämä ei kuitenkaan ota huomioon koko välipohjan skaalaa, ja sitä kautta liioittelee säästöjä kokonaisuuteen verrattuna. Tämä on hyvä ymmärtää, koska suhteellista teräsmäärän säästöä tarkastellaan tällä liioitellulla arvolla, eikä se kovinkaan hyvin kuvaa koko välipohjarakenteen säästöjä. Suhteellisia arvoja hyödyntäessä täytyy siis miettiä tarkkaan, mihin niitä voi yleistää.

Tapauksessa [10; 10; 20; 460; 2,5] teräsmäärän säästöt ovat suurimmillaan. Tapaus on ainoa, joka erottuu selkeästi joukosta, sillä sen säästämä teräsmäärä on 112,4 kg/m, ja seuraavaksi suurin säästetty teräsmäärä on 87 kg/m. Tapauksessa HE 800 B profiili saadaan vaihdettua HE 700 AA profiiliin liittovaikutuksen seurauksena. Tämän tapauksen säästetty rakennekorkeus on 130 mm, ja suhteellinen säästetty korkeus on 12 %. Vaikka tilanteessa säästetään terästä eniten, rakennekorkeus muuttuu vain keskimääräisen korkeuden muutoksen verran. Suhteutettuna vielä selkeästi keskivertoa vähemmän.

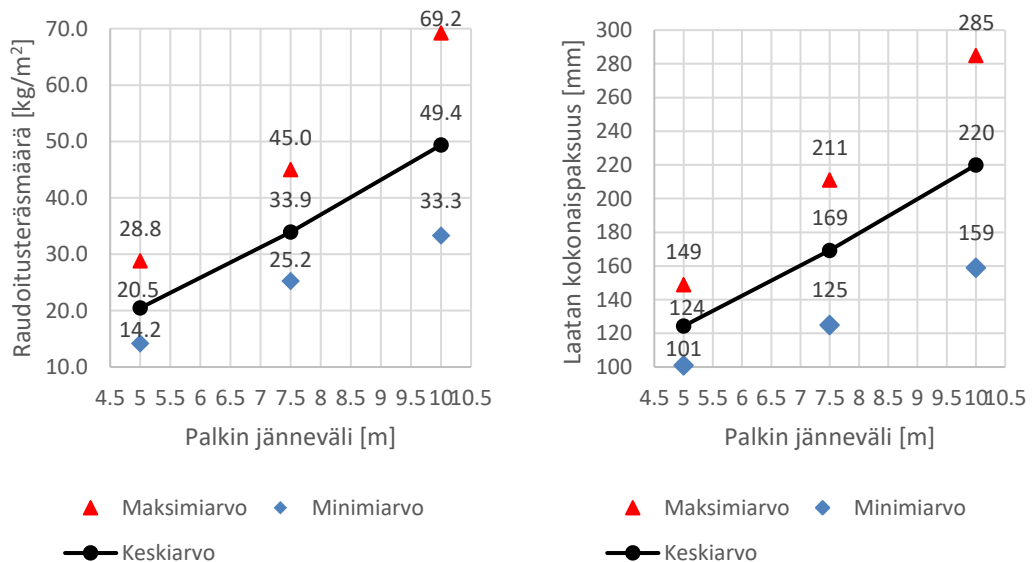
4.3 Yhden muuttujan vaikutus

Seuraavaksi tarkastellaan, kuinka jokainen muuttujista vaikuttaa säästettyyn materiaalmäärään sekä säästettyyn kokonaiskorkeuteen. Yhden muuttujan vaikutusta tarkastellaan mitoittamalla yhdelle muuttujan arvolle jokainen mahdollinen muiden muuttujien kombinaatio. Tämä tehdään ensin kyseisen muuttujan pienelle lähtöarvolle, tämän jälkeen normaalille ja sitten suurelle arvolle. Näin saadaan kolme eri mitoitusjoukkoa, joiden sisällä tarkasteltava muuttuja pysyy vakiona. Näin ryhmien ainoa ero on tarkasteltava muuttuja. Hyötykuormalle joukkoja tulee vain kaksi.

Ryhmiä verrataan ottamalla jokaisesta ryhmästä omia keskiarvoja ja ääriarvoja, joilla voidaan kuvata ryhmän sisäistä yleistä käyttäytymistä sekä ryhmän sisäistä vaihteluväliä. Näin saadaan hyvä kuva tulosten muuttujan yleisestä vaikutuksesta sekä tulosten hajonnasta.

4.3.1 Laatan jänneväli

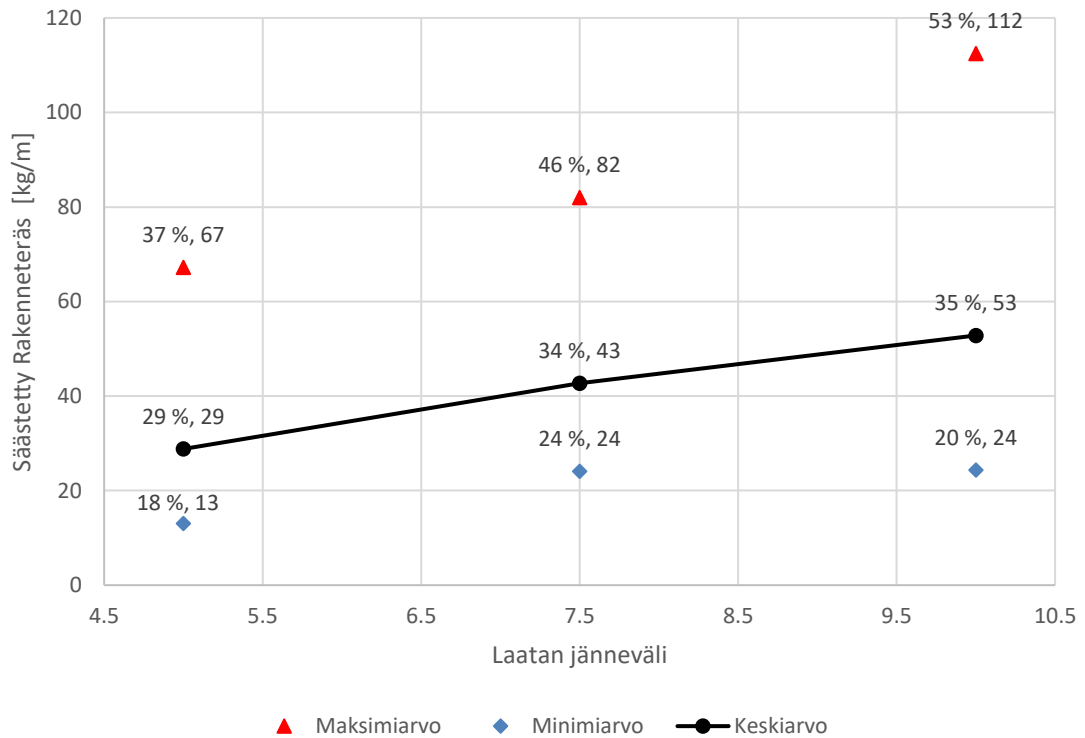
Laatan jänneväli vaikuttaa palkille tulevan kuorman pinta-alaan. Siten suuremmalla jännevälillä palkille tulee suuremmalta alalta laatan omapainoa sekä hyötykuormaa. Jokaiselle jännevälille on 6 erilaista laskentatapausta.



Kuva 4. Laatan jännevälän vaikutukset mitoitetulle laatalle

Pinta-alan lisäksi kasvaa tarvittava teräsmäärä, sekä laatan paksuus kuvan 4 mukaisesti. Mitä pidempi jänneväli on, sitä suurempaa on paksuuden ja teräsmäärien hajonta. Laatan jännevälän eri tekijät vaikuttavat kaikki palkin kuormitukseen.

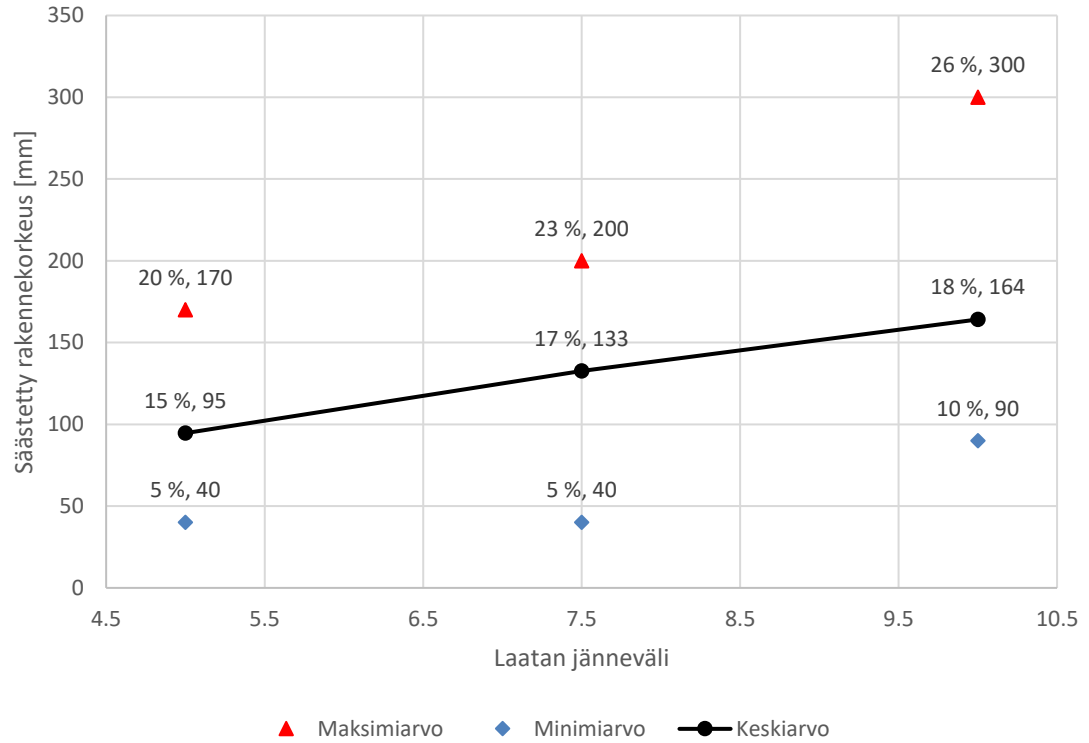
Kuvasta 5 voidaan päätellä, että jänneväli ei vaikuta lineaarisesti laatan paksuuteen. Tämä on kuitenkin oletettavaakin, kun tarkastellaan kaavaa (16) ja kaavaa (18). Näissä jänneväli vaikuttaa kuormitukseen toisella ja neljännellä potenssilla. Kuorman pinta-alaan laatan jänneväli vaikuttaa lineaarisesti.



Kuva 5. Laatan jännevälin vaikutus säästettyyn rakenneteräsmäärään

Kuvasta 5 keskiarvoa tulkittaessa voidaan päätellä, että yleistettynä tapauksena suuremmalla laatan jännevälillä säästetään koko ajan enemmän rakenneterästä liittorakennetta käytettäessä. Rakenneterästä säästetään suhteellisestikin enemmän suuremmalla jännevälillä.

Säästöjen kuvaajissa esitetään pisteiden tietona todellinen arvo sekä suhteellinen arvo. On kuitenkin hyvä huomioida, että raja-arvoissa annettu suhteellinen arvo ei kuvaa kyseisen todellisen arvon suhteellista arvoa. Suhteellinen arvo kuvaa kyseisen tarkastelujoukon suhteellisten arvojen ääriarvoa. Ääriarvoista ei siis voi yleistää suoraan, että suurimmat todelliset säästöt olisivat suoraan suurimpia suhteellisia säästöjä. Näin on tehty, jotta saadaan parempi kuva suhteellisten säästöjen vaihteluvälistä ja hajonnasta.

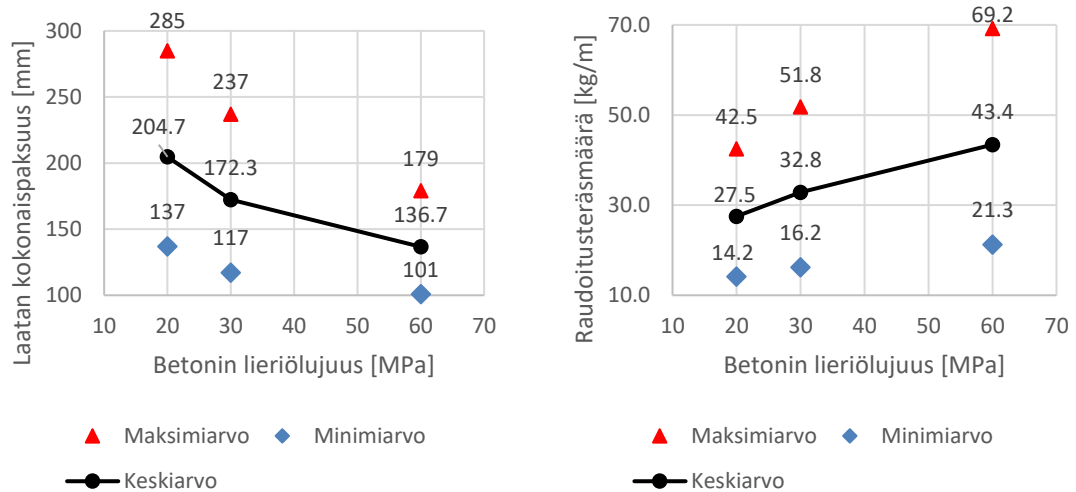


Kuva 6. Laatan jännevälän vaikutus säästettyyn rakennekorkeuteen.

Kuvasta 6 nähdään, että rakennekorkeutta säästetään koko ajan enemmän suuremmalla laatan jänneväliillä. Ääriarvot näyttäisivät seuraavan paraabelia, mutta keskiarvon kuvaaja näyttää enemmän lineaariselta kuin paraabelilta.

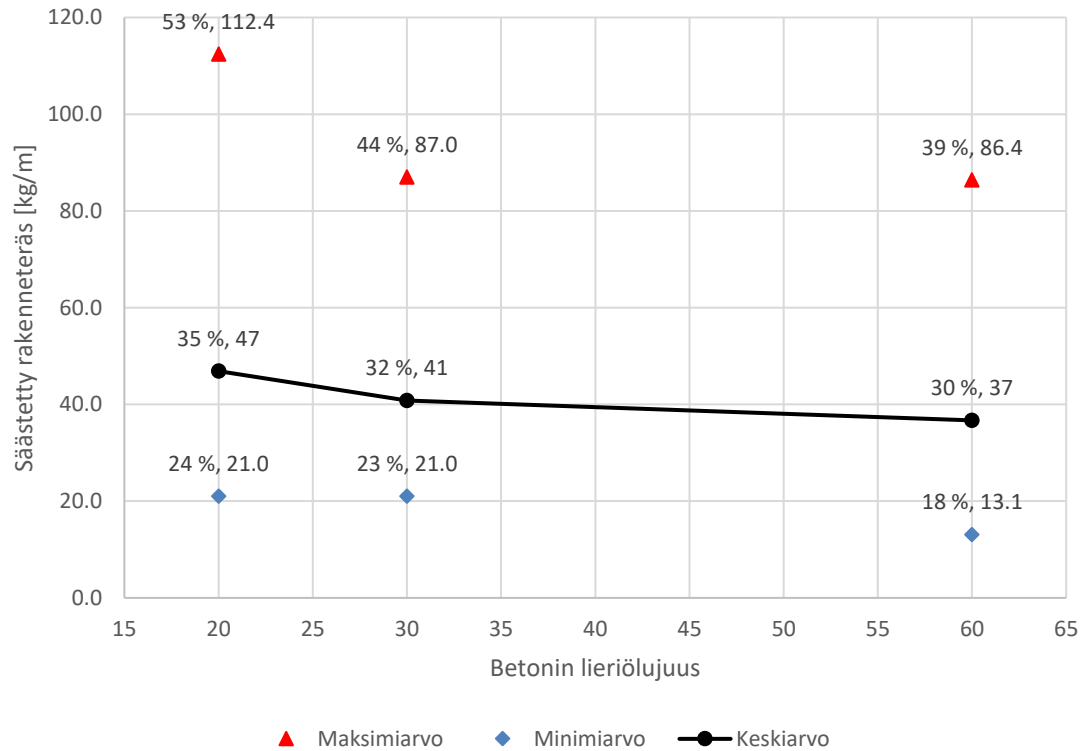
4.3.2 Betonin lujuus

Suuremmalla betonin lujuudella betonilaatan minimipaksuus pienenee merkittävästi, mutta tarvittava teräsmäärä kasvaa. Minimipaksuuden määrittää yleisimmin ylliraudoituksen tarkistava mitoitusehto.



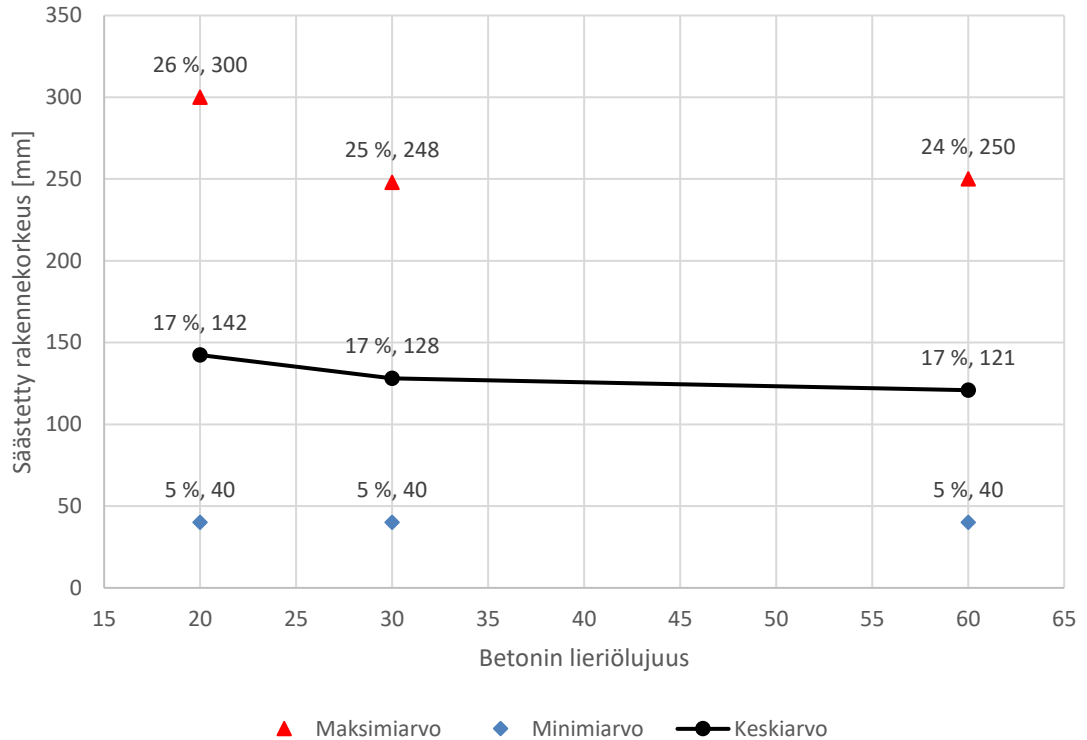
Kuva 7. Betonin lujuuden vaikutukset mitoitetulle laatalle

Palkille betonin lujuuden kasvaminen näkyy kuorman pienentymisenä. Ohuin laatta, mitä käsitellään, on 101 mm paksu. Tämä kannattaa ottaa huomioon vertaillessa tuloksia todellisen välipohjan mitoitukseen, sillä usein suositeltava minimipaksuus betoniselle välipohjalle on 150 mm luokkaa. C60/75 betonista suunnitelluille laatoille keskipaksuuskin on tämän alle.



Kuva 8. *Betonin lujuusluokan vaikutus säästettyyn rakenneteräkseen*

Kuvasta 8 nähdään, ettei lujuuden kasvattaminen vaikuta paljoakaan rakenneteräksen säästöihin. Nähdään kuitenkin, että lujuuden kasvattaminen pienentää hieman säästettyä teräsmäärää. Suhteelliset säästötkin pienentyvät hieman. Merkittävin muutos kuvaajassa tapahtuu, kun mennään pienimpään lujuusluokkaan. Kuvan 9. säästetyn rakenneteräksen korkeuden kuvaaja näyttää lähes identtisesti säästettyyn rakenneteräkseen verrattuna.



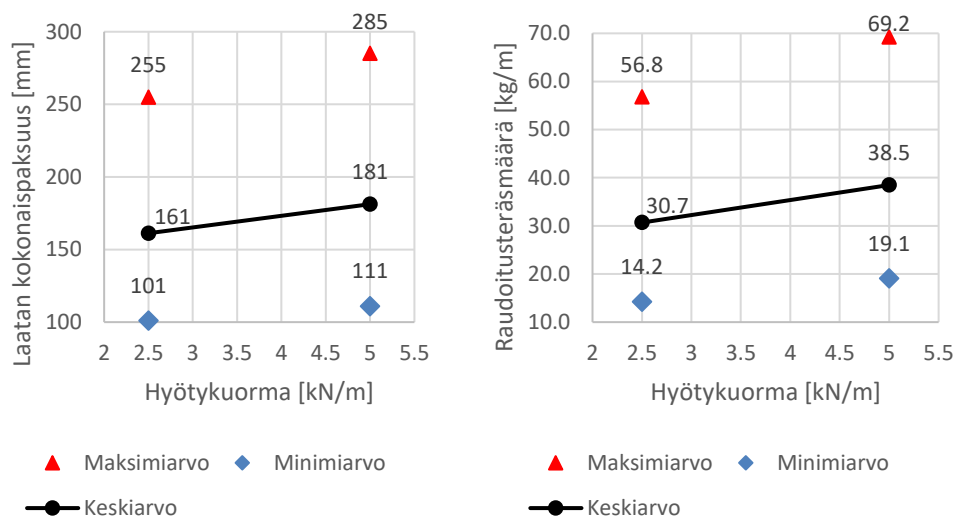
Kuva 9. Betonin lujuusluokan vaikutus säästettyyn rakennekorkeuteen

Betonin lujuus vaikuttaa liittolaatan lujuuteen, mutta ei vaikuta teräspalkin lujuuteen ilman liittovaikutusta. Tästä syystä olisi loogista, että liittopalkki hyötyy koko ajan enemmän suuremmasta betonin lujuudesta. Todellisuudessa asia ei olekaan aivan näin suoraviivainen. Kun kaikki muuta muuttujat ovat vakioita, ja vain betonin lieriölujuutta lähdetään muuttamaan, muuttuu myös plastisen neutraaliakselin korkeus.

Jos neutraaliakseli on jo pienemmällä lujuudella betonin puolella, ei suuremmasta betonilujuudesta ole enää hyötyä. Tämä johtuu siitä, että neutraaliakseli asettuu aina siten, että vetoresultantti ja puristusresultantti pysyvät tasapainossa. Koska betonin lujuus lisää vain puristusresultantin mahdollista kapasiteettia eikä vaikuta vetopuolelle, siirtyy neutraaliakseli sen verran ylöspäin, että betonin puristusresultantti pysyy yhtä suurena kuin vetoresultantti. Betonin lujuus ei vaikuta vetoresultanttiin, joten sitä kautta myös puristusresultantti pysyy samana. Tällöin palkin teräsosaakin täytyy muuttaa, jotta liittopalkin hyödyt tulevat paremmin esille.

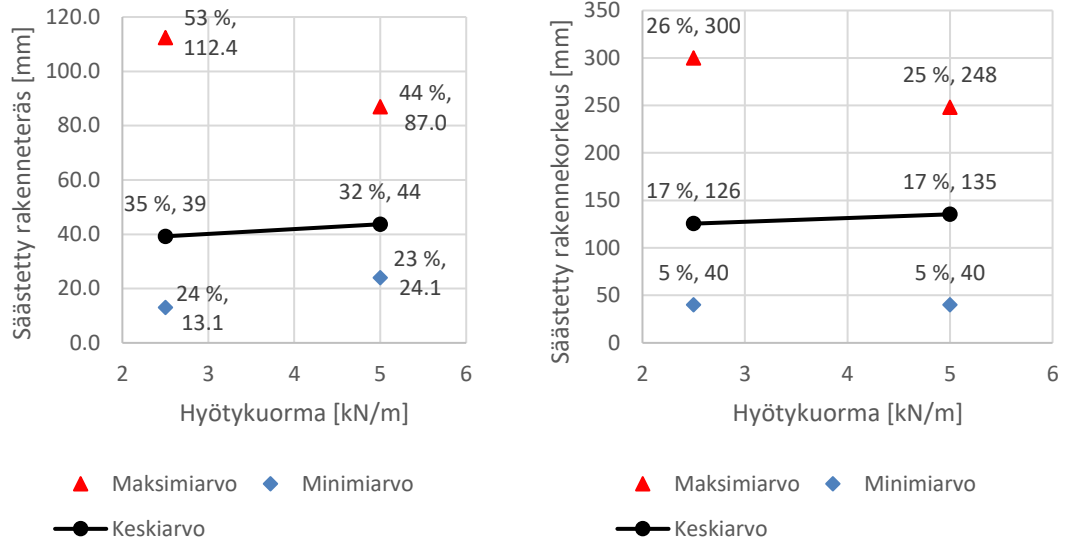
4.3.3 Hyötykuorma

Hyötykuorma vaikuttaa laatan paksuuteen lineaarisesti. Näin hyötykuorman voidaan olettaa vaikuttavan palkillekin tuleviin kuormiin lineaarisesti. Hyötykuorman vaikutus säästettyyn teräsmäärään ei kuitenkaan aluksi näytäkään niin intuitiiviselta kuin kuvittelisi. Aiemmissa tapauksissa kuorman arvoa nostettaessa säästöjen määrä kasvaa, ja kuormia pienentäessä säästöt pienentyvät.



Kuva 10. Hyötykuorman vaikutus mitoitetulle laatalle

Kuvassa 10 hyötykuormalla $2,5 \text{ kN/m}^2$ saadaan sekä suurin sekä pienin hyöty. Kun tilannetta tarkastellaan kuitenkin tarkemmin, huomataan suurimman tuloksen olevan erillinen yksittäistapaus. Toiseksi suurin säästetty rakenneteräsmäärä samalla hyötykuormalla on $86,4 \text{ kN/m}^2$. Tällöin kaikki arvot asettuvat oletettuun järjestykseen, missä suuremmalla kuormalla saadaan suurempi säästö. Todennäköisimmin kyseisessä yksittäistilanteessa ilman liittovaikutusta on menty vain hieman jonkun mitoitus ehdon yli, ja on jouduttu valitsemaan paljon suurempi poikkileikkaus. Tämän jälkeen liittopalkille on voitu saada käyttöaste erittäin lähelle 100 %. Hyötykuorman vaikutus rakennekorkeuden säästöissä on hyvin saman tyylinen.

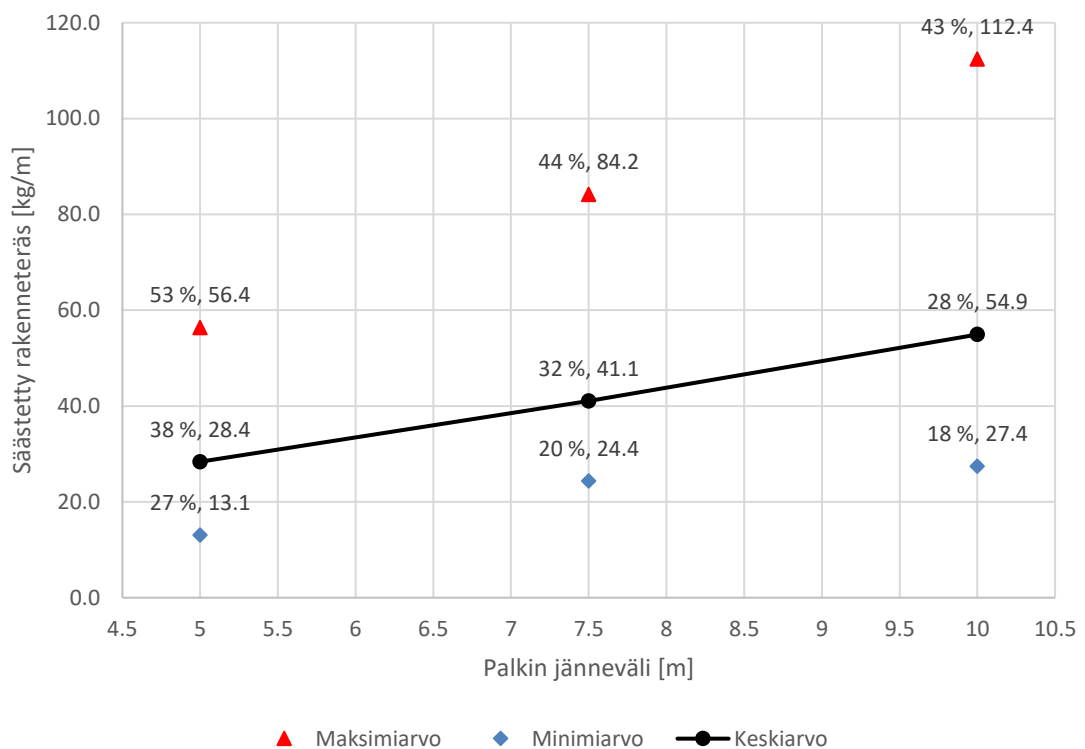


Kuva 11. Hyötykuorman vaikutus liittopalkin hyötyihin

Hyötykuorman keskimääräiset suhteelliset arvot ovat lähes identtiset kaikkien rakenteiden suhteellisen säästön keskiarvojen kanssa. Tästä voidaan vetää raaka yksinkertaistus, ettei hyötykuormalla ole mitään merkitystä liittopalkin suhteellisia hyötyjä tarkasteltaessa. Tämä tarkoittaa, että todelliset hyödyt ovat täysin lineaarisia verrattuna hyötykuormaan.

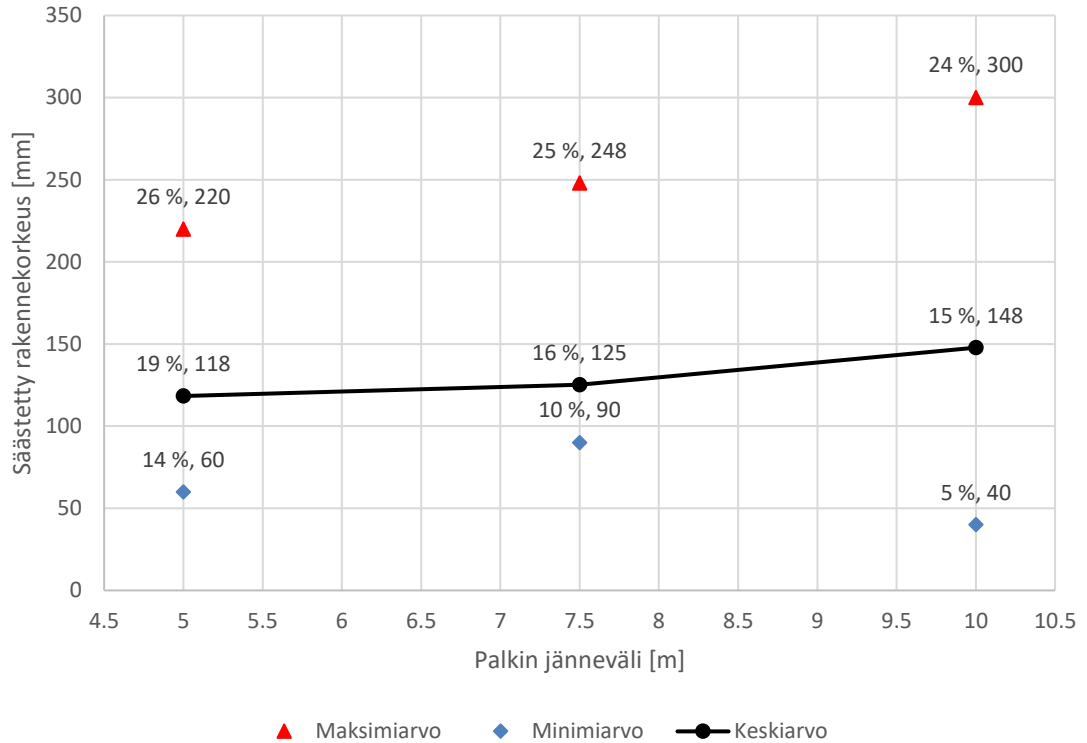
4.3.4 Palkin jänneväli

Palkin mitoittavan momentin määrittäminen tapahtuu toisen ja taipuman määrittäminen neljännen asteen lausekkeen avulla palkin jänneväliä koskien. Tästä voidaan suoraan päätellä, että palkin jänneväli vaikuttaa merkittävästi, jos ei merkittävimmin kaikista muuttujista, palkin mitoitukseen. Samoin kuin laatan jänneväli, palkin jänneväli vaikuttaa betonin tehokkaan puristuspuoleltaan. Tällöin olisi loogista, että pidemmällä jännevälillä myös hyödyt ovat suurempia.



Kuva 12. Palkin jännevälin vaikutus säästettyyn rakenneteräksen määrään

Kuvasta 12 kuitenkin huomataan, vaikka säästetty teräsmäärä kasvaa, suhteellinen säästetty teräsmäärä pienenee merkittävästi jännevälin kasvaessa. Tilanteet missä suhteelliset säästöt ovat suurimmillaan tapahtuvat, kun laatan paksuus on suurimmillaan sekä palkin jänneväli pienimmillään ja teräksen lujuus suurimmillaan. Tällöin kuormasta muuttuva osuus kantavaksi rakenteeksi on suurimmillaan verrattuna teräsprofiilin kokoon. Plastinen neutraaliakseli on todennäköisimmin betonin puolella näissä tilanteissa, jolloin tarvitaan juuri ja juuri vetopuolen jännitykset kestävä teräsraakenne.

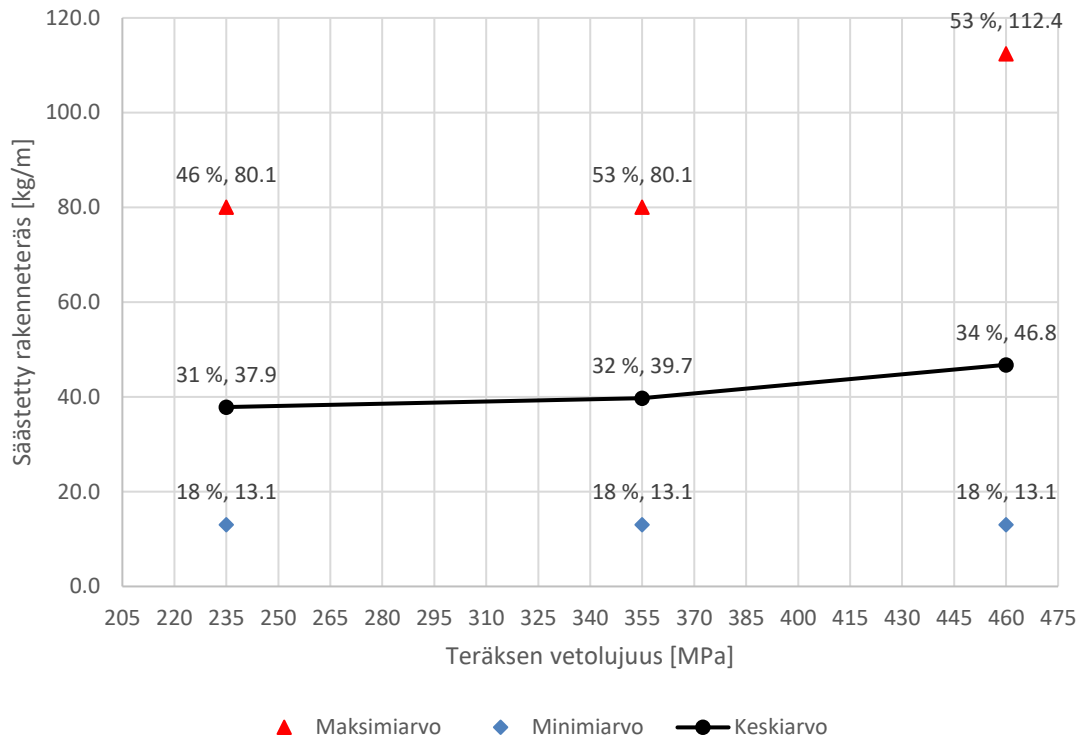


Kuva 13. Palkin jännevälin vaikutus säästetyn rakenneteräksen määrään

Vaikka suhteellinen hyöty pienenee jännevälin kasvaessa, on myös hyvä huomioida, ettei ilman liittovaikutusta suunnitellut teräspalkit riitä enää kantamaan kuormia, kun jänneväli kasvaa reilusti yli kymmeneen metriin. Jo 10 m jännevälilläkin joudutaan käyttämään HE 1000 AA profiilia raskaammilla kuormitusyhdistelmillä. Tämä saatiin vaihdettua profiiliin HE 700 AA, käyttämällä liittovaikutusta. Suurimmat profiilit, mitä mitoitukseseen löydettiin, olivat HE 1100 M ja HE 1100 R. Mitoituksessa käytetyt profiilit eivät ole enää kaukana standarditeräsprofiilien ylärajasta. Kun nämä ylitetään, riittää liittopalkit vielä jonkin matkaa pidemmälle.

4.3.5 Teräksen lujuus

Teräksen lujuus vaikuttaa suoraan tarvittavan rakenneteräksen määrään siten, että saman rasituksen kestämiseen tarvitaan vähemmän materiaalia. Tästä voi tehdä hypoteesin, että teräsmäärän säästökin pienentyy teräksen lujuuden kasvaessa.

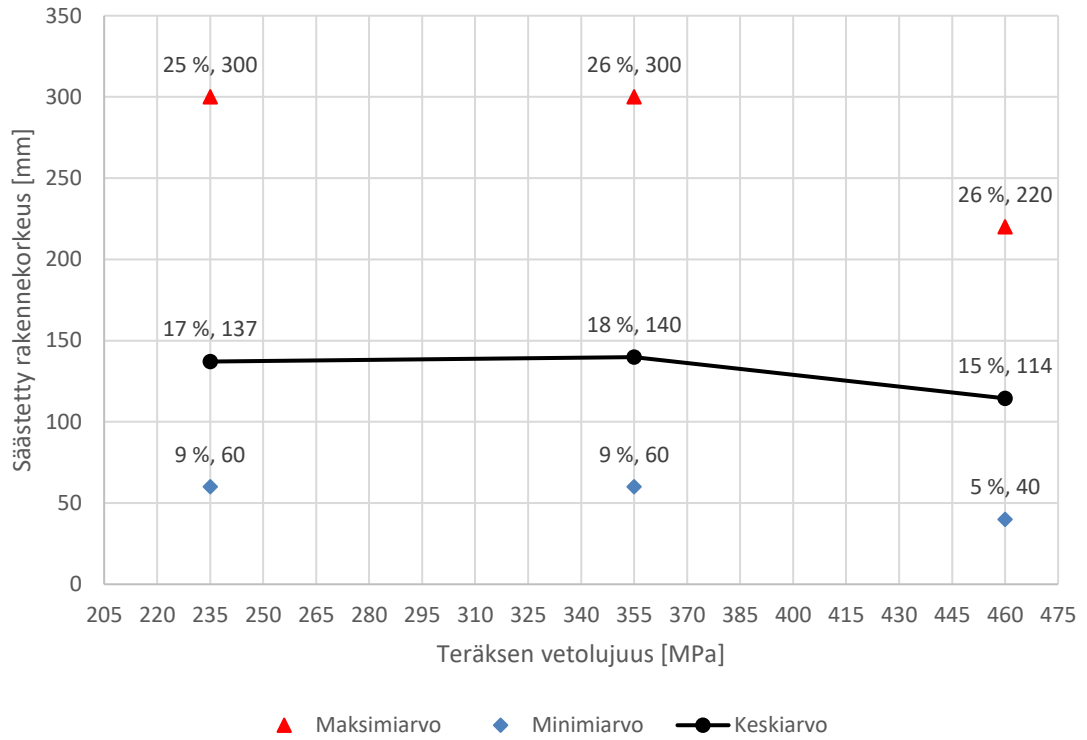


Kuva 14. Teräksen lujuuden vaikutus säästettyyn rakenneteräkseen

Kuvassa 14 tilanne ei näytä kuitenkaan toteuttavan tätä hypoteesia. Tuloksena minimiarvoista voitaisiin katsoa, ettei teräslujuudella ole mitään merkitystä säästettyyn teräsmäärään. Minimiarvot saadaan, kun laatta on mahdollisimman ohut, sekä palkin jänneväli on mahdollisimman pieni. Näissä tilanteissa taipuma tulee määrääväksi mitoittavaksi tekijäksi. Koska teräksen kimmokerroin ei riipu lujuudesta, ei myöskään taipuma riipu teräksen lujuudesta. Tästä syystä teräksen lujuudella ei ole mitään merkitystä tilanteissa, jossa taipuma on määräävä mitoittava tekijä.

Keskiarvoinen säästetty teräsmäärä sekä suhteellinen säästetty teräsmäärä ovat kaikki erittäin lähellä kaikkien tapausten suhteellisen rakenneteräksen säästön määrää. Vaikuttaisi kuitenkin, että se on hieman nousussa, kun vetolujuus kasvaa. Tämä johtuu todennäköisimmin siitä, että ilman liittovaikutusta kaikki palkit mitoitetiin lopulta taipuman avulla, mutta liittovaikutuksella 10 % tilanteista mitoitetiin lopulta taivutukselle. Taivu-

tuslujuuteen teräksen lujuus vaikuttaa merkittävästi, joten jo nämä 10 % tilanteista vaikuttaa selvästi tuloksiin.



Kuva 15. Teräksen lujuuden vaikutus säästettyyn rakennekorkeuteen

Kuvasta 15 voidaan nähdä, kuinka luvun alussa tehty hypoteesi alkaa pitämään paikkaansa heti, kun teräksen lujuus alkaa vaikuttaa mitoitukseen. Voidaan siis sanoa, etteivät valitut lähtöarvot anna parasta kuvaa teräksen lujuuden yleisestä vaikutuksesta liittorakenteisiin.

4.4 Yksittäisen muuttujan painoarvo

Muodostetaan jokaiselle muuttujalle oma painoarvo siihen, kuinka paljon muuttuja vaikuttaa säästettyyn teräsmäärään. Taulukon 7 mukaiset arvot saadaan iteroimalla Excelillä. Exceliin on kirjattu jokaisen tässä työssä mitoitettujen tilanteiden lähtöarvot sekä tulokset. Seuraavaksi luodaan taulukko, missä jokaiselle eri muuttujalle asetetaan jokin painotusarvo sattumanvaraisesti.

Exceliin tehty laskentakaava laskee jokaiselle tapaukselle oman arvion lähtöarvojen perusteella. Laskentakaava tarkistaa tarkasteltavan tilanteen alkuarvot ”[J_i ; J_p ; f_{ok} ; f_{yk} ; q_{Ek}]”. Tämän jälkeen kaava summaa taulukon 7 lähtöarvoon (34 %) kyseisiä alkuarvoja vastaavat painoarvot. Laskentakaavalla arvioidun säästön ja todellisen säästön erotuksesta otetaan itseisarvo ja kaikista näistä erotusten itseisarvoista otetaan keskiarvo. Kutsutaan tätä keskivirheeksi. Tämän jälkeen lähdetään iteroimaan jokaiselle muuttujalle painotuksia yksi muuttuja kerrallaan. Iterointi tehdään lisäämällä tai vähentämällä yhtä painoarvoa, kunnes löydetään lokaali minimiarvo keskivirheelle. Lokaalin minimiarvon ympärillä voi olla jopa $\pm 2\%$ aluetta, jolloin keskihajonta ei poikkeakaan yli 0.1% lokaalista maksimista. Näissä tilanteissa valitaan painoarvoksi se, mikä tuottaa pienimmän yksittäisen maksimivirheen koko joukossa.

Taulukko 7. Säästetyn suhteellisen teräsmäärän arviointi kaikilla muuttujilla.

34 %			
Lähtöarvo	Pieni	Keski	Suuri
J_i	-3 %	0 %	0 %
C	5 %	1 %	-1 %
q		1 %	0 %
S	-2 %	0 %	1 %
J_p	2 %	-2 %	-7 %

Kun kaikki muuttujat on tarkasteltu läpi taulukon 7 mukaisesti, päästään noin $\pm 3,5\%$ keskivirheeseen. Yksittäisen tuloksen maksimivirhe on 11% . Mitä kauemmas tässä työssä käytetyistä tavanomaisista arvoista siirrytään, sitä huonommin taulukon arvio kuvaa kyseistä tilannetta.

5. YHTEENVETO

Yksittäisten muuttujien tarkastelusta saadaan tulokseksi kolme merkittävintä tilannetta, jolloin suhteellinen säästetty rakenneteräksen määrä muuttuu keskiarvosta. Tuloksena saadaan, että liittovaikutus pienentää tarvittua teräsmäärää kolmasosan alkuperäisestä teräksen painosta. Ainoastaan taulukon 8 mukaiset tilanteet muuttavat tätä merkittävästi.

Taulukko 8. Säästetyn suhteellisen teräsmäärän arviointi. Taulukkoa käytetään summaamalla lähtöarvoon annettu määrä prosenttiyksiköitä jokaisesta toteutuneesta ehdosta. Taulukko toimii, kun jänneväli on 5–10 m.

<i>Lähtöarvo</i>	34 %
<i>Palkin jänneväli suurempaa kuin 7,5 m</i>	-7 %
<i>Betonin lujuus pienempää kuin C30/37</i>	+5 %
<i>Laatan jänneväli 5 m tai alle</i>	-3 %

Huomataan kuitenkin taulukossa 8 olevien kolmen muuttujan olevan ainoat, jotka vaikuttavat tulokseen yli 2 prosenttiyksikköä. Näin kun poistetaan kaikkien muiden muuttujien vaikutus, päästään noin $\pm 4,2\%$ keskivirheeseen. maksimivirhe yksittäiselle tapaukselle on 14 %. Todelliset säästöt ovat kuitenkin aina välillä 18–53 %, joten kyseiseltä väliltä ei arviossa kannata poistua. Mikäli haluaa tehdä arvion mahdollisimman varmalle puolelle, voi käyttää arviona 20 % säästöä kaikille liittopalkeille.

Arvion virhe on pienimmillään, kun pysytään lähellä lähtötiedoissa annettuja normaaleja lähtöarvoja. Näistä arvoista poikettaessa huomattavasti, kasvaa arvion virhe hieman. Tässä katsottiin, ettei taulukosta 7 saatu lisätarkkuus ole niin merkittävä, että arvion tekemistä kannattaisi muuttaa työläämmäksi. Tulokset ovat yleistettäviä, kun jännevälit pysyvät alle 10 metrissä ja liittopalkki tuetaan rakennusvaiheessa.

LÄHTEET

Dujmovic, D., Androic, B. & Lukacevic, I. (2015). Composite structures According to Eurocode: Worked Examples. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische, p.40

Hartikainen J. (2022). RAK.RS.120-2021-2022-2 Rakenteiden mekaniikan perusteet Luento 2a. Tampereen yliopisto. s. 24–26

Mela, K. (2022). Rak.RS.500 Teräsrakenteet K2022/Luento 12. Tampereen yliopisto.

Peltomaa, M. (2009). Betoni-teräs -liittorakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan. Tampereen teknillinen yliopisto LIITE 7.

Poikkileikkausvoimat. Saatavissa (viitattu 1.2.2023):
<http://temp.svensktlimtra.se/fi/limHTML/2U711.html>

Seppänen L. (1980). Rakentajain kalenteri. Rakentajain kustannus Oy. s. 70

SFS-EN 1992-1-1 + AC (2015). Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen standardiliitto, Helsinki. s. 157

SFS-EN 1993-1-1 + AC (2005). Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen standardiliitto, Helsinki. 99 s.

SFS-EN 1994-1-1 + AC (2005). Eurokoodi 4: Betoni-teräs -liittorakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Kuva 6.1. Suomen standardiliitto, Helsinki. s.32

LIITE A: KAIKKI MITOITUKSEN TULOKSET

J _I [m]	f _{ck} [MPa]	q _{EK} [kN/m ²]	f _{yk} [Mpa]	J _p [m]	h _c [mm]	Ilman liittovaikutusta			Liittovaikutuksella		
						profiili	Massa [kg/m]	h+h _c [mm]	profiili	Massa [kg/m]	h+h _c [mm]
5	20	2.5	235	5	137	IPE 360	57	497	IPE 270	36	407
5	20	2.5	235	7.5	137	IPE 500	91	637	IPE 400	66	537
5	20	2.5	235	10	137	HE 650 AA	138	757	IPE 550	106	687
5	20	2.5	355	5	137	IPE 360	57	497	IPE 270	36	407
5	20	2.5	355	7.5	137	IPE 500	91	637	IPE 400	66	537
5	20	2.5	355	10	137	HE 650 AA	138	757	IPE 550	106	687
5	20	2.5	460	5	137	IPE 360	57	497	IPE 270	36	407
5	20	2.5	460	7.5	137	IPE 500	91	637	IPE 400	66	537
5	20	2.5	460	10	137	HE 650 AA	138	757	IPE 550	106	687
5	20	5	235	5	149	IPE 400	66	549	IPE 300	42	449
5	20	5	235	7.5	149	IPE 550	106	699	IPE 450	78	599
5	20	5	235	10	149	HE 800 AA	172	919	IPE 600	122	749
5	20	5	355	5	149	IPE 400	66	549	IPE 300	42	449
5	20	5	355	7.5	149	IPE 550	106	699	IPE 450	78	599
5	20	5	355	10	149	HE 800 AA	172	919	IPE 600	122	749
5	20	5	460	5	149	IPE 400	66	549	IPE 300	42	449
5	20	5	460	7.5	149	IPE 550	106	699	IPE 450	78	599
5	20	5	460	10	149	HE 650 A	190	789	IPE 600	122	749
5	30	2.5	235	5	117	IPE 360	57	477	IPE 270	36	387
5	30	2.5	235	7.5	117	IPE 500	91	617	IPE 400	66	517
5	30	2.5	235	10	117	HE 650 AA	138	737	IPE 550	106	667
5	30	2.5	355	5	117	IPE 360	57	477	IPE 270	36	387
5	30	2.5	355	7.5	117	IPE 500	91	617	IPE 400	66	517
5	30	2.5	355	10	117	HE 650 AA	138	737	IPE 550	106	667
5	30	2.5	460	5	117	IPE 360	57	477	IPE 270	36	387
5	30	2.5	460	7.5	117	IPE 500	91	617	IPE 400	66	517
5	30	2.5	460	10	117	HE 650 AA	138	737	IPE 550	106	667
5	30	5	235	5	131	IPE 400	66	531	IPE 300	42	431
5	30	5	235	7.5	131	IPE 550	106	681	IPE 450	78	581
5	30	5	235	10	131	HE 800 AA	172	901	IPE 600	122	731
5	30	5	355	5	131	IPE 400	66	531	IPE 300	42	431
5	30	5	355	7.5	131	IPE 550	106	681	IPE 450	78	581
5	30	5	355	10	131	HE 800 AA	172	901	IPE 600	122	731
5	30	5	460	5	131	IPE 400	66	531	IPE 300	42	431
5	30	5	460	7.5	131	IPE 550	106	681	IPE 450	78	581
5	30	5	460	10	131	HE 650 A	190	771	IPE 600	122	731
5	60	2.5	235	5	101	IPE 330	49	431	IPE 270	36	371
5	60	2.5	235	7.5	101	IPE 500	91	601	IPE 400	66	501
5	60	2.5	235	10	101	IPE 600	122	701	IPE 500	91	601
5	60	2.5	355	5	101	IPE 330	49	431	IPE 270	36	371

J _I [m]	f _{ck} [MPa]	q _{EK} [kN/m ²]	f _{yk} [Mpa]	J _p [m]	h _c [mm]	Ilman liittovaikutusta			Liittovaikutuksella		
						profiili	Massa [kg/m]	h+h _c [mm]	profiili	Massa [kg/m]	h+h _c [mm]
5	60	2.5	355	7.5	101	IPE 500	91	601	IPE 400	66	501
5	60	2.5	355	10	101	IPE 600	122	701	IPE 500	91	601
5	60	2.5	460	5	101	IPE 330	49	431	IPE 270	36	371
5	60	2.5	460	7.5	101	IPE 500	91	601	IPE 400	66	501
5	60	2.5	460	10	101	IPE 600	122	701	IPE 500	91	601
5	60	5	235	5	111	IPE 400	66	511	IPE 300	42	411
5	60	5	235	7.5	111	IPE 550	106	661	IPE 450	78	561
5	60	5	235	10	111	HE 700 AA	150	781	IPE 600	122	711
5	60	5	355	5	111	IPE 400	66	511	IPE 300	42	411
5	60	5	355	7.5	111	IPE 550	106	661	IPE 450	78	561
5	60	5	355	10	111	HE 700 AA	150	781	IPE 600	122	711
5	60	5	460	5	111	IPE 400	66	511	IPE 300	42	411
5	60	5	460	7.5	111	IPE 550	106	661	IPE 450	78	561
5	60	5	460	10	111	HE 700 AA	150	781	IPE 600	122	711
7.5	20	2.5	235	5	191	IPE 450	78	641	IPE 300	42	491
7.5	20	2.5	235	7.5	191	IPE 600	122	791	IPE 450	78	641
7.5	20	2.5	235	10	191	HE 800 AA	172	961	IPE 600	122	791
7.5	20	2.5	355	5	191	IPE 450	78	641	IPE 300	42	491
7.5	20	2.5	355	7.5	191	IPE 600	122	791	IPE 450	78	641
7.5	20	2.5	355	10	191	HE 800 AA	172	961	IPE 600	122	791
7.5	20	2.5	460	5	191	IPE 450	78	641	IPE 300	42	491
7.5	20	2.5	460	7.5	191	IPE 600	122	791	IPE 450	78	641
7.5	20	2.5	460	10	191	HE 700 A	204	881	IPE 600	122	791
7.5	20	5	235	5	211	IPE 450	78	661	IPE 330	49	541
7.5	20	5	235	7.5	211	HE 650 AA	138	831	IPE 500	91	711
7.5	20	5	235	10	211	HE 900 AA	198	1081	HE 700 AA	150	881
7.5	20	5	355	5	211	IPE 450	78	661	IPE 330	49	541
7.5	20	5	355	7.5	211	HE 650 AA	138	831	IPE 500	91	711
7.5	20	5	355	10	211	HE 900 AA	198	1081	HE 700 AA	150	881
7.5	20	5	460	5	211	IPE 450	78	661	IPE 330	49	541
7.5	20	5	460	7.5	211	HE 650 AA	138	831	IPE 500	91	711
7.5	20	5	460	10	211	HE 800 A	224	1001	HE 700 AA	150	881
7.5	30	2.5	235	5	161	IPE 400	66	561	IPE 300	42	461
7.5	30	2.5	235	7.5	161	IPE 600	122	761	IPE 450	78	611
7.5	30	2.5	235	10	161	HE 800 AA	172	931	IPE 600	122	761
7.5	30	2.5	355	5	161	IPE 400	66	561	IPE 300	42	461
7.5	30	2.5	355	7.5	161	IPE 600	122	761	IPE 450	78	611
7.5	30	2.5	355	10	161	HE 800 AA	172	931	IPE 600	122	761
7.5	30	2.5	460	5	161	IPE 400	66	561	IPE 300	42	461
7.5	30	2.5	460	7.5	161	IPE 600	122	761	IPE 450	78	611
7.5	30	2.5	460	10	161	HE 650 A	190	801	IPE 600	122	761
7.5	30	5	235	5	183	IPE 450	78	633	IPE 330	49	513
7.5	30	5	235	7.5	183	HE 650 AA	138	803	IPE 500	91	683
7.5	30	5	235	10	183	HE 900 AA	198	1053	HE 700 AA	150	853
7.5	30	5	355	5	183	IPE 450	78	633	IPE 330	49	513
7.5	30	5	355	7.5	183	HE 650 AA	138	803	IPE 500	91	683

J _I [m]	f _{ck} [MPa]	q _{EK} [kN/m ²]	f _{yk} [Mpa]	J _p [m]	h _c [mm]	Ilman liittovaikutusta			Liittovaikutuksella		
						profiili	Massa [kg/m]	h+h _c [mm]	profiili	Massa [kg/m]	h+h _c [mm]
7.5	30	5	355	10	183	HE 900 AA	198	1053	HE 700 AA	150	853
7.5	30	5	460	5	183	IPE 450	78	633	IPE 330	49	513
7.5	30	5	460	7.5	183	HE 650 AA	138	803	IPE 500	91	683
7.5	30	5	460	10	183	HE 800 A	224	973	HE 700 AA	150	853
7.5	60	2.5	235	5	125	IPE 400	66	525	IPE 300	42	425
7.5	60	2.5	235	7.5	125	IPE 550	106	675	IPE 450	78	575
7.5	60	2.5	235	10	125	HE 800 AA	172	895	IPE 600	122	725
7.5	60	2.5	355	5	125	IPE 400	66	525	IPE 300	42	425
7.5	60	2.5	355	7.5	125	IPE 550	106	675	IPE 450	78	575
7.5	60	2.5	355	10	125	HE 800 AA	172	895	IPE 600	122	725
7.5	60	2.5	460	5	125	IPE 400	66	525	IPE 300	42	425
7.5	60	2.5	460	7.5	125	IPE 550	106	675	IPE 450	78	575
7.5	60	2.5	460	10	125	HE 650 A	190	765	IPE 600	122	725
7.5	60	5	235	5	145	IPE 450	78	595	IPE 330	49	475
7.5	60	5	235	7.5	145	HE 650 AA	138	765	IPE 500	91	645
7.5	60	5	235	10	145	HE 900 AA	198	1015	HE 700 AA	150	815
7.5	60	5	355	5	145	IPE 450	78	595	IPE 330	49	475
7.5	60	5	355	7.5	145	HE 650 AA	138	765	IPE 500	91	645
7.5	60	5	355	10	145	HE 900 AA	198	1015	HE 700 AA	150	815
7.5	60	5	460	5	145	IPE 450	78	595	IPE 330	49	475
7.5	60	5	460	7.5	145	HE 650 AA	138	765	IPE 500	91	645
7.5	60	5	460	10	145	HE 800 A	224	935	HE 700 AA	150	815
10	20	2.5	235	5	255	IPE 500	91	755	IPE 330	49	585
10	20	2.5	235	7.5	255	HE 700 AA	150	925	IPE 550	106	805
10	20	2.5	235	10	255	HE 1000 AA	222	1225	HE 700 AA	150	925
10	20	2.5	355	5	255	IPE 500	91	755	IPE 300	42	555
10	20	2.5	355	7.5	255	HE 700 AA	150	925	IPE 500	91	755
10	20	2.5	355	10	255	HE 1000 AA	222	1225	HE 700 AA	150	925
10	20	2.5	460	5	255	IPE 500	91	755	IPE 300	42	555
10	20	2.5	460	7.5	255	HE 700 AA	150	925	IPE 500	91	755
10	20	2.5	460	10	255	HE 800 B	262	1055	HE 700 AA	150	925
10	20	5	235	5	285	IPE 550	106	835	IPE 400	66	685
10	20	5	235	7.5	285	HE 800 AA	172	1055	HE 550 AA	120	807
10	20	5	235	10	285	HE 900 A	252	1175	HE 800 AA	172	1055
10	20	5	355	5	285	IPE 550	106	835	IPE 330	49	615
10	20	5	355	7.5	285	HE 800 AA	172	1055	IPE 550	106	835
10	20	5	355	10	285	HE 900 A	252	1175	HE 800 AA	172	1055
10	20	5	460	5	285	IPE 550	106	835	IPE 330	49	615
10	20	5	460	7.5	285	HE 650 A	190	925	IPE 550	106	835
10	20	5	460	10	285	HE 900 B	291	1185	HE 700 A	204	975
10	30	2.5	235	5	205	IPE 450	78	655	IPE 330	49	535
10	30	2.5	235	7.5	205	HE 650 AA	138	825	IPE 500	91	705
10	30	2.5	235	10	205	HE 900 AA	198	1075	HE 700 AA	150	875
10	30	2.5	355	5	205	IPE 450	78	655	IPE 330	49	535

J _l [m]	f _{ck} [MPa]	q _{EK} [kN/m ²]	f _{yk} [Mpa]	J _p [m]	h _c [mm]	Ilman liittovaikutusta			Liittovaikutuksella		
						profiili	Massa [kg/m]	h+h _c [mm]	profiili	Massa [kg/m]	h+h _c [mm]
10	30	2.5	355	7.5	205	HE 650 AA	138	825	IPE 500	91	705
10	30	2.5	355	10	205	HE 900 AA	198	1075	HE 700 AA	150	875
10	30	2.5	460	5	205	IPE 450	78	655	IPE 330	49	535
10	30	2.5	460	7.5	205	HE 650 AA	138	825	IPE 500	91	705
10	30	2.5	460	10	205	HE 800 A	224	995	HE 700 AA	150	875
10	30	5	235	5	237	IPE 500	91	737	IPE 400	66	637
10	30	5	235	7.5	237	HE 800 AA	172	1007	HE 550 AA	120	759
10	30	5	235	10	237	HE 1000 AA	222	1207	HE 800 AA	172	1007
10	30	5	355	5	237	IPE 500	91	737	IPE 360	57	597
10	30	5	355	7.5	237	HE 800 AA	172	1007	IPE 550	106	787
10	30	5	355	10	237	HE 1000 AA	222	1207	HE 800 AA	172	1007
10	30	5	460	5	237	IPE 500	91	737	IPE 360	57	597
10	30	5	460	7.5	237	HE 650 A	190	877	IPE 550	106	787
10	30	5	460	10	237	HE 900 B	291	1137	HE 700 A	204	927
10	60	2.5	235	5	159	IPE 450	78	609	IPE 330	49	489
10	60	2.5	235	7.5	159	HE 650 AA	138	779	IPE 500	91	659
10	60	2.5	235	10	159	HE 900 AA	198	1029	HE 650 AA	138	779
10	60	2.5	355	5	159	IPE 450	78	609	IPE 330	49	489
10	60	2.5	355	7.5	159	HE 650 AA	138	779	IPE 500	91	659
10	60	2.5	355	10	159	HE 900 AA	198	1029	HE 650 AA	138	779
10	60	2.5	460	5	159	IPE 450	78	609	IPE 330	49	489
10	60	2.5	460	7.5	159	HE 650 AA	138	779	IPE 500	91	659
10	60	2.5	460	10	159	HE 800 A	224	949	HE 650 AA	138	779
10	60	5	235	5	179	IPE 500	91	679	IPE 400	66	579
10	60	5	235	7.5	179	HE 700 AA	150	849	HE 550 AA	120	701
10	60	5	235	10	179	HE 1000 AA	222	1149	HE 800 AA	172	949
10	60	5	355	5	179	IPE 500	91	679	IPE 360	57	539
10	60	5	355	7.5	179	HE 700 AA	150	849	IPE 550	106	729
10	60	5	355	10	179	HE 1000 AA	222	1149	HE 800 AA	172	949
10	60	5	460	5	179	IPE 500	91	679	IPE 360	57	539
10	60	5	460	7.5	179	HE 700 AA	150	849	IPE 550	106	729
10	60	5	460	10	179	HE 800 B	262	979	HE 650 A	190	819

