

D. ANDERSON,  
UNIVERSITY OF WARWICK,  
ENGLANTI  
A. COLSON,  
ECOLE NATIONALE  
SUPERIEURE DES ARTS ET  
INDUSTRIES DE  
STRASBOURG, RANSKA  
J.-P. JASPART, UNIVERSITY  
OF LIEGE, BELGIA

Oheinen artikkeli julkaistaan myös eräiden muiden Euroopan maiden ammattilehdissä. Artikkelin suomen-  
noksen on tehnyt Jouko Kouhi.

# Teräsrakenteiden liitokset ja kehien mitoittaminen taloudellisen lopputuloksen aikaansaamiseksi

Talonrakennuksen teräsraken-  
nerungot on yleensä mitoitettu  
olettamalla pilarien ja palkkien  
liitokset joko nivelellisiksi tai  
jäykiksi. Liitoksen jäykkyys on  
todellisuudessa jossakin näi-  
den rajojen välillä, jolloin on  
kyse liitoksen osittain jäykästä  
(semi-rigid) käyttäytymisestä.  
Käytännössä liitoksen kestä-  
vyys voi olla myös pienempi  
kuin liitettävän palkin kestä-  
vyys, jolloin liitoksen käyttäy-  
tymistä kutsutaan osittain lu-

jaksi (partial-strength).  
On selvää, että liitosten jäyk-  
kyys ja niiden kestävyys vai-  
kuttavat kehärakenteen koko-  
naiskestävyyteen. On todettu,  
että teräsrakenteiset kehät voi-  
daan tapauskohtaisesti mitoit-  
taa osittain jatkuvina (semi-  
continuous) perustuen liitosten  
osittain jäykkään ja/tai osittain  
lujaan käyttäytymiseen. Tämä  
menettelytapa sallii tavallisia  
menetelmiä suuremman va-  
pauden, jolloin suunnittelija

voi ottaa huomioon tapauskoh-  
taisesti liitoksen todellisen  
käyttäytymisen.

Tässä artikkelissa selvitetään  
em. menettelyllä saatavia etu-  
ja. Jotta liitosten osittaista  
jäykkyyttä voitaisiin hyödyn-  
tää, seuraavassa kuvataan osit-  
tain jatkuvien rakenteiden mi-  
toitusmenetelmiä sekä viita-  
taan kirjallisuuteen, josta löy-  
tyy liitoksia koskevia ohjeita.

## Mitä hyötyä on osittaisen jäykkyyden huomioon ottamisesta?

Liitosten osittaisen jäykkyyden hu-  
omioon ottamisesta saavutettavat  
hyödyt riippuvat kehän tyypistä ja  
mitoituksen perusteista. Sivusuun-

nassa tuettujen kehien tapauksessa  
on yksinkertaista olettaa liitosten  
olevan nivelellisiä. Sivusuunnassa  
tukemattomat kehät suunnitellaan  
yleensä jatkuvina rakenteina, jolloin  
liitosten oletetaan olevan jäykkiä.

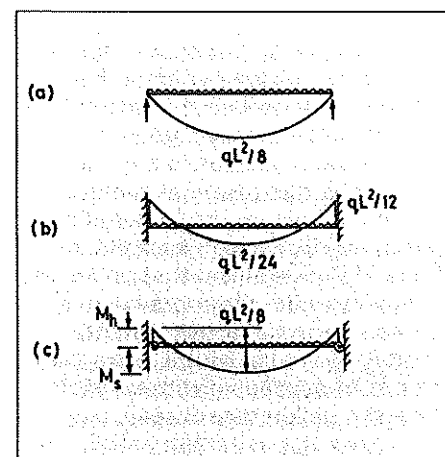
## Sivusuunnassa tuetut kehät

Osittaiseen jäykkyyteen perustuvan mitoituksen edut	– palkkien korkeuden pieneneminen – kehän kustannusten pieneneminen – tilapäisten tukien välttäminen
---	--

## Sivusuunnassa tukemattomat kehät

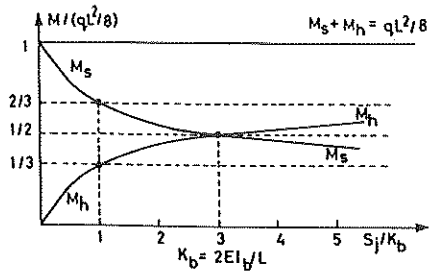
Osittaiseen jäykkyyteen perustuvan mitoituksen edut	– liitokset ovat yksinkertaisempia, koska voidaan välttää jäykistetyt liitokset – kehän kustannusten pieneneminen
---	---

Seuraavassa selostetaan edellä mainittujen etujen syitä.

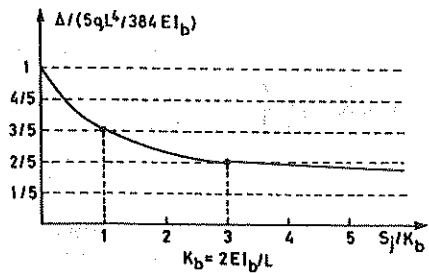


1 Palkki, jolla on erilaiset päänreunaehdot.

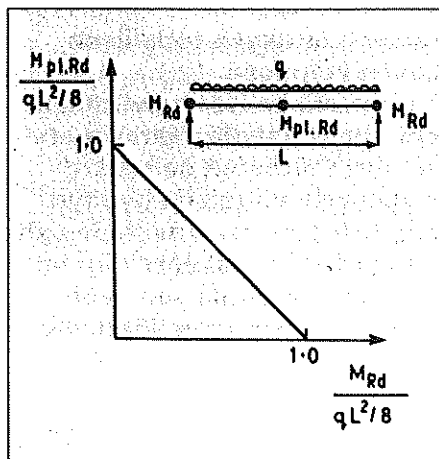




2 Palkin momentien muuttuminen, kun liitoksen jäykkyys muuttuu.



3 Palkin keskipisteen taipuminen, kun liitoksen jäykkyys muuttuu.



4 Palkin plastisuusteorian mukainen analysointi, kun liitos on osittain luja.

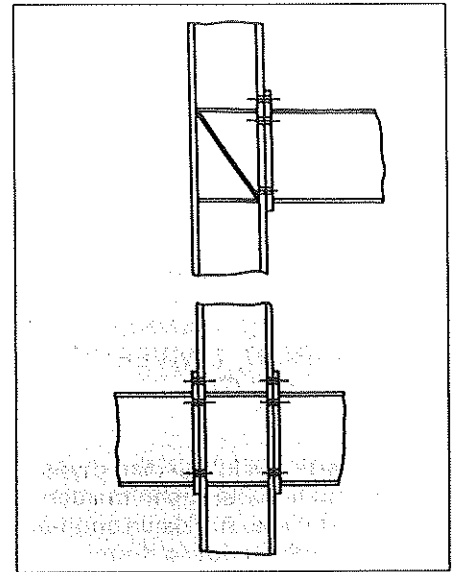
### Sivusuunnassa tuetut kehät

Osittain jäykkien liitosten vaikutusta palkin mitoittamiseen voidaan havainnollistaa tarkastelemalla yksiaukkoisen palkin käyttäytymistä. Kuvassa 1(a) esitetään yksiaukkoisen palkki, johon vaikuttaa tasan jakaantunut kuorma, jolloin suurin taivutusmomentti esiintyy palkin keskellä. Kuvassa 1(b) nivelelliset tuet on korvattu jäykillä tuilla. Kimmoteorian mukainen suurin taivutusmomentti esiintyy nyt tuilla, mutta se on vain kaksi kolmasosaa verrattuna yksinkertaisen palkin tapaukseen.

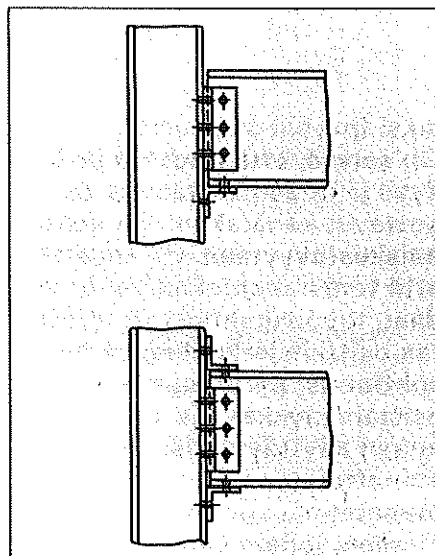
Kuvassa 1(c) esitetään palkki, jossa tuilla on osittain jäykät liitokset. Riippuen liitoksen jäykkyydestä kimmoteorian mukainen suurin taivutusmomentti esiintyy tuilla tai jänteen keskellä, mutta suurin taivutusmomentti on aina pienempi kuin

päistään nivelellisesti tuetun palkin tapauksessa. Kuvasta 2 nähdään, että valitsemalla liitoksen jäykkyys  $S_j$  sopivasti suhteessa palkin jäykkyyteen, tuen taivutusmomentti saadaan samaksi kuin jänteen keskellä vaikuttava momentti, jolloin mitoittava taivutusmomentti on optimisinaan.

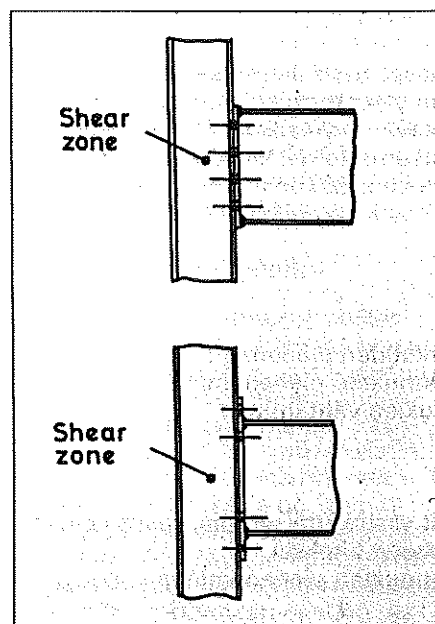
Käytännössä voi olla kuitenkin vaikeuksia em. sopivan liitoksen jäykkyyden aikaansaamisessa. On mahdollista, että em. ratkaisu ei ole optimi, koska palkin korkeuden optimi ja mahdollisuus tehdä itse liitos palkin päässä vaikuttavat asiaan. Liitoksen jäykkyyden aikaansaaminen aiheuttaa lisäkustannuksia. Kuvasta 2 nähdään, että mitoittava momentti pienenee huomattavasti, vaikka liitoksen jäykkyys on suhteellisen pieni. Samanlainen tilanne syntyy, kun tar-



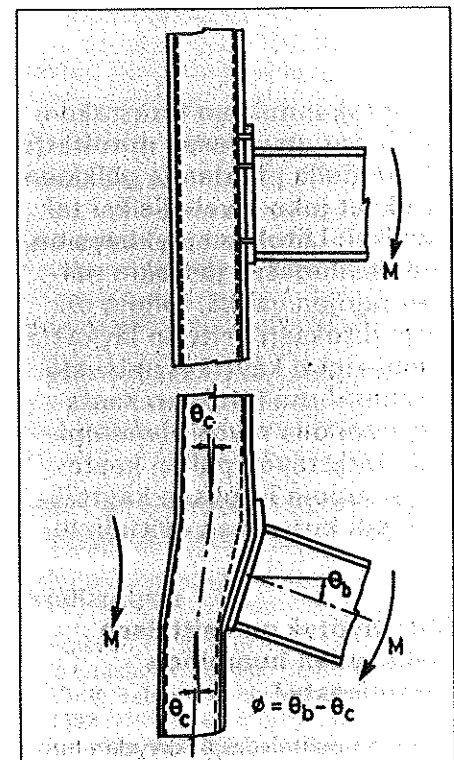
7 Jäykistettyjä liitoksia.



5 Kulmateräiliitokset



6 Jäykistettyjä liitoksia.



8 Palkki-pilariliitoksen muodonmuutokset.

kastellaan palkin kimmoteorian mukaista taipumaa kuten kuvassa 3 esitetään. Edellä olevasta voidaan päätellä, että palkin korkeutta voidaan taloudellisesti pienentää joko: – ottamalla huomioon yksinkertaisten liitosten sisäinen jäykkyys tai – muuttamalla yksinkertaisia liitoksia siten, että jäykkyys saadaan kasvamaan.

Jos käytetään jäykä-plastiseen malliin perustuvaa analyysia rajatilalaskelmissa, liitoksen taivutuskestävyys vaikuttaa käyttäytymiseen yleensä enemmän kuin liitoksen jäykkyys. Kuvassa 4 esitetään kuinka



toksia tarkemmin. Ko. julkaisu sisältää kaavat laippajäykistetyille liitoksille.

Mitoituksessa tarvittavat liitoksen ominaisuudet riippuvat menetelmästä, jota käytetään rakenteen kokonaisanalyysissä, seuraavasti:

Kimmoiteoriaan perustuva analyysi – jäykkyys  $S_j$

Jäykkä-plastiseen malliin perustuva analyysi – taivutuskestävyys  $M_{Rd}$

Vaikka usein tarvitaan iterointia varman ja taloudellisen mitoituksen aikaansaamiseksi, on tavoiteltavaa, että iterointi minimoidaan arvioimalla liitoksen ominaisuudet oikein. Sivusuunnassa tuetuille kehillä palkki-linja-menetelmä (ks. kuva 11) tarjoaa sopivan tavan osittain jäykkien liitosten vaikutusten määrittämiseksi kimmolisesti käyttäytyvään palkkiin. Itse asiassa tämä menetelmä yhdistää liitoksen vasteen, sisäisten rasitusten analysoinnin ja toimivuuden arvioinnin yhdessä iteraatioprosessissa. Tätä menetelmää käyttämällä liitoksen ominaisuudet voidaan tarkistaa palkkiinjaa käyttäen (ks. kuva 11(a)) vastaavan sauvan pään momentin määrittämiseksi ja sen jälkeen palkin mitoittavan momentin määrittämiseksi. Vaihtoehtoisesti voidaan määrittää liitokselta vaadittava pienin jäykkyys, jonka yksittäinen palkki tarvitsee, (ks. kuva 11(b)). Tämä antaa suoraan liitoksen pienimmän kestävyuden  $M_{Rd}$ , joka tarvitaan analyysissä liitoksen kimmolisen käyttäytymisen saavuttamiseksi.

Käytettäessä jäykkä-plastiseen malliin perustuvaa analyysia sivusuunnassa tuetuissa kehillä, liitokselta vaadittava taivutuskestävyys  $M_{Rd}$  voidaan määrittää suoraan mekanismin perusteella, (ks. kuva 4). Tämä menetelmä on erityisen suositeltava, koska liitoksen taivutuskestävyyden laskeminen on tuttu asia suunnittelijoille. Jäykkyyttä  $S_j$  ei tarvitse laskea käyttörajatilassa, jos käytetään yksinkertaistettuja menetelmiä. Voidaan käyttää esimerkiksi varmalla puolella olevaa arvoa tai varmuutta voidaan saada aikaan rajoittamalla jännevälin ja korkeuden suhdetta.

Sivusuunnassa tukemattomien kehien tapauksessa jokaisen liitoksen taivutuskestävyyden alkuarvo voidaan määrittää käyttämällä jäykkä-nurkkaisen kehän analysointia. Liitosten alustavat mitat voidaan sen jälkeen määrittää mitoittamalla liitos kestäväksi em. laskennasta saadut

taivutusmomentit, mutta jättämällä jäykisteet huomioon ottamatta.

Sekä sivusuunnassa tuettujen että tukemattomien kehien tapauksissa standardisoitujen liitosten käyttö mahdollistaa sen, että suunnittelija viittaa valmiiksi laskettuihin liitoksen ominaisuuksiin, kuten on tavallista nivelellistenkin liitosten osalta. Tällöin tarvittavien laskelmien määrä pienenee yksittäisessä projektissa.

### Toimivuuden arviointi

Kun kokonaisanalyysissä käytetään kimmoteoriaan perustuvaa menetelmää, liitosten kestävyys tulee tarkistaa. Sivusuunnassa tukemattomassa kehässä liitosten jousto lisää kehän sivusiirtymiä. Jos siirtymät ovat liian suuria liitosten joustavuudesta johtuvat lisätaipumat voidaan määrittää, jos jäykkä-nurkkainen kehä on analyysoitu aiemmin.

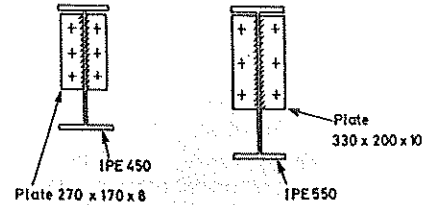
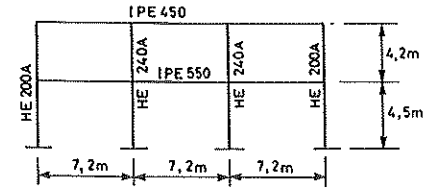
Eurocode 3:n mukaan mitoitetuille päätylevyiliitoksille, jokaisen liitoksen yksittäisen osan (esim. päätylevy, pilarin laippa, pilarin uuma, ruuvit ja hitsit) vaikutus liitoksen ominaisuuksiin on todettavissa laskelmissa. Liitoksen yksityiskohtia voidaan helposti muuttaa tarkoituksenmukaisemman kestävyuden tai jäykkyyden aikaansaamiseksi. Tulevassa ECCS:n julkaisussa tullaan antamaan vastaavanlainen menetelmä liitoksille, jossa palkki liitetään pilariin käyttäen laipoissa olevia kulmäteräksiiä.

Sivusuunnassa tuettujen kehien osalta ehdotetaan jäykkä-plastiseen malliin perustuvaa analyysia vaihtoehtona kimmoteoriaan perustuvalla analyysillä. Tällöin tulee varmistaa, että liitoksilla on riittävä kiertymiskyky. Eräille liitoksille (kuten päätylevyiliitos puoltiliitoksena ja kulmäteräiliitos) on olemassa riittävä kiertymiskyky, jos leikkausalue (ks. kuva 6) on määräävä taivutusmomentti-kestävyyden suhteen tai jos kiertymiskyky johtuu päätylevyn, kulmäterästen tai pilarin laipan myötämisestä. Liitos tulee muotoilla siten, että edellä mainittu käyttäytyminen on mahdollista, koska muussa tapauksessa tulee suorittaa kimmoplastinen analyysi liitoksilta tarvittavan kiertymiskyvyn määrittämiseksi.

### Käytännön sovellutukset

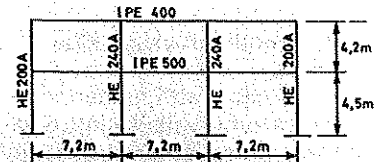
Joitakin käytettävissä olevia vaihtoehtoja, joissa voidaan käyttää hyväksi osittaisia jatkuvuutta, on esitetty kuvissa 12–14. Lisää esimerkkejä on esitetty ECCS:n julkaisussa no. 67.

Kuvissa 12–14 esitetyissä tapauksissa on kyse sivusuunnassa tuettu-



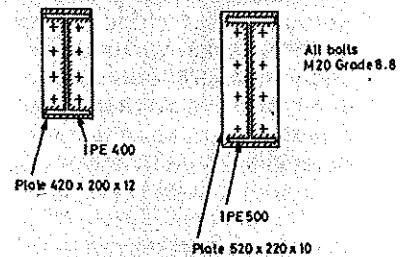
All welds 3mm throat thickness / 4mm leg size  
All bolts M20 Grade 8.8

12 Yksinkertainen kehä



Connections to external columns  
As for simple design (Fig.12)

Connections to internal columns



Welds : Beam web to end plate 3mm throat / 4mm leg FW  
Flanges : IPE 400 5mm throat / 7mm leg FW  
IPE 500 4mm throat / 6mm leg FW

13 Osittain jatkuva kehä

jen rakennusten kantavista kehärakenteista, joissa kehäväli on 6 m. Teräslaji on Fe 360. Ominaiskuormat ovat:

Katto : pysyvä kuorma 4,5 kN/m<sup>2</sup>  
: muuttuva kuorma: 1,5 kN/m<sup>2</sup>  
Lattia : pysyvä kuorma 5,0 kN/m<sup>2</sup>  
: muuttuva kuorma: 4,0 kN/m<sup>2</sup>

Kuva 12 esittää yksinkertaista rakennetta, jossa pilari-palkkiiliitokset on tehty käyttäen päätylevyjä, jotka liitetään pilarin laippaan ruuviiliitoksilla.

Kuva 13 esittää palkin koossa saavutettua pienennystä ilman, että pilarin koko kasvaa. Palkkien liitoksissa reunimmisiin pilareihin on käytetty joustavia päätylevyiliitoksia, jotka välttävät merkittävien momenttien syntyminen. Palkkien liitoksissa muihin pilareihin on käytetty momentin kestäviä liitoksia käyttämällä



palkin korkuisia päätylevyjä. Nämä liitokset ovat "osittain lujia" (partial-strength) ja niiden taivutuskestävyys on välillä 20–30 % liitettävän palkin taivutuskestävyydestä. Tämä on riittävä palkkien koon pienentämiseksi yhdellä pykälällä, joka johtaa huomattavaan kustannussäästöön valmistuskustannukset mukaanlukien. Osittain lujien liitosten kestävyys jää suhteellisen pieneksi, ja sakkilautakuormituksesta aiheutuva tilanne ei tule kriittiseksi välipilareita mitoitettaessa.

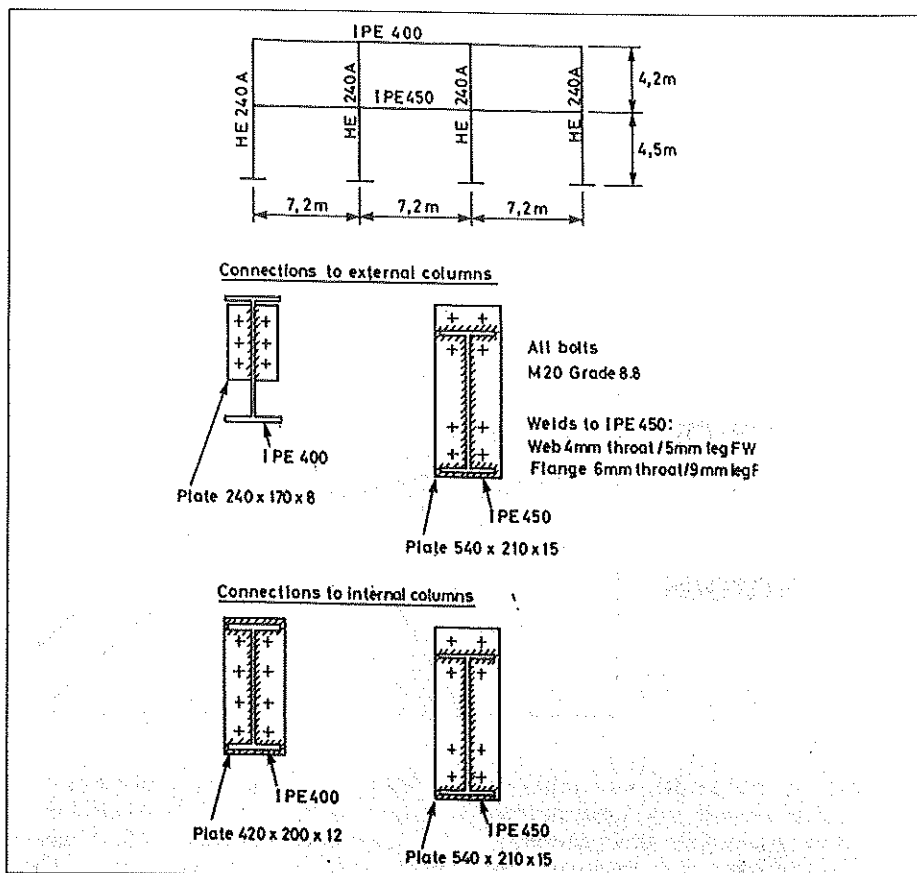
Kuvassa 14 on esitetty vaihtoehtoinen ratkaisu, joka perustuu osittaisen jäykkyyden huomioon ottamiseen. Reunapilarien kokoa on nyt kasvatettu profiiliksi HE 240 A, jotta palkin molempiin päihin saadaan momentin kestävä liitos. Tässä tapauksessa kattopalkin koon pienentäminen ei ole mahdollista. Jos palkin kokoa pienennetään, voimat liitoksessa kasvavan tarvittavan sauvan pään momentin siirtämiseksi. Tässä tapauksessa pienemmän palkin IPE 360 käyttäminen onnistuisi vain reunapilarien kokoa kasvattamalla. Tämän takia on päädytty palkkiin IPE 400 ja kattopalkin liitos reunapilariin voi olla samanlainen kuin kuvassa 13 on aikaisemmin esitetty.

Profiilin HE 240 A käyttäminen kaikissa pilareissa sallii lattiapalkkien koon pienentämisen profiiliin IPE 450 edellyttäen, että käytetään palkin korkeuden yli ulottuvaa päätylevyä (ks. kuva 14). Näillä liitoksilla saavutetaan momenttikestävyys, joka voi olla 40 % palkin momenttikestävyyydestä, mutta liitoksen korkeus rajoittaa liitoksen voimat sellaisiksi, jotka kuitenkin pilari HE 240 A voi vielä kestää. Vastaavat liitokset kattotasolla on katsottu epätarkeituksemukaisiksi, koska niiden käyttö vaatisi jokaisen pilarien jatkamista kattotasoa yli.

Kuvan 14 tapaus johtaa pienempiin säästöihin teräsrakenteessa verrattuna kuvan 13 tilanteeseen. Se kuvaa kuitenkin kuinka merkittäviä korkeuden pienennyksiä on lattiapalkkeissa saavutettavissa ilman, että käytetään viisteellisiä liitoksia tai jäykistettyjä liitoksia.

### Johtopäätökset

Osittain jäykkien liitosten käyttö antaa enemmän vapautta kuin nivelellisten tai jäykkien liitosten käyttö. Tämä johtuu siitä, että liitoksen ominaisuuksia käsitellään muuttujina mitoituksessa ja ominaisuudet valitaan tapauskohtaisten vaatimusten perusteella.



14 Osittain jatkuvan kehän vaihtoehtoinen mitoitus.

Sivusuunnassa tuetuissa kehärakenteissa osittain jäykkien liitosten käyttö sallii matalampien palkkien käytön ja johtaa kehärakenteen kustannussäästöihin. Matalampien palkkien käyttö johtaa rakenteen kokonaiskorkeuden pienemiseen ja siitä seuraa lisäsäästöjä rakenteen kokonaiskustannuksissa.

Sivusuunnassa tukemattomissa kehissä osittain jäykkien liitosten käyttö pienentää liitosten monimutkaisuutta, josta aiheutuu huomattavia säästöjä valmistuskustannuksissa.

Laskentaesimerkit havainnollistavat osittain jäykkien liitosten käyttöä. Lisätietoja on annettu Eurocode 3:ssa ja ECCS:n julkaisuissa.

### Kiitokset

Tämä artikkeli on laadittu ECCS:n (European Convention for Constructional Steelwork) teknisen komitean TC10 (Structural Connections) ohjauksessa teknisessä työryhmässä TWG 10.2: Semi-rigid Connections. Tekijät kiittävät em. komiteoiden jäseniä kokouksissa saamistaan kommentaareista ja ehdotuksista, joiden kokousten puheenjohtajina ovat professori J.W.B. Stark (TNO, Delft University of Delft) (TC 10) ja professori R. Zandonini (University of Trento) (TWG 10.2).

### Kirjallisuutta

- [1] SFS- ENV 1993- 1- 1 Eurocode 3, Teräsrakenteiden suunnittelu osa 1.1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Euroopan Standardioimisjärjestö CEN, Bryssel 1992 (saatavana myös suomenkielisenä SFS:stä)
- [2] Technical Working Group 8.2 Analysis and design of steel frames with semi-rigid connections. European Convention for Constructional Steelwork (ECCS), Brysseli, Julkaisu No. 67, 1992
- [3] Technical Working Group 10.2. Moment-rotation characteristics for steel beam-to column connections. European Convention for Constructional Steelwork (ECCS), Bryssel, julkaistaan v. 1993
- [4] Bjorhovde R. ja Colson A., Economy of semi-rigid frame design, published in Bjorhovde R., Colson A., Haajier G., and Stark J.W.B. (ed.), Connections in Steel Structures II: Behaviour, Strength and Design, American Institute of Steel Construction, 1992 pp.

