

Sami Savolainen

Rakennusta jäykistävän aukollisen seinälevyn jäykkyys

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Rakennustekniikan koulutohjelman
Insinöörityö
23.4.2012

Tekijä(t) Otsikko	Sami Savolainen Rakennusta jäykistävän aukollisen seinälevyn jäykkyys
Sivumäärä Aika	40 sivua + 3 liitettä 23.4.2012
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennesuunnittelu
Ohjaaja(t)	Osastopäällikkö Anssi Kolehmainen Lehtori Jouni Kalliomäki
<p>Työ tehtiin Finnmap Consulting Oy:lle. Työn tavoitteena oli tutkia aukollisen seinälevyn jäykkyyttä, verrata tietokoneohjelman antamia tuloksia käsinlaskentamenetelmiin taipumien kautta ja luoda laskentapohja soveltuvista menetelmistä. Jäykkyyksien tarkkuus on oleellista vaakakuormien jakautumisen kannalta.</p> <p>Lähdetutkimuksen tuloksena löydettiin 4 laskumenetelmää. Nämä menetelmät olivat Rosman'in, Lewickin sekä kaksi ekvivalentin jäykkyyden menetelmää, joista tutkittiin niiden tarkkuutta käsinlaskumenetelmänä. Käsinlaskumenetelmien vertailuarvona käytettiin FEM-ohjelmalla saatuja taipumia. Ohjelma ei huomioi betonin halkeilua eikä perustusten painumaa.</p> <p>Lewickin menetelmä osoittautui olevan kaikista menetelmistä virheellisin. Rosman'in menetelmällä pääosin korkeammilla seinillä saatiin suuria virheprosentteja, kun taas matalilla (alle 15 metrisillä) seinillä saatiin osittain lähempänä vertailuarvon tuloksia. Menetelmistä soveltuvin käsinlaskumenetelmä oli ekvivalentin jäykkyyden menetelmä, jossa seinän jäyhysmomentti, joka muuttuu satunnaisesti suhteessa korkeuteen, otetaan huomioon prosentuaalisin osuuksin.</p> <p>Työssä tutkittiin myös aukollista seinäelementtiä, jonka molemmissa reunoissa on kiinni pilarit. Seinäyhdistelmän jäykkyyttä laskettiin kahdella menetelmällä, jossa eroavaisuutena oli aukollisen seinäelementin laskentamenetelmä, sillä pilarit huomioitiin molemmissa Steinerin menetelmällä jäykästi kiinni seinään. Ensimmäisessä menetelmässä aukollisen seinäelementin jäykkyys huomioitiin ekvivalentin jäykkyyden menetelmällä ja toisessa Rosman'in menetelmällä. FEM-laskentaohjelmalla lasketut tulokset antoivat jäykempiä tuloksia kuin käsinlaskettaessa. Käsinlaskentamenetelmien välillä ei ollut suurta eroavaisuutta.</p> <p>Laskentapohjat luotiin ekvivalentin jäykkyyden menetelmästä aukollisen seinälevyn laskentaa varten sekä aukollisen seinän, jonka päätyihin on kiinnitetty pilarit. Laskentapohjien on tarkoitus helpottaa rakennesuunnittelijoiden jäykisteiden suunnittelua jatkossa.</p>	
Avainsanat	Stabiilius, jäykkyys, aukollinen seinälevy, jäykistys

Author(s) Title	Sami Savolainen Stiffness of Fenestrated Wall Plate for Stiffening a Building
Number of Pages Date	40 pages + 3 appendices 23 Apr 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructor(s)	Anssi Kolehmainen, Head of department Jouni Kalliomäki, Senior Lectur
<p>This graduate study was done for Finnmap Consulting Oy. The company wanted to ease difficulty of choice in handmade calculation methods in stiffness calculations on fenestrated wall plates for stiffening a building. Four calculation methods were found which where Rosman's method, Lewicki's method and two equivalent stiffness methods. With those methods deformations were calculated and the results were compared to those from FEM-calculation software.</p> <p>Between the two equivalent stiffness methods the one that shares gyration moment by the wall's height was more accurate than the method that shares gap-crossing bulk's mass by the wall's height. Rosman's and Lewicki's methods, on the other hand, are based on the theory that assumes that gap-crossing bulks and fenestrations can be replaced by more elastic material which accepts deformations and receives less force than a basic wall.</p> <p>Lewicki's method was the most inaccurate method and its results were in every case higher than the reference value. Unlike the equivalent methods' results most of the cases were on the lower side especially when the height of a wall was less than 15 meters. Roseman's method's results were mostly higher than the reference value. The most accurate and suitable method for manual calculation was finally the equivalent method which shares gyration moment by the wall's height.</p> <p>When a fenestrated wall is between two columns, the assumption is that the columns would be totally joined to the wall. The combinations gyration was calculated using Steiner's method and the fenestrated wall was calculated with the equivalent and Rosman's methods, results from which were then compared to the reference value. These methods were Rosman's method and the equivalent method. However the reference values were stiffer than in totally joined structures. The most suitable method for this occasion turned out to be the equivalent method. The results of this method will give somewhat higher deformations than reference values.</p> <p>All method's turned out to be suitable with some caution. The most accurate method for both cases was the equivalent method.</p>	
Keywords	Stability, stiffness, fenestrated wall plate, stiffeners

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Työn taustaa	1
1.2	Tavoitteet ja tutkimusmenetelmät	1
2	Yleistä jäykistävästä seinistä	2
2.1	Jäykistysmenetelmiä	2
2.2	Mastojäykistys	5
2.3	Vääntöjäykkyys	6
2.4	Hajautettu ja keskitetty jäykistysjärjestelmä	7
2.5	Onnettomuustilanteet	9
2.6	Taipumia laskettaessa muistettavaa	10
3	Tarkasteltavat tapaukset	12
4	Mallinnus	13
5	Laskentamenetelmät	14
5.1	Taipuma	15
5.2	Rosman'in menetelmä	16
5.2.1	Rosman'in menetelmä yksiaukkoiselle seinälle	17
5.2.2	Rosman'in menetelmä kaksiaukkoisille seinille	19
5.3	Lewickin menetelmä	20
5.3.1	Lewickin tarkempi menetelmä yksiaukkorivilliselle seinälle	21
5.3.2	Lewickin tarkempi menetelmä kaksiaukkorivilliselle seinälle	24
5.4	Ekvivalentin jäykkyyden menetelmä	27
5.5	Pilareiden lisäys seinän päihin	28
5.6	Norjan betoniyhdistyksen metodi	30
6	Menetelmien tulosten analysointi	31
6.1	Ekvivalenttien menetelmien analysointi	31
6.2	Menetelmien analysointi	32
6.3	Pilarin ja seinän yhteistoiminnan analysointi	35

7	Yhteenveto	36
7.1	Esiintyneet ongelmat	37
7.2	Jatkotutkimusaiheita	38
7.3	Tavoitteiden saavuttaminen	38
	Lähteet	39
	Liitteet	
Liite 1.	Taipumien vertailu eri ekvivalenttien jäykkyyksien menetelmien välillä.	
Liite 2.	Taipumien vertailu eri menetelmien välillä.	
Liite 3.	Pilareiden ja seinän yhteistoiminnan kartoitus ekvivalentin jäykkyyden menetelmällä.	

Lyhenteet

$A=$	Poikkileikkauksen pinta-ala.
$b=$	Aukon leveys.
$d=$	Seinän paksuus.
$E=$	Kimmokerroin. Materiaalin muodonmuutosta vastustava termi. Tunnetaan myös nimillä kimmomoduuli, elastisuusmoduuli ja Youngin moduuli.
$F=$	Rakenteeseen kohdistuva voima.
FEM	Lyhenne juontuu englanninkielestä (<i>Finite Element Method</i>), joka viittaa elementtimenetelmään, jossa rakenne jaetaan osiin. Perusteena on mitä pienempiin osiin rakenne jaetaan, sitä tarkemmaksi laskennasta tulee. [1, s. 3.]
$G=$	Liukumoduuli. Materiaalin kyky vastustaa leikkausmuodonmuutoksia.
$H=$	Seinän kokonaiskorkeus.
$h=$	Kerroskorkeus.
$h_p=$	Aukonylityspalkin korkeus.
$h_o=$	Oviaukon korkeus
$I=$	Jäyhyysmomentti kuvaa kappaleen kykyä vastustaa taivutusta tietyn akselin suhteen. Tunnetaan myös muualla kirjallisuudessa nimillä neliömomentti ja hitausmomentti.
$k =$	Kerroslukumäärä
$L=$	Osan pituus (seinän tapauksessa seinän korkeus).

- $l =$ Osaseinien painopisteiden välinen etäisyys
- $p =$ Rakenteeseen kohdistuva tasanjakautunut kuorma
- $t =$ Aukonylityspalkin poikkileikkauksen leveys
- $y =$ Tarkasteltavan poikkileikkauksen osan painopisteen etäisyys koko poikkileikkauksen painopisteestä.

1 Johdanto

Finnmap Consulting Oy on yksi Suomen suurimmista rakennesuunnitteluun perehtyneistä yrityksistä. Finnmap Consulting Oy:n pääkonttori sijaitsee Pasilassa ja on myös FMC Groupin pääkonttori. Yritys on kokonaisvaltaisesti rakennetekniikkaan keskittynyt suunnittelu- ja konsultointiyritys. Finnmap Consulting Oy:n osaamisalueisiin kuuluu muun muassa puu-, betoni-, teräs-, liitto- ja komposiittirakenteet. [2.]

1.1 Työn taustaa

Rakennuksen rungolla on vaatimuksena kuormien kantokyvyn lisäksi riittävä stabiilius. Rakennus on stabiilissa tilassa, kun siihen kohdistuvat kuormat normaalitilassa ovat tasapainossa, sekä tilapäisistä lisäkuormista, esimerkiksi tuulikuormasta, aiheutuvat muodonmuutokset palaavat kuormituksen lakattua takaisin alkuperäiseen muotoonsa. Rakenteen jäykkyydellä tarkoitetaan rakenteen kykyä vastustaa muodonmuutosta. [3, s. 154.]

Maankäyttö- ja rakennuslaissa ei ole jäykistävistä rakenteista mitään suoraa ohjetta. Ainoana mainintana laissa on, että *”rakennuksen tulee täyttää rakenteiden lujuuden ja vakavuuden sen käyttötarkoituksen edellyttämällä tavalla”* [4, luku 17, § 117]. Rakennuksen jäykkyydelle on asetettu normeissa (eurokoodi ja RakMK) vaatimuksia taipumien kautta.

Tässä työssä keskitytään rakennuksen mastojäykistykseen, joissa yksi tai useampi mastojäykistys on muodostettu aukollisin seinämäisin masto-osin.

[5, s. 22-23; 6, s. 94; 7, s. 37-40.]

1.2 Tavoitteet ja tutkimusmenetelmät

Finnmap Consulting Oy tahtoo verrata yksinkertaistettuja jäykkyyslaskentamenetelmiä tietokonepohjaiseen FEM-laskentamenetelmään. Laskentamenetelmien välillä tarkastellaan taipumia, joista voidaan johtaa tarvittaessa jäykkyysluvat.

Tässä työssä keskitytään eri menetelmin laskettuihin taipumiin ja niistä saatuihin jäykkyyslukuihin, joista taipumia vertaillaan keskenään. FEM-menetelmää tarkastellaan tietokonelaskentaohjelman avulla ja käsinlaskumenetelmien tuloksia verrataan tietokonelaskentaohjelman laskemaan taipumaan. Vertailun pohjalta soveltuvimmista käsinlaskentamenetelmistä luodaan laskentapohja.

Tavoitteena on saada selville aukollisen jäykistävän seinälevyn kahden eri tapauksen käsinlaskentamenetelmistä tarkin menetelmä FEM-laskentamenetelmään verrattuna. Tapauksina ovat pelkkä aukollinen seinälevy ja toisena tapauksena aukollisen seinälevyn päätyihin on kiinnitetty pilarit.

2 Yleistä jäykistävästä seinistä

Oleellista jäykistävässä rakenteissa on niiden jäykkyyksien todenmukaisuus, etenkin eri jäykistysjärjestelmiä yhdisteltäessä, jotta rakennukseen kohdistuvien kuormien jakautumien saataisiin mahdollisimman tarkasti selville ja rakenneosat mitoitettua oikein. Toimisto- ja liikerakennusten ollessa pitkiä jäykistysjärjestelmien suunnittelussa tulee kiinnittää huomiota liikuntasauvojen sijoitteluun. Liikuntasauvoilla rakennus on jaettava erikseen tarkasteltaviin osiin jäykistysten kannalta, jotka eivät haittaa toistensa toimintaa. Betonielementtirakennuksessa maksimipituus liikuntasauvojen välillä on noin 60 metriä. [8, s. 88-90.]

2.1 Jäykistysmenetelmiä

Valtion Teknillinen Tutkimuskeskuksen julkaisussa on vertailtu muutamia eri jäykistysmenetelmiä. Taulukossa 1 on esitetty eri menetelmien etuja ja haittoja. Jäykistysjärjestelmät eivät aina esiinny puhtaasti taulukko 1:n mukaisesti, vaan niitä joissain tapauksissa myös yhdistellään, jotta saadaan riittävän vakavuuden omaava ja edullinen ratkaisu. [8, s. 109.]

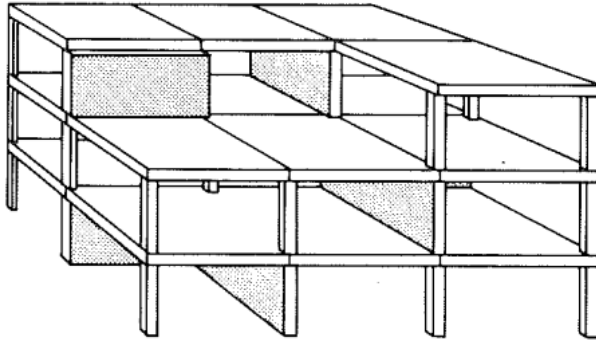
Mastojäykistys on taulukossa 1 esitetyistä menetelmistä toiseksi kallein, mutta kustannuksia voidaan vähentää esimerkiksi välttämällä tilapäisjärjestelyjä. Juotokset tulee tällöin tehtyä mahdollisimman pian elementtien asennuksen jälkeen. [9, s. 49.]

Taulukko 1. Jäykistysjärjestelmien ominaisuuksien vertailu. [8, s. 108]

Ominaisuudet	Jäykistysvaihtoehto			
	Mastojäykistys porrastornilla ja seinillä	Ristikkojäykistys	Kehäjäykistys	Mastojäykistys pilareilla
Jäykkyys / Taipuma	+++	++	++	+
Jäykistävän rakenteiden:				
– joustavuus	+	+++	+	++
– vaikutus tilaratkaisuihin	+	+++	++	+++
– vaikutus muihin rakenteisiin	+	+	+	+
Laskentamenetelmät ja ohjelmistot	++	+	++	++
Soveltuvuus mataliin / korkeisiin rakennuksiin	++	++ Ei suositella asuinrak.	+	+
Palosuojaus	++	+	++	++
		Vaatii erillisen		
Liitokustannukset	+	+	- Kalliit liitokset	+
Materiaalikustannukset/-menekki	+	+++	+	+++
Työkustannukset				
– työmaalla	+	+	- Työläät liitokset	+
– tehtaalla	+	++	++	+
-	=Huono			
+	=Välttävä			
++	=Hyvä			
+++	=Erittäin hyvä			

Kehäjäykistyksellä tarkoitetaan rakennusrungon muodostamaa jäykkänurkkaista kehää, joka itsessään jäykistää rakennuksen. Tyypillisesti sitä käytetään pilari-palkki-tyyppisissä runkoratkaisuissa. Ongelmakohtana kehäjäykistyksessä ovat nurkkaliitokset, joiden tekeminen on kallista ja aikaa vievää. Nurkkaliitoksien jäykkyys jää myös usein suhteellisen pieneksi, mikäli halutaan sauvojen pituudet pitää kohtuullisen pitkinä. [3, s. 166.]

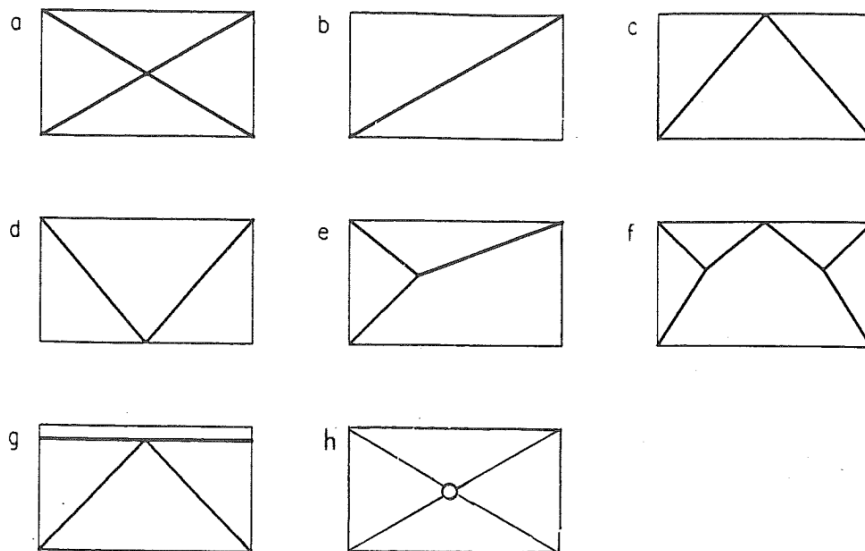
Jäykistäväksi seinäksi usein mielletään mikä tahansa jäykistävä seinämäinen levyosa, kuten levyjäykistykseen (ks. kuva 1) levy. Levyjäykistyksessä runkorakenteista tehdään labiili systeemi, joko nivelin tai tekemällä rakenteista tarpeeksi hoikat. Rungon jäykistys järjestetään kerroksittain kehän aukkoon sijoitetulla jäykällä levyllä. Tällöin periaatteessa yksi jäykistävälevy suuntaansa riittää stabiloimaan rakenteen. Jäykistävällä seinällä tarkoitetaan kuitenkin tässä työssä mastojäykistykseen masto-osaa. [3, s. 166.]



Kuva 1. Levyjäykistys. [3, s. 167.]

Ristikkojäykistys on periaatteeltaan levyjäykistykseen kaltainen. Ristikkojäykistyksessä korvataan levyjäykistyksessä olevat levyt veto- tai puristussauvoilla (ks. kuva 2). Jäykistysristikot eivät kannata pystykuormia, vaan ne saattavat saada lisärasituksia kannatinrakenteiden taipumista. [8, s. 27-28.]

Ristikkojäykistys sopii mainiosti nivelliitoksellisten kehärakenteiden jäykistämiseen, jolloin ristikkosauvat voidaan kiinnittää runkorakenteisiin nivelellisesti. Nivelliitokset ovat yleisesti kustannuksiltaan pienempi suunnittelun ja asennuksen kannalta kuin jäykät liitokset. Yleisimmin käytettyjä ristikkotyyppejä ovat a, b, c ja h kuvassa 2. [8, s. 27-28, 30.]



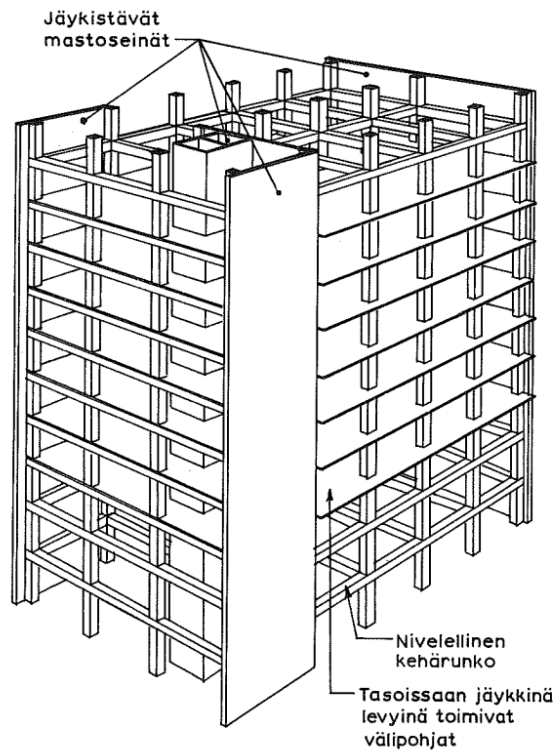
Kuva 2. Ristikotityyppejä. [8, s. 30.]

2.2 Mastojäykistys

Mastojäykistyksellä (ks. kuva 3.) tarkoitetaan menetelmää, jossa jäykistävinä rakenneosina toimivat perustuksiin tai massiivisiin kellarirakenteisiin jäykästi kiinnitetyt rakenneosat eli mastot, jotka pysyvät poikkileikkaukseltaan samana tai vähän muuttuen läpi koko rakenteen. Masto-osiin liittyy hoikkarakenteiset kehämäiset runko-osat, jotka ovat joko jäykkyydeltään niin pieniä, että ne itsessään muodostavat labiilin systeemin tai niistä muodostetaan nivelien avulla labiili systeemi. Mastorakenteita tulisi olla useampia ja edullisin sijainti näille rakenteille olisi mahdollisimman kaukana toisistaan.

Mastojäykisteisiä seiniä käytetään yleisesti korkeissa rakennuksissa elementtirungon jäykistysjärjestelmänä sekä toimistorakentamisessa mastosysteemit ovat yksi yleisimmistä ja tärkeimmistä jäykistysmenetelmistä. Korkeissa rakennuksissa saattaa itse mastorakenne koostua hoikista rakenteista, jolloin tulisi kiinnittää huomiota itse maston stabiiliteettiin. Mastojäykistyksessä vaaditaan myös, että välipohja toimii jäykkänä levynä. Välipohja voi tällöin siirtää vaakavoimat jäykistäville rakenneosille.

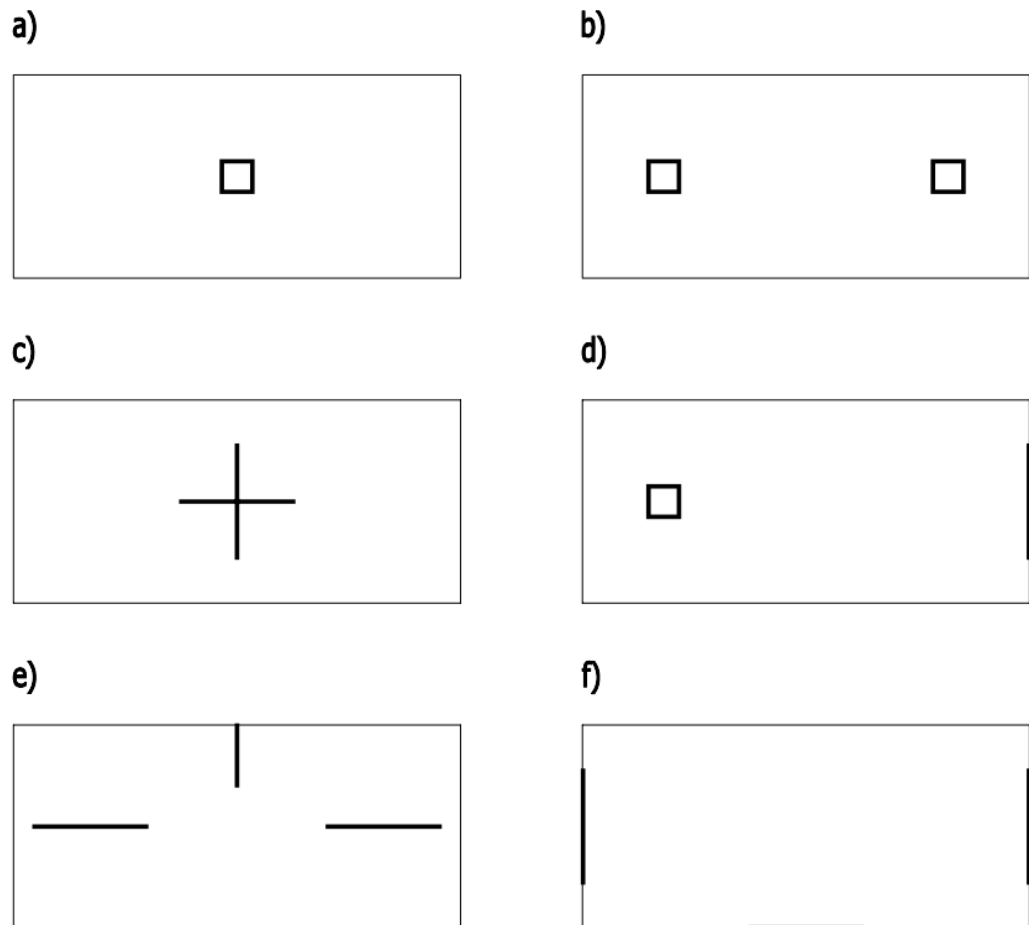
[3, s. 166-167; 7, s. 37-40.]



Kuva 3. Mastojäykistyksen periaate. [3, s. 167.]

2.3 Vääntöjäykkyys

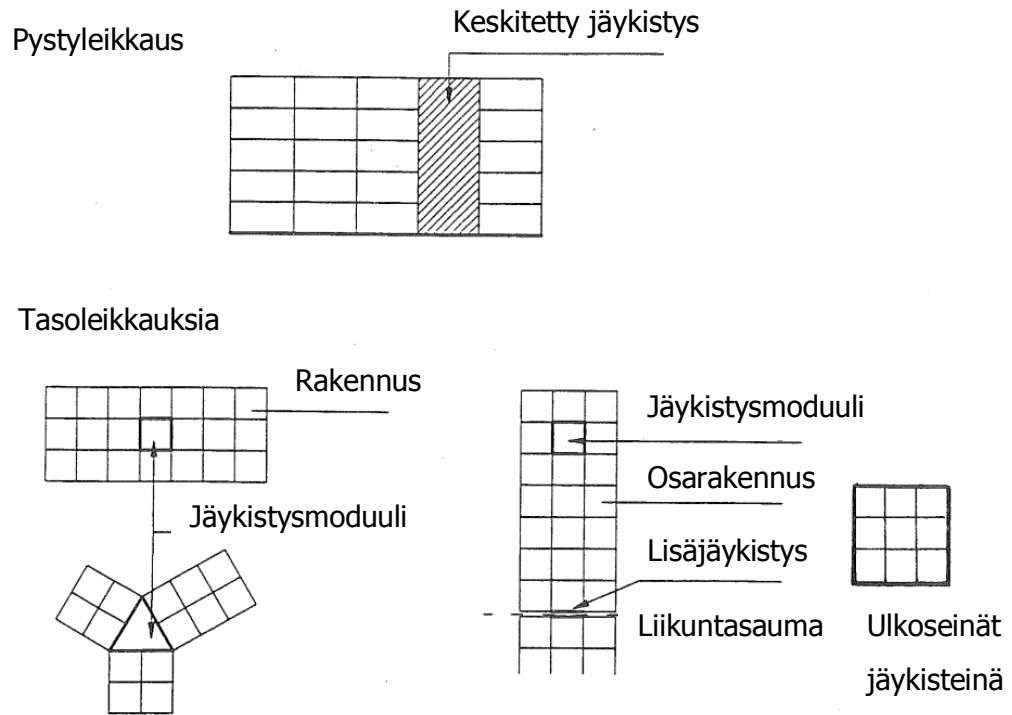
Sijoittamalla jäykistävät rakenneosat väärin voi rakennuksesta tulla kokonaisuudessaan labiili. Seinien sijoitteluun tulee kiinnittää tämän vuoksi huomiota. Vääntönurjahduksen kannalta rakennusrungossa täytyy olla useampi kuin yksi stabiloiva mastorakenne. Kuvan 4 tapauksissa a, c ja e jäykistävät rakenneosat muodostavat väännön kannalta epäedullisen tapauksen tai jopa labiilin systeemin. Tapaukset b, d ja f ovat suositeltavia jäykistävän rakenneosan sijoittelutapoja. [3, s. 176-177.]



Kuva 4. Jäykistävän rakenneosan sijoittelun kannalta hyviä ja huonoja ratkaisuja. [8, s. 28.]

2.4 Hajautettu ja keskitetty jäykistysjärjestelmä

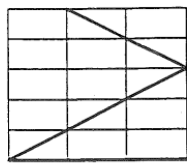
Mastojäykistys voidaan hyvin toteuttaa joko hajautettuna tai keskitettynä. Keskitetty jäykistysjärjestelmä (ks. kuva 5) on usein niin sanottu tornijärjestelmä, joka muodostuu hissikuilun tai porrashuoneen seinistä. Nämä muodostavat yhdessä kotelomaston. Tornijärjestelmän rinnalla usein käytetään jotain muuta järjestelmää ottamaan vastaan kiertymistä, koska pitkät välimatkat saattavat aiheuttaa rungolle liian suuria sisäisiä jännityksiä. [8, s. 25.]



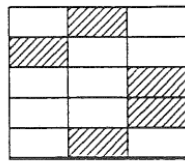
Kuva 5. Keskitetyn jäykistysjärjestelmän periaate. [8, s. 29.]

Hajautetussa järjestelmässä (ks. kuva 6) jäykistykset periaatteessa voidaan sijoittaa melko vapaasti. Suositeltavaa on kuitenkin sijoittaa ne rakennuksen ulkoreunoille, jolloin jäykisteeseen kohdistuvat kuormat ovat pienimmillään. Näin voidaan säästää myös materiaalikustannuksissa, kun jäykistävän seinän poikkileikkauspinta-alaa voidaan pienentää [8, s. 26].

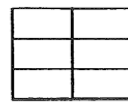
Pystyleikkauksia



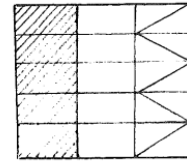
Diagonaalijäykistys



Levyjäykistys

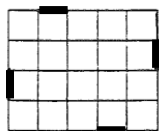


Mastojäykistys
pilareilla

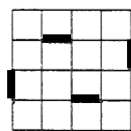


Yhdistetty masto- ja
diagonaalijäykistys

Tasoleikkauksia



Diagonaalijäykistys



Levyjäykistys



Mastojäykistys
pilareilla

Kuva 6. Hajautetun järjestelmän periaate. [8, s. 29.]

2.5 Onnettomuustilanteet

Jatkuva sortumisen huomioiminen rakenteiden suunnittelussa sai alkusysäyksen 16.5.1968, kun Ronan Point -nimisessä 22-kerroksisessa tornitalossa sattui kaasuräjähdyks, joka tuhosi kantavan seinän, josta seurasi rakennuksen osittainen sortuminen (ks. kuva 7). Onnettomuustutkinnan mukaan rakennus oli suunniteltu silloisten normien mukaan ja työn laatu oli myös hyväksyttävää luokkaa, mikä nostatti keskustelun elementtirakenteiden stabiiliudesta.

Nykynormien mukaan jäykistävien seinien osalta onnettomuustilanteessa rakenteen suuretkin muodonmuutokset ovat sallittuja, kunhan rakenne on suunniteltu niin, ettei se sorru tai kaadu, vaikka osa jäykistävästä seinästä menettäisi toimintakykynsä. Jäykistävät rakenteet eivät saisi olla myöskään keskitetty lähelle toisiaan, jotta ne eivät joutuisi toimintakyvyttömäksi yhtäaikaaisesti katastrofitilanteessa.

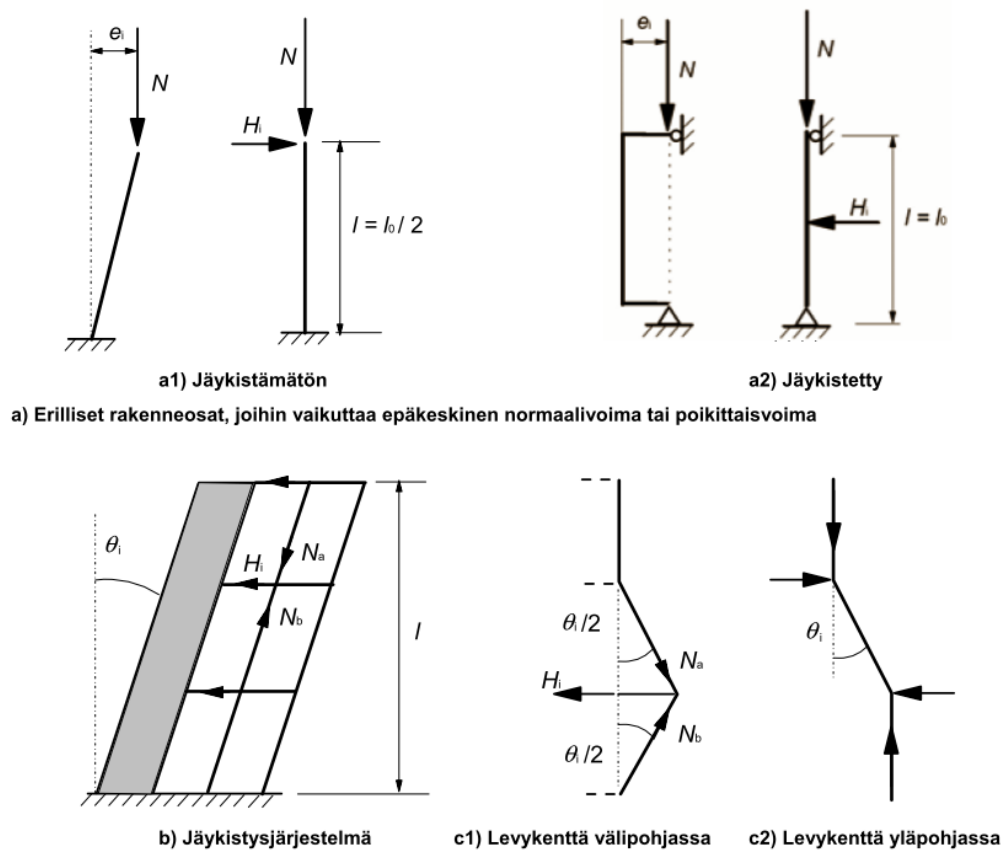
[10; 7, s. 92-93; 3, s. 197; 8, s. 18,19.]



Kuva 7. Ronan Pointin kaasuräjähdyksessä vaurioitunut kerrostalo. [10.]

2.6 Taipumia laskettaessa muistettavaa

Laskettaessa taipumia tulee muistaa, että rakennuksen todelliset taipumat eivät todennäköisesti vastaa laskettuja taipumia. Seinälevyjäykisteestä tulee jäykempi, jos siinä on liittyviä rakenteita, kuten esimerkiksi samansuuntaiset ei-kantavat seinät antavat hieman lisää jäykkyyttä. Rakenteen ollessa jäykempi sen vastaan ottama kuormitus on todellisuudessa suurempi ja rakenne tulee alimitoitettua. Liittyviin rakenteisiin välittyy jännityksiä, jos liitokset eivät anna myöten.

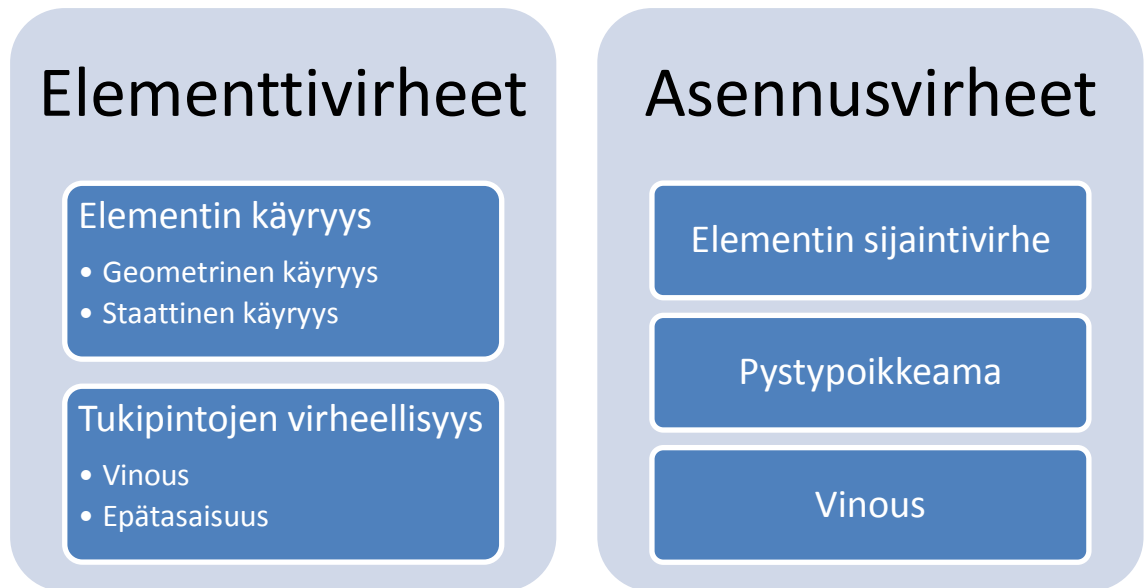


Kuva 8. Esimerkkejä mittaepätarkkuuksien vaikutuksesta. [6, s. 62.]

Rakennusvirheet saattavat kuitenkin aiheuttaa runkorakenteisiin mittaepätarkkuuksia (ks. kuva 8), joka myös tulee huomioida suunnitteluvaiheessa. Mittaepätarkkuudet voidaan ottaa huomioon eurokoodien mukaan kahdella eri tavalla. Ensimmäisenä eurokoodit esittävät mittaepätarkkuuksien huomioimisen vinouden kautta (ks. kohdat b, c1 ja c2 kuvassa 8), jolloin rakenteeseen aiheutuneet vinouksien vaikutukset voidaan korvata poikittaisvoimien avulla, jotka otetaan mukaan kuormitusyhdistelmään muiden kuormien ohella. Toisena vaihtoehtona kuormituksen epäkeskisyyden kautta (ks. koh-

dat a1 ja a2 kuvassa 8), jota käytetään vain lähinnä erillisten rakenneosien mitoitukseen.

Elementtirakenteet ovat normaalia herkempiä virheiden vaikutuksille niiden epämonoliittisesta rakenteesta johtuen. Lisäksi elementtirakentamiseen liittyy virhetekijöitä, joita ei tyypillisesti paikallavalurakentamisessa esiinny (ks. kuvio 1). Toisaalta paikallavalurakenteita ei pystytä valmistamaan niin mittatarkasti kuin elementtirakenteita.



Kuvio 1. Elementtirakenteisissa puristetuissa rakenteissa esiintyvät yleiset rakennusvirheet.

Geometrinen käyryys tarkoittaa rakenteen ulkomittojen tahatonta poikkeamaa suorasta linjasta, kun taas staattinen käyryys aiheutuu rakenteen epähomogeenisyydestä, kuten raudoituksen virheellisestä sijainnista tai betonimassan epähomogeenisyydestä.

Aikaisemmasta asennusvirheestä tai elementin mittavirheestä johtuen elementit eivät aina sovi yhteen, jolloin asentaessa elementit voidaan pakottamalla sovittaa yhteen, näin rakenteeseen saattaa aiheutua vinoutta ja lisäjännityksiä.

Seinään saattaa aiheutua myös lisäjännityksiä maaperässä tapahtuvat muutokset kuten painumat. Seinän alapinnan muutokset saattavat aiheuttaa yksittäisen seinän muuttumista labiiliksi. Tiedettäessä maaperän olevan vankka, ei tätä tarvitse huomioida, muutoin seinä joudutaan stabiloimaan esimerkiksi vinositeillä.

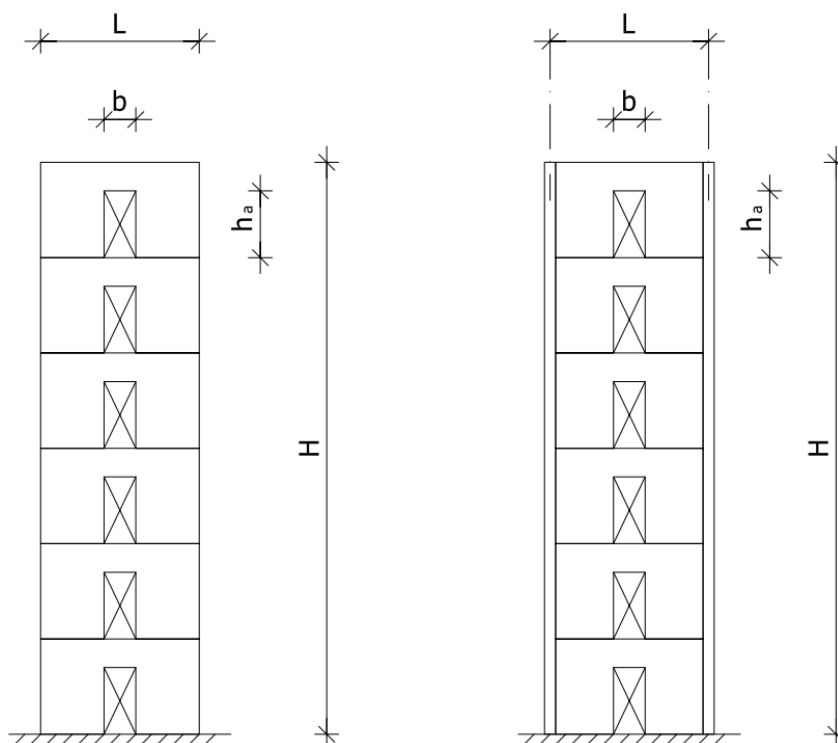
[6, s. 60-62; 7, s. 17-18; 8, s. 88; 11, s. 24-27.]

3 Tarkasteltavat tapaukset

Ensimmäisenä tarkasteltavana tapauksena on suora teräsbetonelementtiseinä, jonka korkeus (H kuvassa 9) voi vaihdella 3 kerroksen (9 metrin) ja 12 kerroksen (36 metrin) välillä. Rakenteen oletetaan olevan yhden seinäelementin levyinen, joten sen leveys (L kuvassa 9) joudutaan rajoittamaan 7 metriin. Seinän paksuutena käytetään 200 millimetriä.

Toisena tapauksena tarkastellaan seinää kuten ensimmäinen tapaus, mutta seinän päihin kiinnitetään pilarit. Pilareiden korkeus mukautuu seinän korkeuden mukaan ja paksuus ja leveys ovat 350 millimetriä.

Aukkorivin sijainti vaihtelee suhteessa seinän pituuteen. Tutkitut aukkorivin sijainnit ovat puolivälissä, kolmasosapisteessä ja neljäsosapisteessä suhteessa seinän pituuteen. Aukkojen kokoa joudutaan myös muuttamaan, jotta niiden muutosten vaikutus saadaan selville. Aukon leveys (b kuvassa 9) muuttuu 1,5 ja 0,5 metrin välillä. Aukon korkeus (h_a kuvassa 9) pidetään vakiona ajan säästämisen vuoksi.



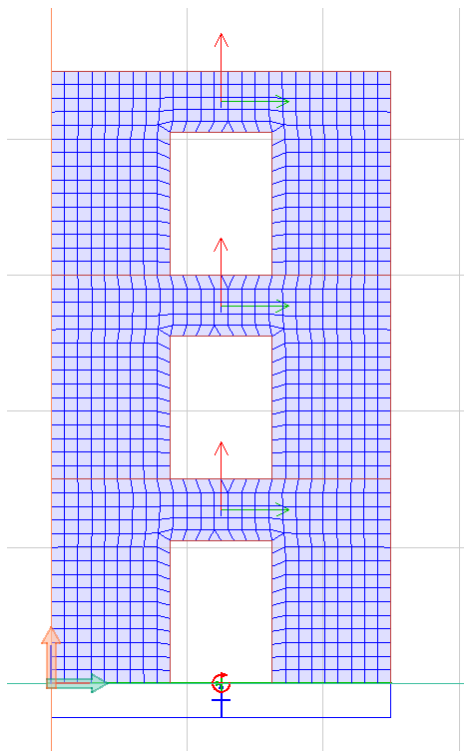
Kuva 9. Kaksi esimerkkitapausta, jossa havainnollistettu seinän muuttujat H , L , b ja h_a .

4 Mallinnus

Elementtimenetelmä, eli FEM-menetelmä, on kehitetty erityisesti osittaisdifferentiaaliyhtälöiden ratkaisemiseen, mutta menetelmä soveltuu myös tavallisten differentiaali- ja integraaliyhtälöiden sekä näiden sekoitusten (integro-differentiaaliyhtälö) selvittämiseen. Elementtimenetelmän idea on jakaa rakenne pienempiin osa-alueisiin, eli elementteihin. Elementin solmupisteille annetaan kantafunktio, joka määräytyy vapausasteen ja sisäisten voimien perusteella. [1, s. 3-9.]

FEM-laskentaohjelmana käytetään StruSoftin FEM-design-ohjelmaa. Yleisesti FEM-laskentaohjelmien tulokset riippuvat, siitä miten tapauksen mallintaa. StruSoftin ohjelma tarkastelee seinän elementtejä taselementteinä, jolloin se ei ota huomioon seinän heikompaan suuntaan tapahtuvaa liikettä. Laskennassa ei myöskään oteta huomioon betonin halkeilua tai perustusten painumaa.

Ohjelman laskentaan vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa elementtiverkon tiheys ja koostumus sekä liitosten mallinnustapa. Laskennassa käytettiin ohjelman pienintä sallitua verkkokokoa tarkkuuden lisäämiseksi sekä verkot koostuvat pääasiassa neliöistä (ks. kuva 10).

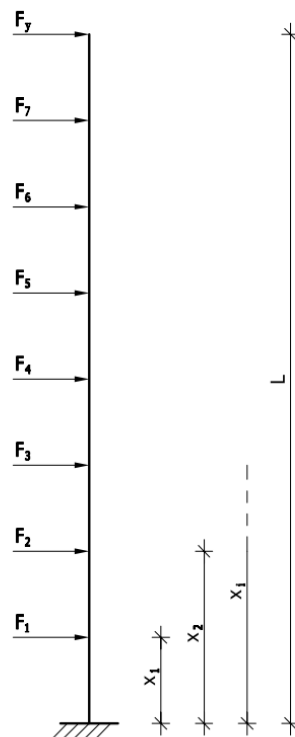


Kuva 10. Elementtiverkko on jaettu noin 0,2 metrin välein pysty sekä vaakasuuntaan.

Tapauksessa, jossa seinän reunoissa on pilarit, mallinnetaan pilareiden ja seinien väliset liitokset jäykästi kiinni toisiinsa. Muodonmuutokset saumassa aiheutuvat lähinnä leikkauksesta. Leikkausmuodonmuutos taivutusmuodonmuutokseen verrattuna on hyvin pientä tai jos leikkausmuodonmuutosta tapahtuu huomattavasti, on sauma jo haljennut. Tästä syystä voidaan olettaa, ettei leikkausmuodonmuutosta ole saumojenkohdalla.

5 Laskentamenetelmät

Tässä luvussa keskitytään laskentamenetelmien periaatteisiin, joista lähdetään kartoittamaan virheitä FEM-laskentamenetelmän taipumiin verrattuna. Suurin eroavaisuus eri menetelmien välillä on jäyhyysmomentin laskennassa, sillä jäykkyyden perustermeistä (kimmokerroimesta ja jäyhyysmomentista) kimmokerroin on materiaaliin riippuvainen ja tästä syystä vakio.



Kuva 11. Jäykistävän seinän staattinen malli.

Staattisena mallina on käytetty jäykästi alapäästä tuettua pilaria eli ns. mastopilari mallia (ks. kuva 11). Rakennusta kaatavana voimana on oletettu tuulikuorma, joka välittyy tasolaatoilta jäykistävälle seinälle pistekuormana.

5.1 Taipuma

Taipumaa tarkastellessa tulee ottaa huomioon, että rakenteeseen kohdistuva kokonaisvoima muuttuu, kun kerroslukumäärä muuttuu.

Vaakasiirtymien yhtälössä (1.) ensimmäinen termi on maston kärjessä vaikuttavan vaakavoiman aiheuttaman taipuman. Toinen termi on sauvan välillä olevien vaakakuormien aiheuttamien taipumien summa x :n funktiona. Kolmas termi ottaa huomioon pistekuormien aiheuttaman leikkausmuodonmuutoksen. Vaakasiirtymien yhtälöä selventävä staattinen malli on esitetty kuvassa 11.

$$v = \frac{F_y \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{F_i \cdot x_i^2 \cdot (3 \cdot L - x_i)}{6 \cdot E \cdot I} + \sum_{i=1}^n \frac{F_n \cdot x_i \cdot \varkappa}{G \cdot A} \quad (1.)$$

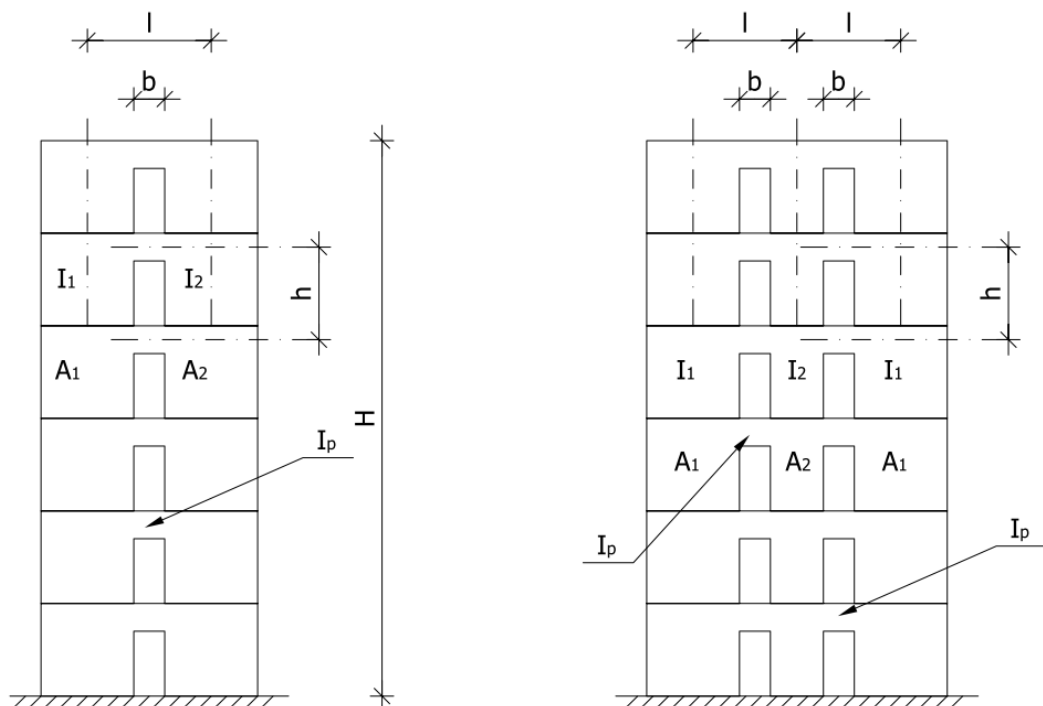
$F_y =$	Seinän yläpintaan kohdistuva kuorma.
$L =$	Seinän korkeus.
$F_i =$	Kuorma, joka kohdistuu pisteessä x_i .
$A =$	Seinän kokonais poikkileikkauspinta-ala.
$E =$	Materiaalin kimmokerroin.
$I =$	Seinän jäyhyysmomentti.
$G =$	Materiaalin liukumoduuli.
$\varkappa =$	Seinäprofiilin huomioiva termi.

Leikkausmuodonmuutoksen termissä esiintyvä kerroin \varkappa riippuu seinän profiilin muodosta. Suorakaidepoikkileikkauksella tämä kerroin on 1,2.

[3, s. 170-172.]

5.2 Rosman'in menetelmä

Rosman'in menetelmässä otetaan aukot huomioon sijoittamalla aukkojen kohdille heikennettyä välimassaa siten, että se vastaa leikkaus- ja taivutuskapasiteetiltaan korvattuja aukonylityspalkkeja. Menetelmää on yksinkertaistettu olettamalla aukonylityspalkit normaalivoiman suhteen äärettömän jäykäksi, koska aukonylityspalkkien kokoonpuristuma on niin pieni verrattuna taipumaan, että sen vaikutus katoaa jo tuloksia pyöristäessä.



Kuva 12. Rosman'in menetelmän merkintöjä.

Rosman'in kaavaa joudutaan muuttamaan sen mukaan, kuinka monta aukkoriviä rakenteeseen suunnitellaan. Kuvassa 12 on selvennetty yksiaukkoisen ja kaksiaukkoisen seinän merkintöjä.

[3, s. 181-182.]

5.2.1 Rosman'in menetelmä yksiaukkoiselle seinälle

Yhtälössä (2.) on esitetty yhden aukkorivillisen seinän korvausjäyhyysmomentti, jota voidaan käyttää taipuman yhtälössä (1.) yleisen jäyhyysmomentin sijasta.

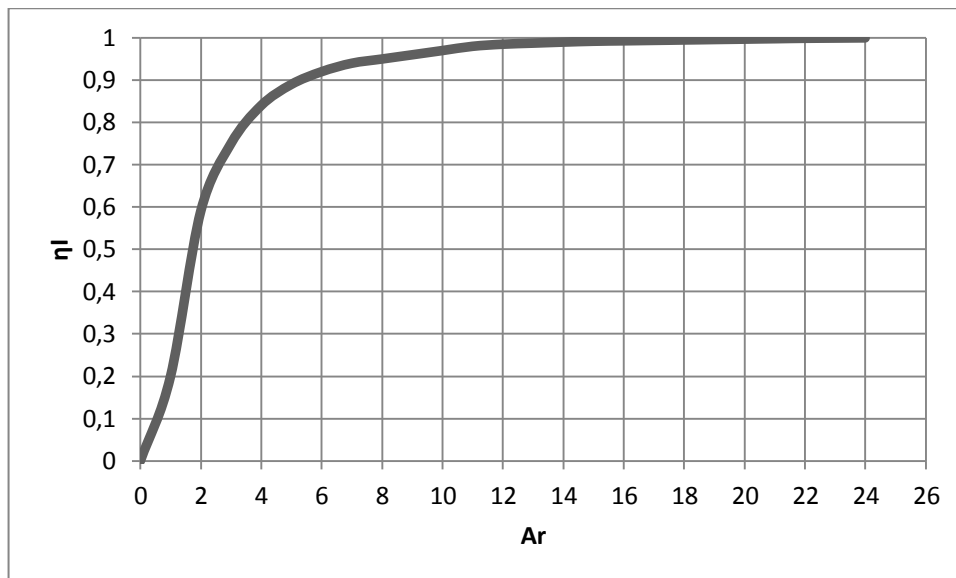
$$I_E = \frac{\sum I_i}{1 - \beta \cdot l \cdot \eta_l} \quad (2.)$$

$I_i =$	Osaseinän i jäyhyysmomentit.
$l =$	Osaseinien painopisteiden välinen etäisyys.
$\eta_l =$	Kerroin, joka riippu termista A_r (ks. kuvio 2 ja yhtälö (3.)).
$\beta =$	Kerroin, joka ottaa huomioon aukonylityspalkkien jäykkyyden (ks. yhtälö (5.)).

A_r -termi huomioi kahden seinän taipuman aiheuttamat pakko siirtymät aukonylityspalkille sen keskipisteessä.

$$A_r = H \cdot \sqrt{\left(\frac{l^2}{\sum I} + \frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) \cdot \frac{12 \cdot I_p}{h \cdot b^3}} \quad (3.)$$

$H =$	Seinän kokonaiskorkeus.
$A_1, A_2 =$	Osaseinien poikkileikkauspinta-ala.
$h =$	Kerroskorkeus.
$b =$	Aukon leveys.
$I_p =$	Aukonylityspalkin jäyhyysmomentti.



Kuvio 2. η_I :n määrittämiseen tarvittava kuvio.

Aukonylityspalkin jäyhyysmomentin kaavalle on oma yhtälö (4.), joka ottaa huomioon myös leikkausmuodonmuutoksesta aiheutuvan jäykkyystekijän. Aukonylityspalkin jäyhyysmomenttia käytetään η_I -termin määrittämiseen.

$$I_p = \frac{1}{12} \cdot \frac{t \cdot h_p}{1 + 2,8 \cdot \left(\frac{h_p}{b}\right)^2} \quad (4.)$$

$h_p =$ Aukonylityspalkin korkeus.

$t =$ Aukonylityspalkin paksuus.

$$\beta = \frac{\frac{l}{\sum I}}{\sum I + \frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2}} \quad (5.)$$

Rosman'in menetelmällä on mahdollista saada seinässä esiintyvät sisäiset voimasuureet seinän eri kohdissa, kuten esimerkiksi aukonylityspalkkien leikkaus ja taivutusmomentit.

[3, s. 181-182.]

5.2.2 Rosman'in menetelmä kaksiaukkoisille seinille

Kaksiaukkoisen seinän laskenta on lähes vastaavan laskutavan mukaan kuin yksiaukkoisen seinän laskenta. Aukonylityspalkin jäyhyysmomentti lasketaan, kuten yksiaukkoisella menetelmällä yhtälön (4.) mukaan. Korvausneliömomentin yhtälössä (6.) β -termin vaikutus otetaan kaksinkertaisena yksiaukkoisen laskentamenetelmään verrattuna.

$$I_E = \frac{\sum I}{1 - 2 \cdot \beta \cdot l \cdot \eta_I} \quad (6.)$$

$I =$	Osaseinien jäyhyysmomentit.
$l =$	Osaseinien painopisteiden välinen etäisyys.
$\eta_I =$	Kerroin, joka riippu termista A_r (ks. kuvio 1 ja yhtälö (7.)).
$\beta =$	Kerroin joka ottaa huomioon aukonylityspalkkien jäykkyyden (ks. yhtälö (8.)).

η_I -kertoimen laskennassa A_r -termi muuttuu. η_I -kerroin saadaan A_r -termin (7.) avulla kuviosta 2, sivulla 19.

$$A_r = H \cdot \sqrt{\left(\frac{2l^2}{\sum I} + \frac{1}{A_1}\right) \cdot \frac{12 \cdot I_p}{h \cdot b^3}} \quad (7.)$$

$H =$	Seinän kokonaiskorkeus.
$A_1 =$	Osaseinän 1 poikkileikkauspinta-ala.
$h =$	Kerroskorkeus.
$b =$	Aukon leveys.
$I_p =$	Aukonylityspalkin jäykkyys.

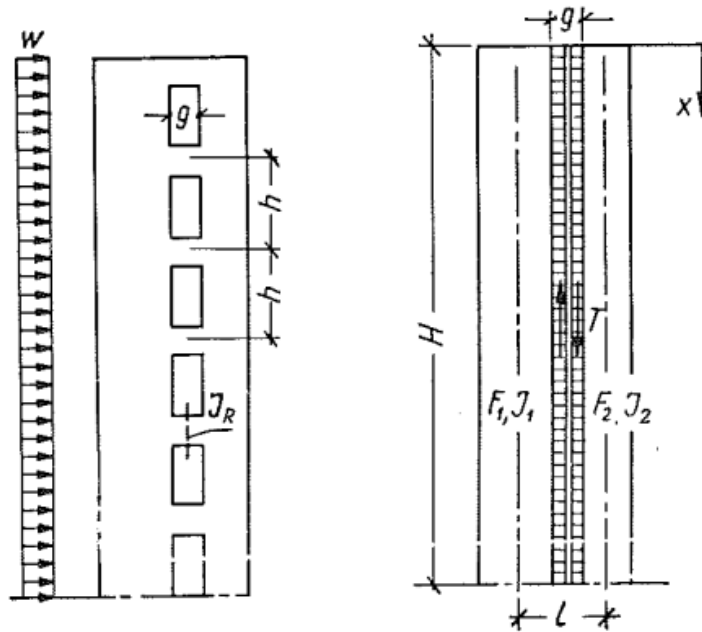
$$\beta = \frac{\frac{l}{\sum I}}{\frac{2 \cdot l^2}{\sum I} + \frac{1}{A_1}} \quad (8.)$$

β -termissä otetaan huomioon osaseinien painopisteiden etäisyyden neliö kaksinkertaisena verrattuna yksiaukkoisen menetelmän laskentamenetelmään.

[3, s. 181-182.]

5.3 Lewickin menetelmä

Lewickin menetelmä käyttää aiemmin mainitun Rosman'in menetelmän teoriaa, jolla aukonylityspalkit jaetaan seinien väliseksi heikennetyksi välimassaksi (ks. kuva 13). Lewickin menetelmästä löytyy kaksi laskentatapaa, karkea ja tarkempi. Tässä työssä keskitytään Lewickin tarkempaan menetelmään, jotta virheiden vaikutus jäisi minimaaliseksi.



Kuva 13. Lewickin menetelmässä jaetaan aukonylityspalkit yhdeksi yhtenäiseksi heikennetyksi välimassaksi. [12.]

Lewickin menetelmä on jaettu karkean ja tarkemman laskentatavan sisällä vielä kahteen laskentamalliin, yksi- ja kaksiaukkoriviseen seinään. Lewicki olettaa kuormien jakautuvan jäykkyyksien suhteessa sekä aukonylityspalkkien toimivan äärettömän jäykkinä.

Lewickin menetelmän taipuman kaavaa ei suoraan voida soveltaa staattiseen malliin, jota muihin malleihin on käytetty. Tästä syystä kaavaa sovelletaan niin, että vain taipuman kaavaa muutetaan. Toinen vaihtoehto olisi muuttaa staattista mallia, mutta Lewickin menetelmän muodostuttua FEM-menetelmän taipumat oli laskettu jo aiemmin valitulla staattisella mallilla, eikä uusien mallien laskemiseen jäänyt aikaa. μ -termien aiheuttaman periaatevirheen ei oleteta aiheuttavan suurta virhettä taipumaan.

[13, s. 18; 12, s. 169-209.]

5.3.1 Lewickin tarkempi menetelmä yksiaukkorivilliselle seinälle

Aluksi menetelmässä tarvitaan osaseinien ja ovipalkkien jäyhyysmomentit, jotka voidaan laskea yhtälöistä (9.) ja (10.)

$$I_i = \frac{d \cdot L_i^3}{12} \quad (9.)$$

I_i = Tarkasteltavan osaseinän jäyhyysmomentti.

d = Seinän paksuus.

L_i = Tarkasteltavan osaseinän pituus.

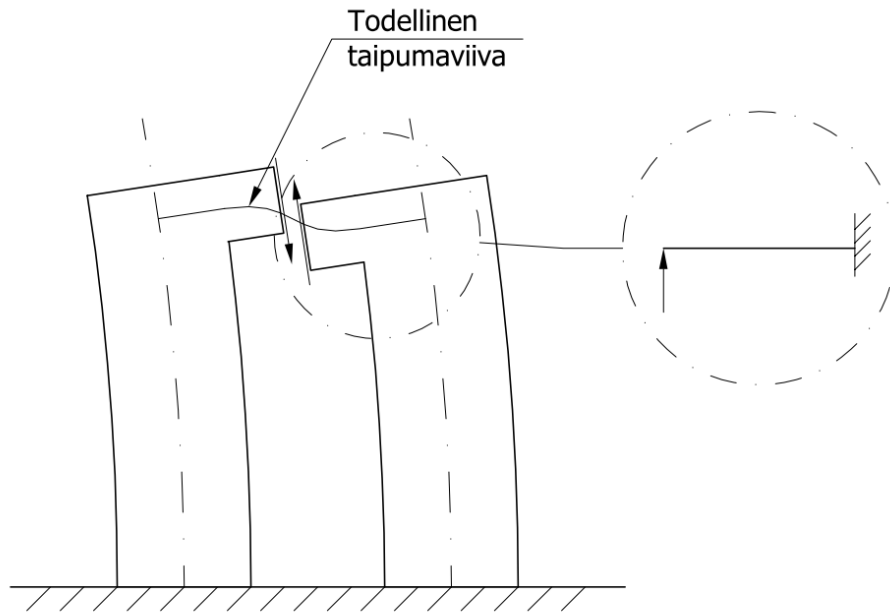
$$I_p = \frac{t \cdot h_p^3}{12} \quad (10.)$$

I_p = Aukonylityspalkkien jäyhyysmomentti.

t = Aukonylityspalkin paksuus.

h_p = Aukonylityspalkin korkeus.

Yksiaukkoisen seinän laskennassa tarvitaan hoikkuusluku, joka saadaan yhtälöstä (11.). Tämä huomioi aukonylityspalkin kykyä vastustaa seinien taipumasta aiheutuvia sisäisiä voimasuureita (ks. kuva 14).



Kuva 14. Aukonylityspalkkiin kohdistuvat sisäiset voimat kun seinät taipuvat.

Aukonylityspalkin keskipisteeseen vaikuttavan sisäisen leikkausvoiman ottaa huomioon yhtälö (12.)

$$\lambda = \left[\frac{l^2}{I_1 + I_2} + \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) \right] \cdot \frac{12 \cdot I_p}{h \cdot b^3} \quad (11.)$$

$$\mu = \frac{1}{2} \cdot \frac{p \cdot l}{I_1 + I_2} \cdot \frac{12 \cdot I_p}{h \cdot b^3} \quad (12.)$$

- $l =$ Osaseinien keskipisteiden välinen etäisyys.
 $I_i =$ Osaseinän i jäyhyysmomentti.
 $A_i =$ Osaseinän i poikkipinta-ala.
 $I_p =$ Aukonylityspalkin jäyhyysmomentti, ks. yhtälö (10.).
 $h =$ Kerroskorkeus.
 $b =$ Oviaukon leveys.

Seuraavaksi lasketaan korjaustermi a_k yhtälöistä (13.).

$$a_k = \mu \cdot \frac{\frac{-2}{(k \cdot \pi / 2 \cdot H)^3} \pm \frac{2 \cdot H}{(k \cdot \pi / 2 \cdot H)^2}}{\frac{1}{2} \cdot [(k \cdot \pi / 2 \cdot H)^2 \cdot \lambda]} \quad (13.)$$

$H =$	Seinän kokonaiskorkeus.
$k =$	Kerroin, jolla määritetään tulosten tarkkuus.
$\pm =$	k -kertoimesta riippuva etumerkki.

Yhtälö (13.) lasketaan useaan otteeseen eri k -kertoimen arvoilla aloittaen numerosta 1 ja jatkaen eteenpäin parittomilla numeroilla. Merkin \pm kohdalla joka toisen k -kertoimen arvolla käytetään positiivista arvoa ja joka toisella negatiivista. Mitä useampaan otteeseen lasketaan a_k -termi, sitä pienempi vaikutus suuremmilla k -kertoimien arvoilla on taipumaan. Laskettaessa kannattaa muistaa myös, että mitä pidemmälle k -kertoimen arvoilla päästään, sitä paremmaksi laskentatarkkuus tulee. Lewicki mainitsee kirjassaan, että jo kolmen k -kertoimen käytöllä pääsee sopivaan tarkkuuteen. Taipuman yhtälöön (14.) sijoitetaan lasketut a_k -korjaustermit.

$$v = \frac{1}{E \cdot (I_1 + I_2 + I_3)} \cdot \left[\frac{1}{8} \cdot p \cdot H^4 \pm l \cdot \sum_1^{2 \cdot n - 1} a_k \cdot \left(\frac{2 \cdot H}{k \cdot \pi} \right)^2 \right] \quad (14.)$$

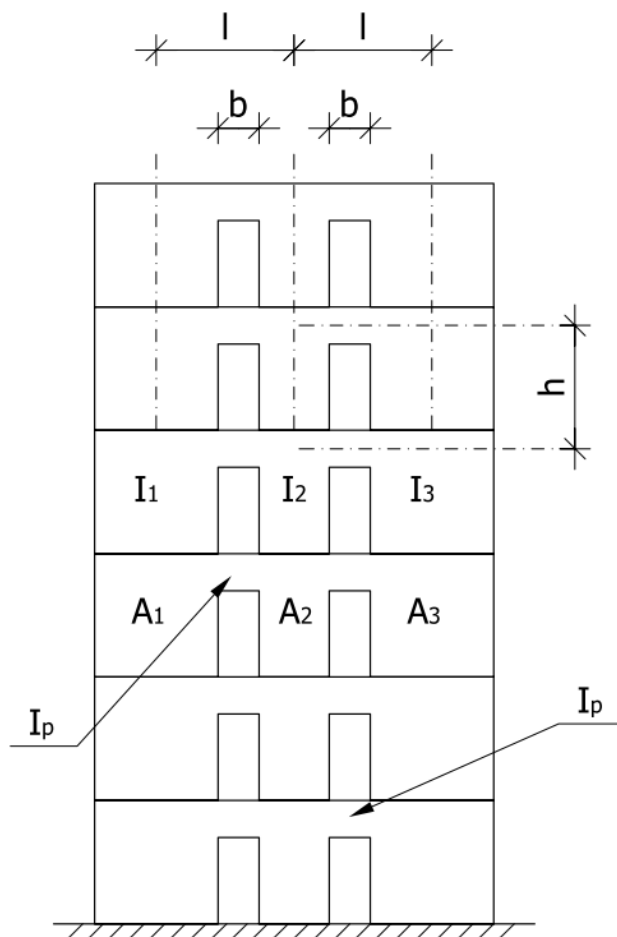
Sulkeissa olevan termin loppuosa on trigonometrian perusteella johdettu aukonylityspalkin taipuma sen keskipisteessä, jota täsmennetään kasvattamalla k -kerrointa. Koska yhtälö (14.) on sovellettu staattiseen malliin, jossa kuormana on tasanjaukautunut kuorma, muutetaan yhtälön (14.) sulkeiden sisältöä FEM-laskennassa käytetyn staattisen mallin mukaiseksi (ks. yhtälö (15.))

$$\left[\frac{1}{3} \left(F_y \cdot H^3 + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} \cdot F_i \cdot x_i^2 \cdot (3 \cdot L - x_i) \right) \pm l \cdot \sum_1^{2 \cdot n - 1} a_k \cdot \left(\frac{2 \cdot H}{k \cdot \pi} \right)^2 \right] \quad (15.)$$

[12, s. 185, 186.]

5.3.2 Lewickin tarkempi menetelmä kaksiaukkorivilliselle seinälle

Yksiaukkorivisen seinän, jäyhyysmomenttien yhtälöt (9.) ja (10.) ovat samat kuin kaksiaukkoriviselle seinälle. Kaksiaukkorivisen seinän laskentakaavassa on hieman eri merkinnät kuin Rosman'in kaavassa. Eroavaisuus on lähinnä päädyissä olevien osaseinien pinta-alojen huomioidnissa (ks. kuva 15). Kaksiaukkoriviselle seinälle hoikkuuslukuja tulee jo neljä, sillä keskimmäisen seinän hoikkuusluku riippuu aukonylityspalkin vastakkaisesta puolesta, kun taas yksiaukkoisella hoikkuusluku on aukonylityspalkin molemmin puolin sama. Kaksiaukkorivisen seinän hoikkuusluvut lasketaan yhtälöistä (16.), (17.), (18.) ja (19.).



Kuva 15. Lewickin menetelmän merkinnät kaksiaukkorivisellä seinällä.

$$\lambda_{11} = \left[\frac{l_1^2}{I_1 + I_2 + I_3} + \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) \right] \cdot \frac{12 \cdot I_p}{h \cdot b_1^3} \quad (16.)$$

$$\lambda_{12} = \left[\frac{l_1 \cdot l_2}{I_1 + I_2 + I_3} - \frac{1}{A_2} \right] \cdot \frac{12 \cdot I_p}{h \cdot b_1^3} \quad (17.)$$

$$\lambda_{21} = \left[\frac{l_2^2}{I_1 + I_2 + I_3} + \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_3} \right) \right] \cdot \frac{12 \cdot I_p}{h \cdot b_2^3} \quad (18.)$$

$$\lambda_{22} = \left[\frac{l_1 \cdot l_2}{I_1 + I_2 + I_3} - \frac{1}{A_2} \right] \cdot \frac{12 \cdot I_p}{h \cdot b_2^3} \quad (19.)$$

$l_i =$	Osaseinän i keskipisteen etäisyys koko seinän keskipisteseen.
$I_i =$	Osaseinän i jäyhyysmomentti.
$A_i =$	Osaseinän i poikkipinta-ala.
$I_p =$	Aukonylityspalkin jäyhyysmomentti, ks. yhtälö (10.) s. 21.
$h =$	Kerrokorkeus.
$b_i =$	Oviaukon i leveys.

Apusuureet μ_1 ja μ_2 saadaan yhtälöistä (20.) ja (21.). Apusuureet ottavat huomioon seinään kohdistuvan voiman jakautumisen aukonylityspalkkien sisäiseksi jännitykseksi.

$$\mu_1 = \frac{p \cdot l_1}{I_1 + I_2 + I_3} \cdot \frac{6 \cdot I_p}{h \cdot b_1^3} \quad (20.)$$

$$\mu_2 = \frac{p \cdot l_2}{I_1 + I_2 + I_3} \cdot \frac{6 \cdot I_p}{h \cdot b_2^3} \quad (21.)$$

$p =$ Seinään kohdistuva tasanjakautunut vaakavoima.

Seuraavaksi lasketaan korjaustermit a_{k1} ja a_{k2} yhtälöistä (22.) ja (23.), joiden avulla aukonylityspalkkien taipumien vaikutus saadaan.

$$a_{k1} = \frac{\frac{H}{2} \cdot \left[\left(\frac{2 \cdot H}{k \cdot \pi} \right)^3 \cdot (-2 \pm k \cdot \pi) \right] \cdot \left[\mu_1 \cdot \left[\left(\frac{k \cdot \pi}{2 \cdot H} \right)^2 + \lambda_{21} \right] - \mu_2 \cdot \lambda_{12} \right]}{\frac{H^2}{4} \cdot \left[\left(\frac{k \cdot \pi}{2 \cdot H} \right)^4 + (\lambda_{11} + \lambda_{21}) \cdot \left(\frac{k \cdot \pi}{2 \cdot H} \right)^2 + \lambda_{11} \cdot \lambda_{21} - \lambda_{12} \cdot \lambda_{22} \right]} \quad (22.)$$

$$a_{k2} = \frac{\frac{H}{2} \cdot \left[\left(\frac{2 \cdot H}{k \cdot \pi} \right)^3 \cdot (-2 \pm k \cdot \pi) \right] \cdot \left[\mu_2 \cdot \left[\left(\frac{k \cdot \pi}{2 \cdot H} \right)^2 + \lambda_{11} \right] - \mu_1 \cdot \lambda_{22} \right]}{\frac{H^2}{4} \cdot \left[\left(\frac{k \cdot \pi}{2 \cdot H} \right)^4 + (\lambda_{11} + \lambda_{21}) \cdot \left(\frac{k \cdot \pi}{2 \cdot H} \right)^2 + \lambda_{11} \cdot \lambda_{21} - \lambda_{12} \cdot \lambda_{22} \right]} \quad (23.)$$

- H = Seinän kokonaiskorkeus.
 k = Kerroin, jolla määritetään tulosten tarkkuus.
 \pm = k -kertoimesta riippuva etumerkki.

Yhtälöt (22.) ja (23.) lasketaan useaan otteeseen eri k -kertoimen arvoilla aloittaen numerosta 1 jatkaen eteenpäin. Kerroin saa olla vain pariton numero, jolloin \pm -merkin esiintyessä joka toisella parittomalla numerolla etumerkki on negatiivinen, kuten numeroilla, 3, 7 ja 11.

Laskentatuloksen tarkkuus täsmentyy mitä suurempaan lukuun k -kertoimissa päästään. Taipuman yhtälössä (24.) korjaustermit lasketaan yhteen \pm -merkin edellyttämällä tavalla. Riittävään tarkkuuteen päästään jo käyttämällä kolmea eri arvoa k -kertoimella.

$$v = \frac{1}{E \cdot (I_1 + I_2 + I_3)} \cdot \left[\frac{1}{8} \cdot p \cdot H^4 \pm \sum_1^{2 \cdot n - 1} (a_{k1} \cdot l_1 + a_{k2} \cdot l_2) \cdot \left(\frac{2 \cdot H}{k \cdot \pi} \right)^2 \right] \quad (24.)$$

Taipuman kaavaa on sovellettu yhtälössä (24.) tasanjakautuneelle kuormalle. Yhtälön (24.) sulkeiden sisältöä muutetaan staattiseen malliin soveltuvaksi (ks. yhtälö (25)).

$$\left[\frac{1}{3} \left(F_y \cdot H^3 + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} \cdot F_i \cdot x_i^2 \cdot (3 \cdot L - x_i) \right) \pm \sum_1^{2 \cdot n - 1} (a_{k1} \cdot l_1 + a_{k2} \cdot l_2) \cdot \left(\frac{2 \cdot H}{k \cdot \pi} \right)^2 \right] \quad (25.)$$

[12, s. 188, 189.]

5.4 Ekvivalentin jäykkyyden menetelmä

Ekvivalentilla jäykkyydellä tarkoitetaan, että rakenteen todellinen malli korvataan jäykkyyden kannalta idealisoidulla mallilla. Tähän löytyy useita metodeja, mutta tässä työssä keskitytään vain kahteen menetelmään.

Ensimmäisenä idealisointina käytetään mallia, jossa aukonylityspalkkien massa jaetaan koko seinän korkuiselle alueelle. Tällöin seinän paksuus ohenee aukonylityspalkin kohdalla. Tällöin seinästä tulee hieman I-profiilin kaltainen, jolloin jäyhyysmomentti voidaan laskea suoraan Steinerin menetelmällä (26.).

$$I = \sum I + \sum A \cdot y^2 \quad (26.)$$

$I =$ Tarkasteltavan osan jäyhyysmomentti.

$A =$ Tarkasteltavan osa pinta-ala.

$y =$ Tarkasteltavan osan painopisteen etäisyys koko poikkileikkauksen painopisteestä.

Toisessa mallissa ensin lasketaan aukon molemmin puolin olevien seinien jäyhyysmomentti kuin ne toimisivat yhdessä. Seuraavaksi lasketaan ehjän seinän jäyhyysmomentti. Jäyhyysmomentit otetaan huomioon niiden kattaman korkeuden osuuden suhteessa seinän kokonaiskorkeuteen. Sama asia laskettuna yhtälössä (27.)

$$I_{ekv.I} = \frac{I_{ehjä} \cdot h_p \cdot k}{H} + \frac{I_{ovi} \cdot h_o \cdot k}{H} \quad (27.)$$

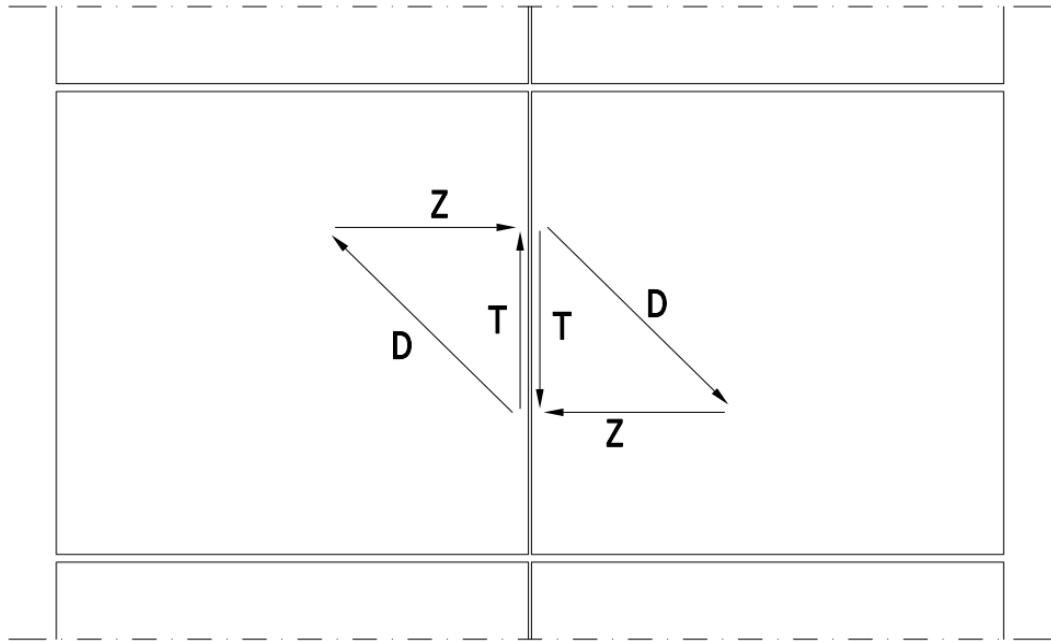
$h_o =$	Oviaukon korkeus.
$I_{ekv.I} =$	Ekvivalentti jäyhyysmomentti.
$I_{ehjä} =$	Ehjän seinän jäyhyysmomentti.
$I_{ovi} =$	Jäyhyysmomentti oviaukon kohdalla.
$k =$	Kerroslukumäärä.

5.5 Pilareiden lisäys seinän päihin

Jäykistävässä seinässä pystysaumamat ovat kriittisiä, sillä kyseessä olevien levyjäykisteiden jäykyyden kannalta saumat ovat ratkaisevia. Seinän jäykkyys on siis riippuvainen saumojen rakenteesta ja niiden toiminnasta.

Toimistorakentamisessa ei ole harvinaista, että saumoihin kohdistuu yli 100 kN/m leikkausjäännityksiä, koska toimistorakentamisessa seinien määrä ja pinta-ala pyritään saamaan mahdollisimman vähäiseksi, jotta mahdollisimman suuri pinta-ala saadaan hyötykäyttöön. Asuinrakentamisessa taas jäykistäviä seiiniä on usein paljon, jolloin tyypillisesti jo 50 kN/m leikkauskestävyys on riittävä.

Tavallisesti saumojä laskettaessa leikkausvoima jaetaan kuvan 16 mukaisiin vinoon puristuskomponentteihin D ja saumaa vastaan kohtisuoraan vetokomponentteihin Z. Yleisesti on oletettu puristuskomponentin kulmaksi 45 astetta. Tällöin elementtien saumassa esiintyvän puristusvoiman ottaa vastaan saumabetoni ja vetokomponentin saumateräkset.



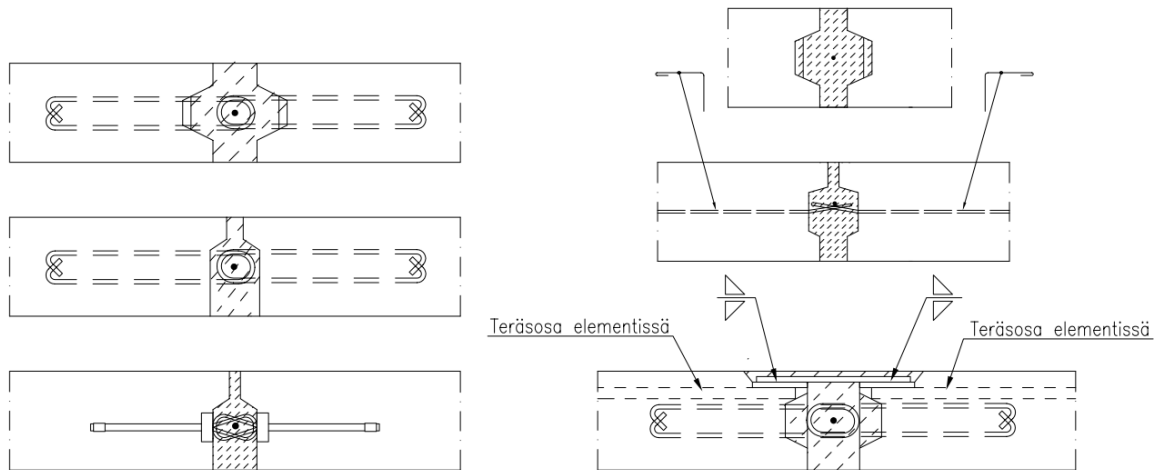
Kuva 16. Leikkausjännitysten jakautuminen elementtien pystysaumassa.

Saumaan kohdistuu myös leikkausjännityksen lisäksi myös pystykuormista aiheutuva pystysuuntainen puristusjännitys, jonka takia pääpuristusjännitys tulee paljon jyrkempään kulmaan kuin leikkauksen aiheuttama puristuskomponentti D. Puristuskomponentin jyrkentyessä puhdas leikkaus T kasvaa myös.

Saumojen jäykkyyksille ei ole mitään suoranaista kaavaa, toisin kuin saumojen vastaanottamille kuormille. Saksalaisessa tutkimuksessa on selvitetty erilaisten saumatyyppien kestävyyttä puhtaalle leikkaukselle [14].

Saumojen kantokykyyn vaikuttaa muun muassa saumamassan ominaisuudet, saumapintojen muotoilu, betonin lujuus, halkeaman muodostus tapaa, raudoituksen määrä ja järjestely sekä saumaa vastaan kohtisuoraan vaikuttava puristusvoima. Saumamassan ominaisuuksilla tarkoitetaan esimerkiksi saumalaastin tiheyttä ja adheesio-ominaisuuksia.

Tutkimuksen mukaan vaakasuuntaiset teräslenkit kasvattavat leikkauskestävyyttä. Haluaisijaltaan pienemmällä ja vaakalenkkien tiheämmällä sijoittelulla saadaan leikkauskestävyyttä paljon lisättyä. Sauman läpimenevä pystyteräs kasvattaa myös leikkauskestävyyttä.



Kuva 17. Erilaisia elementtien saumatyyppejä.

Pilarit ja seinä toimivat jonkin asteisessa yhteistyössä, riippuen saumatyypistä. Tämän takia on tärkeää, että seinän ja pilarin välinen liitos on mallinnettu oikein. Pilareiden ja seinien välinen liitos on mallinnettu jäykkänä liitoksena jolloin voidaan liitoksen olevan esimerkiksi kuvasta 17 vasemman yläkulman kuva, jossa taivutetut harjateräkset toimivat vaarnalennkinä ja sauman uumassa on koloja, jolloin kovettuessaan saumavalu kiilautuu elementtien väliin.

Pilareiden ja seinän yhteistoiminnasta luodaan kaksi laskentamallia. Ensimmäisessä mallissa käytetään Steinerin yhtälöä (26.) (ks. s. 28), jolloin pilarit ja seinä muodostavat yhdessä yksittäisen jäykemmän maston. Tässä mallissa aukollisen seinälevyn taipumat lasketaan ekvivalentin jäykkyyden menetelmällä. Toisessa mallissa toimitaan vastaavasti kuten ensimmäisessäkin, mutta aukollisen seinälevyn taipumat lasketaan Rosman'in menetelmällä.

[7, s. 73-77; 15; 14.]

5.6 Norjan betoniyhdistyksen metodi

Norjan betoniyhdistykseltä löytyi myös metodi konvertoida betonin jäykkyys aukollisesta seinästä. Menetelmää tutkiessa huomattiin, että aiheeseen pystyisi varmasti perehtymään syvemmin ja koska menetelmä ei suoraan anna taipumia monikerroksisille

aukollisille seinille, jätettiin pienen tutkinnan jälkeen menetelmän pois ajan säästämiseksi. Menetelmä jakaa aukollisen seinän palasiin, joista lasketaan taipumat. Nämä taipumat vielä konvertoidaan palasen sijainnin perusteella kokonaistaipumaksi korjauskertoimen avulla. [16. s. 72-74.]

6 Menetelmien tulosten analysointi

FEM-laskentaohjelman ja käsinlaskentamenetelmien välisellä virheellä ei ole suurta merkitystä kun käsinlaskentamenetelmän aiheuttama taipuma on suurempi. Perusteena tälle väittämälle on, että rakenne tulee ylimitoitettua. Ylimitus voidaan perustella luvussa 2.6 (s. 10-12.) esitetyillä rakennusvirheillä. Toisaalta tuloksen tulisi olla mahdollisimman täsmällinen, jotta koko rakennuksen kuormien jakautumien pystyttäisiin ennakoimaan mahdollisimman oikein. Väärin arvioidut kuormat voivat johtaa seinän taipumarajojen ylittymiseen tai pahimmassa tapauksessa seinän kantokyky peittää puutteellisen ankkuroinnin vuoksi.

Pieni virhe FEM-menetelmien alapuolelle on sallittavissa, sillä mitoittaessa rakenteita osavarmuuskertoimet kompensoivat virheen, mutta tulosten ollessa vertailuarvoa pienempi, valmistus- ja asennustöiden laatuun tulee kiinnittää huomiota.

Rakenteen ollessa vähemmän jäykkä kuin on oletettu, aukonylityspalkit joutuvat suurempaan rasitukseen. Aukonylityspalkkien peittäessä ei rakenne toimikaan enää yhtenä seinänä vaan kahtena todella huterana seinänä verrattuna ehjään aukolliseen seinään.

6.1 Ekvivalenttien menetelmien analysointi

Ekvivalenttien menetelmien taipumista tehty vertailu löytyy liitteestä 1. Silmämääräisesti tarkastellessa taipumia voidaan huomata, että ekvivalenttien jäykkyyksien menetelmistä molemmat ovat melko tasaväkisiä. Esimerkiksi taulukosta 2 voidaan huomata, että jäyhyysmomentin jakaminen korkeuden suhteen on tarkempi korkeilla seinillä. Tämä toistuu lähes jokaisella seinän leveydellä ja aukon sijainnilla.

Taulukko 2. Taipumat 7 metriä pitkällä seinällä, jossa metrin levyinen aukko seinän neljäs-osapisteessä.

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	5,433	5,786	6,5 %	5,924	9,0 %
11	3,927	4,124	5,0 %	4,243	8,0 %
10	2,762	2,849	3,1 %	2,950	6,8 %
9	1,882	1,895	0,7 %	1,979	5,2 %
8	1,218	1,203	-1,2 %	1,271	4,4 %
7	0,762	0,720	-5,5 %	0,774	1,6 %
6	0,451	0,400	-11,3 %	0,441	-2,2 %
5	0,250	0,201	-19,6 %	0,230	-8,0 %
4	0,129	0,087	-32,6 %	0,107	-17,1 %
3	0,063	0,030	-52,4 %	0,042	-33,3 %

Tarkastellessa tuloksia tarkemmin voidaan kuitenkin huomata, että massan jakamisen menetelmän taipumien virhe 112 tapauksessa 270 tapauksesta on suurempi kuin jäyhyysmomentin jakamisen menetelmän taipumat.

Tutkimuksen jatkoa ajatellen ekvivalenteista menetelmistä karsittiin pois massan jakaminen korkeuden suhteen, joten jäljelle jääneen ekvivalentin menetelmän tuloksia vertaillaan muihin menetelmiin.

6.2 Menetelmien analysointi

Vertaillen eri menetelmistä saatuja taipumia (ks. liite 2) huomataan, että räikeimmin erottuu joukosta Lewickin menetelmä. Lewickin menetelmän tulokset antavat huomattavasti suurempia taipumia kuin muut menetelmät.

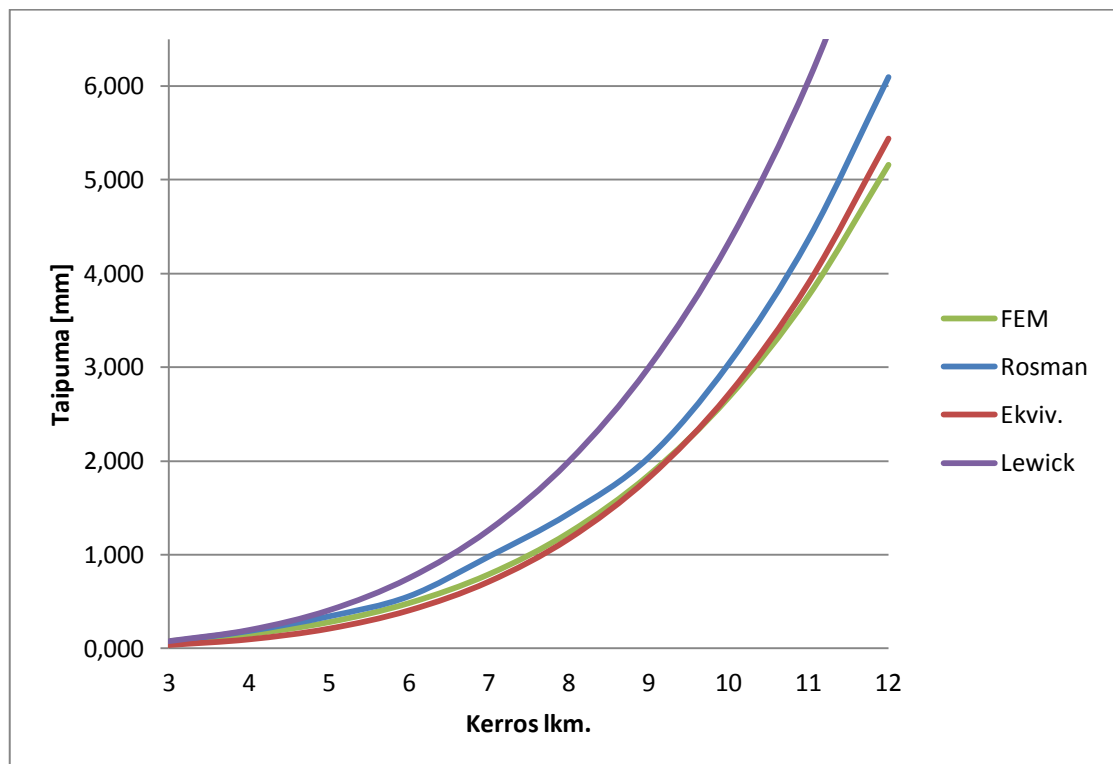
Laskentakaavalla lasketut tulokset vastasivat Lewicki Bohdanin opuksessa esiintyvän laskentakaavan tuloksia suurpiirteisesti. Opuksessa tuloksia oli kuitenkin pyöristelty runsaasti, mikä selitti tulosten eroavaisuuden.

Todennäköisesti kuitenkin suurin osa Lewickin ja FEM-menetelmien välisistä eroista johtuvat μ -termistä, jossa tapahtuu virhe, kun kuorma otetaan huomioon tasan jakau-

tuneena kuormana. Tämän termi olisi pitänyt kuitenkin johtaa uudelleen niin, että se olisi ottanut huomioon pistekuorman vaikutuksen.

Rosman'in menetelmän taipumat olivat myös lähes aina vertailuarvojen yläpuolella lukuun ottamatta matalilla seinillä. Matalillakin seinillä oli taipumien virheet paljon pienemmät, kuin ekvivalentin menetelmän taipumat.

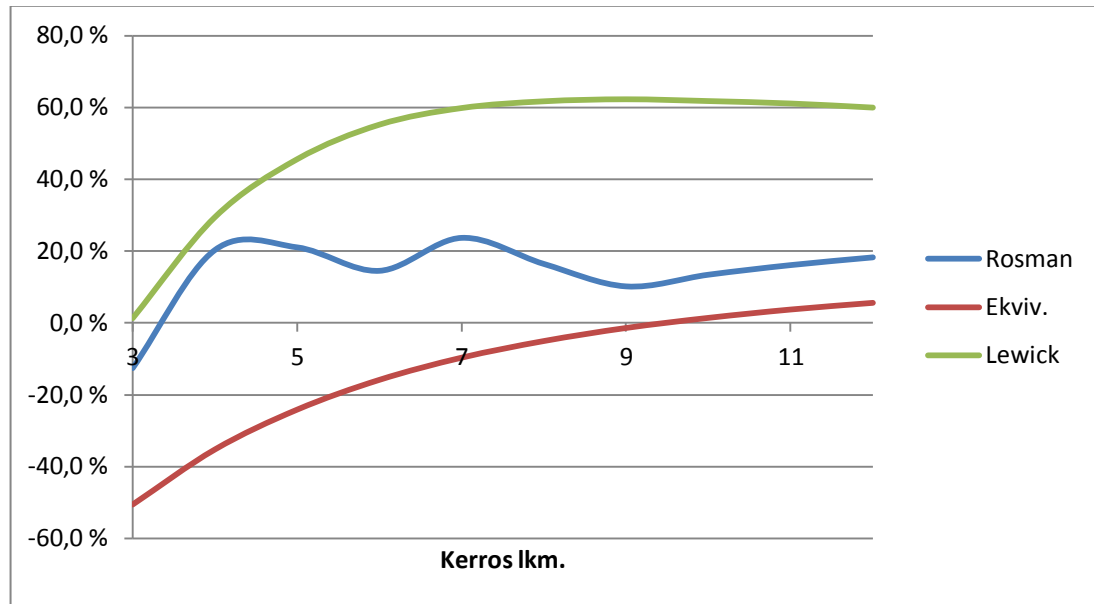
Rosman'in menetelmän taipuman käyrässä (ks. kuvio 3) tulee poikkeama (esimerkiksi 7 metrisellä seinällä, jossa aukko on puolessavälissä) kuudennen ja yhdeksännen kerroksen välillä. Tämän poikkeavuuden sijainti vaihtelee seinän leveyden ja aukon sijainnin mukaan. Poikkeavuuden voi havaita paremmin kuviosta 4, jossa on esitetty menetelmien virhe FEM-menetelmään nähden.



Kuvio 3. Eri menetelmillä lasketut taipumat 7 metriä pitkällä seinällä, jossa aukko sijaitsee seinän puolessavälissä.

Ekvivalentin jäykkyyden menetelmän taipumien käyrästä (ks. kuvio 3) voidaan todeta sen menevän lähes yhtä matkaa FEM-laskennasta saatujen tuloksien kanssa. Virhe alle 5-kerroksisilla seinillä on pääsääntöisesti vertailuarvojen alapuolella. Toisaalta jos tarkastellaan seinien virheen itseisarvoa, on ekvivalentti menetelmä tarkasteltavista menetelmistä kaikkein tarkin.

Rosman'in menetelmän virheen epätasaisuuden (ks. kuvio 4.) aiheuttaa η_I -kerroin, mutta menetelmän kannalta kerroin on välttämätön. Toisaalta Rosman'in menetelmän kerroin η_I on melko suuripiirteinen, sillä kirjallisuudessa tälle kertoimelle ei ole mitään absoluuttista kaavaa, vaan se on tulkittavissa käyrästä, jonka tarkkuus on silmämääräinen.



Kuvio 4. Taipumien virhe verrattuna FEM-laskentaohjelman taipumiin. Kuvio vastaa kuvion 2 tietoja.

Tämän takia odotukset Lewickin menetelmästä olivat suuret, sillä menetelmässä kaikki arvot perustuvat absoluuttisiin kaavoihin, joista saadaan tulokset. Rosman'in menetelmän virheen poukkoilu ei sinänsä ole haitallista, mutta se tekee menetelmästä arvaamattoman oloisen.

Pahimmassa tapauksessa molemmat (Rosman'in ja Ekvivalentin) taipumat ovat reilusti vähemmän kuin FEM:in antama tulos. Nämä tapaukset useimmiten sattuu tapauksissa, jossa seinän korkeus on alle 18 metriä ja virhe korostuu etenkin lyhyissä seinissä, joissa virhe voi olla jopa 70,5 prosenttia. Toisaalta matalilla seinillä taipumat ovat pieniä, joten pienikin virheiden erotus korostuu prosentteina ja saattaa näin kuulostaa hätkähdyttävän suurelta. Todellisuudessa pieni taipumien erotus lyhyillä seinillä saattaa kuitenkin sisältää suuria jännityksiä.

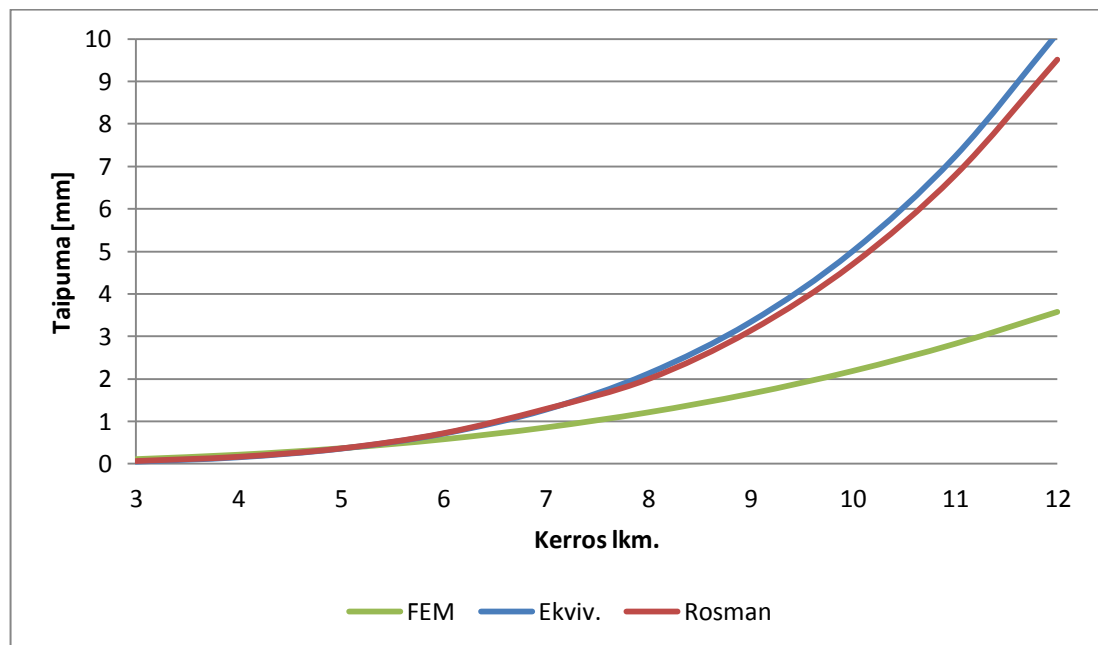
Tarkastellessa vain ekvivalenttia jäykkyyden ja Rosman'in menetelmää havaitaan, Rosman'in menetelmän olevan useammin suurempi kuin vertailuarvot. Taulukoitujen

virheiden perusteella voidaan huomata, että ekvivalentin menetelmän virhe nousee paraabelimaisesti, mikä on tästä syystä ennakoitavissa. Virhe on kuitenkin huomattavan usein pienempi kuin FEM-menetelmän antama taipuma.

Vertailuarvon pelkän ylityksen tai alituksen huomioiminen ei välttämättä tässä tapauksessa ole tarpeen vaan lähinnä virheen itseisarvon huomioiminen. Tarkemmassa tarkastelussa huomataan, että 185 tapauksessa 270 tapauksesta ekvivalentin jäykkyyden menetelmä on tarkempi kuin Rosman'in menetelmä.

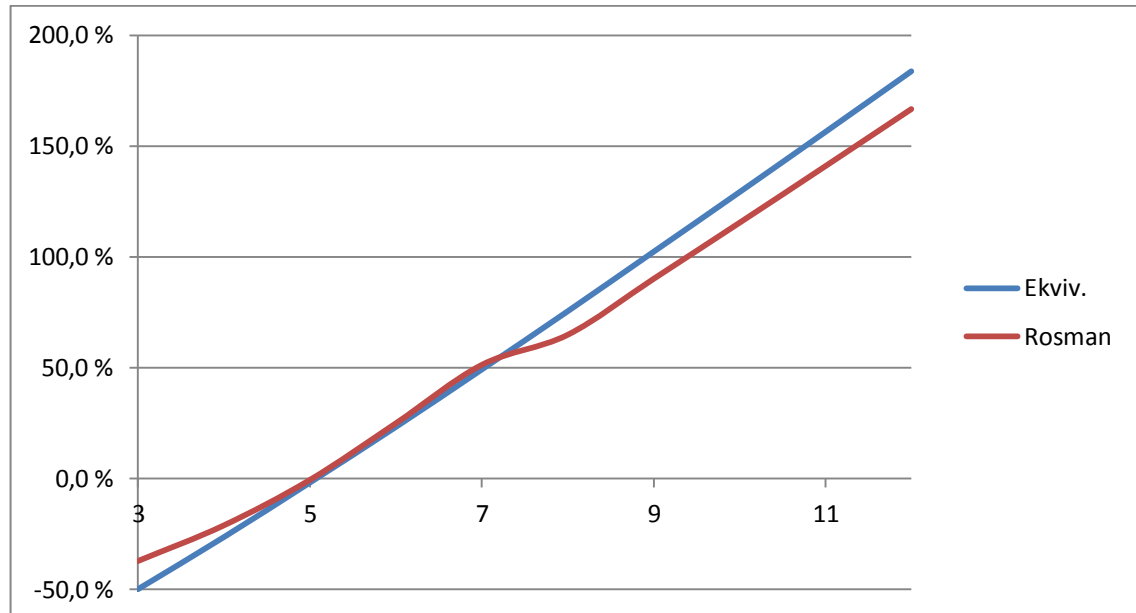
6.3 Pilarin ja seinän yhteistoiminnan analysointi

Liitteessä 3 on vertailtu taipumia eri menetelmin saatuja taipumia tapauksessa, jossa seinän reunoissa on pilarit. Kuviosta 5 voidaan huomata seinän jäykkyyden jäävän liian pieneksi korkeilla seinillä. Tämä korostuu etenkin leveillä seinillä (ks. liite 3). Lyhyimmällä tarkasteltavalla seinällä absoluuttisen kiinnittyneiden seinien taipuman käyrä seuraa FEM-laskentaohjelman taipuman käyrää melko tarkasti todennäköisesti vain sattumalta. Tosin tässä tapauksessa taipuman virheet ovat vertailutulosten alapuolella puolella koko matkan.



Kuvio 5. Pilari-seinä-pilari-yhdistelmän taipumat, kun pilareiden välinen etäisyys on 5 metriä ja 1 metriä pitkä ja 2,1 metriä korkea aukko sijaitsee seinän puolessavälissä.

Taipumien prosentuaalinen virhe ekvivalentilla menetelmällä on lähes lineaarinen yli 3 metrisillä seinillä (ks. kuvio 6). Olettaessa taipuman prosentuaalisen virheen olevan täysin lineaarinen suhteessa FEM-laskentaohjelmasta saatuun virheeseen, olisi mahdollista luoda korjauskerroin, joka korjaa menetelmien väliset virheet.



Kuvio 6. Pilari-seinä-pilari-yhdistelmän virhe FEM-laskentaohjelmaan verrattuna, kun seinän dimensiot vastaavat kuviossa 4 käytetyn seinän dimensioita.

Olettaessa korjauksen olevan lineaarinen tapahtuu kuitenkin virhe, kun seinän leveys pienenee, mutta tulosten tarkentuessa entisestä tämä on varmasti mielekkäämpi. Korjaustermin tulisi olla riippuvainen seinän ja pilarin dimensioista sekä aukon sijainnista suhteessa seinään.

7 Yhteenveto

Laskentamenetelmiä haettiin Internetistä ja kirjastoista sekä lähtötietona annetusta kirjallisuudesta. Menetelmien eroavaisuuksista tehtiin taulukot ja kuvaajat, joista näkee menetelmien laskeman taipuman eroavaisuudet.

Potentiaalisia käsinlaskumenetelmiä löytyi neljä, joita olivat Lewickin menetelmä, Rosman'in menetelmä ja kaksi ekvivalentin jäykkyyden menetelmää. Ekvivalentin jäykkyyden menetelmistä jätettiin pois laskuista jäyhyyshmomentin idealisointi. Lewickin menetelmän tulokset olivat reilusti vertailuarvon yläpuolella, mikä johtui yhtälön soveltumat-

tomuudesta staattiseen malliin. Rosman'in menetelmä oli toiseksi tarkin, mutta korkeissa seinissä hävisi menetelmä ekvivalentin jäykkyyden menetelmälle, jossa aukonylityspalkkien massa jaetaan koko korkeuden mukaan.

Tarkastellessa aukollisen seinän laskumenetelmiä, jonka päihin on kiinnitetty pilarit, ei jäykkyydelle löytynyt suoraan mitään kaavaa. Laskentamenetelminä sovellettiin ekvivalentin jäykkyyden menetelmää, jolla laskettiin seinän jäyhyysmomentti. Pilareiden kiinnitysteesta ei ollut tietoa, joten oletettiin taipumien olevan täysin kiinnittyneen ja täysin erikseen toimivan rakennemallin välillä. Vastoin odotuksia FEM-laskennan tuloksista tuli jäykempi, jolloin laskentamenetelmäksi soveltui parhaiten ekvivalentin jäykkyyden menetelmä, jossa pilarit ovat täysin kiinnittyneet seinään.

7.1 Esiintyneet ongelmat

Lewickin menetelmää tutkiessa esiintyivät suurimmat ongelmat. Lähtötietona annetuksa insinööriyössä mainittiin kyseinen Lewickin menetelmä, mutta laskentakaavat eivät antaneet oikeansuuntaista tulosta. [13.]

Laskentamenetelmän on kehittänyt itävaltalainen Lewicki Bohdan, joka on julkaissut sen teoksessaan *Hochbauten Aus Grossformatigen Fertigteilen*. Teosta ei ollut kuitenkaan saatavilla pääkaupunkiseudun alueen koulujen tai kaupunkien tarjoamissa kirjastoissa työn tekemisen aikana, joten menetelmän virheen määrittäminen oli isompi työ kuin kuvittelin.

Laskentakaavaa lähemmin tarkastellessa huomasin aukonylityspalkin jäyhyysmomentin kaavan olevan virheellinen. Aukonylityspalkin jäyhyysmomentin kaavan korjaamisella kuitenkin vain kaksiaukkorivillisen seinälevyn taipumista tuli järkeviä.

Verratessa kaksiaukkoisen ja yksiaukkoisen menetelmän korjaustermejä toisiinsa oli μ -korjaustermien (ks. s. 10. ja 12.) ero yli tuhatkertainen. Korjaustermien voiman suhde jäykkyyteen oli lisätty palkin taivutusvastukseen, kun taas kaksiaukkoisessa nämä kaksi olivat kerrottuna toisillaan. Yksikkötarkastelussa tekijöiden summaus ei olisi ollut edes mahdollista. Korjattuani tämän korjaustermien Lewickin menetelmän lopputuloksista tuli oikeansuuntaisia. Lopulta sain selville, että Finnmap Consulting Oy:llä on oma kirjasto, josta tämä teos lopulta löytyi. Korjaukset, jotka olin päätellyt, olivat oikein.

7.2 Jatkotutkimusaiheita

Norjan betoniyhdistys on laatinut jäykkyydelle yhtälön, jota ei tässä työssä erityisemmin tutkittu, koska sitä ei pysty soveltamaan monikerroksisen seinän staattiseen malliin. Menetelmässä oletetaan kaikkien seinien olevan yhtä korkeita, jolloin voidaan olettaa seinien olevan yhden kerroksen korkuisia. Tällöin saadaan seinille jakautuvien kuormien osuudet helposti, mutta taipumia ei menetelmällä oikeastaan voida tällöin laskea. Taipumien kannalta voitaisiin tutkia, miten menetelmän saisi soveltumaan korkeampiin rakennuksiin. [16. s. 72-74.]

7.3 Tavoitteiden saavuttaminen

Työn tavoitteena oli helpottaa jäykistävän aukollisen seinälevyn, sekä vastaavan levyn jonka päihin on kiinnitetty pilarit, käsinlaskumenetelmien valintaa. Näistä menetelmistä oli tarkoitus myös luoda tarvittaessa laskentapohja soveltuvaan menetelmään.

Menetelmistä vakuuttavin oli ekvivalentin jäykkyyden menetelmä, joka laskee jäykkyydet seinän eri jäykkyydet ja suhteuttaa ne korkeuteen. Ehdotan menetelmän käyttöä etenkin korkeammille seinille, koska matalilla (alle 15-metrisillä) seinillä se tekee seinästä jonkin verran jäykemmän kuin muilla menetelmillä. Rosman'in menetelmä on myös yksi suositeltavista menetelmistä, mutta menetelmä antaa pääsääntöisesti hieinan muita menetelmiä suurempia taipumia.

Lewickin menetelmää voidaan myös käyttää varauksella, koska menetelmä heikentää jäykkyyttä jolloin tulee huomioida, että rakenteeseen todellisuudessa kohdistuu suurempi kuorma kuin laskentamallissa.

Laskentapohjat luotiin ekvivalentin jäykkyyden menetelmästä, jonka tuloksina saadaan yksittäisen aukollisen seinän taipuma ja seinärakenteen jäykkyytluku vahvempaan suuntaan. Toinen laskentapohja luotiin ekvivalentin jäykkyyden menetelmästä, jonka tuloksina saadaan yksittäisen seinäjärjestelmän (jossa aukollisen seinän päihin on kiinnitetty pilarit) taipuma ja seinäjärjestelmän jäykkyytluku vahvempaan suuntaan.

Lähteet

- [1] Tervo Jouko ja Vauhkonen Marko, 2000, Elementtimenetelmän perusteita, Kuopion Yliopisto, Kuopio.
- [2] Finnmap Consulting Oy:n verkkosivut, Luettu 24.2.2012, <<http://www.finnmapcons.fi/>>.
- [3] Kaista Pentti ja kumppanit, 1977, Betonielementtirakenteet (RIL 115), Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, Helsinki.
- [4] 1.1.2000, Maankäyttö- ja rakennuslaki, Ympäristöministeriö.
- [5] 2004, Suomen rakentamismääräyskokoelma B4, Betonirakenteet, Ympäristöministeriö.
- [6] 2007, SFS-käsikirja 202, Eurokoodi 2, Betonirakenteiden suunnittelu, Suomen Standardisoimisliitto.
- [7] Heino Veikko, 1974, Betonielementtirakennusten stabiilius, Helsingin teknillinen korkeakoulu, Helsinki.
- [8] Ratvio Juha ja Kullaa Jyrki, 1994, Betonielementtirakennusten jäykistys, Toimistorakennukset ja monikerroksiset asuinrakennukset, Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, Espoo.
- [9] Korhonen Pekka ja Lanu Matti, 1988, Betonielementtirungon nopea pystytys- ja jäykistystekniikka, Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, Espoo.
- [10] Wikipedia internet tietosanakirja verkkosivut, Luettu 5.4.2012, <http://en.wikipedia.org/wiki/Ronan_Point>.
- [11] Laitakari Antti, 1975, Rakennusten mastojäykistysten laskeminen, Teknillinen korkeakoulu, Helsinki.
- [12] Lewicki Bohdan, 1967, Hochbauten Aus Grossformatigen Fertigteilen, Franz Deuticke, Wien.
- [13] Kullström Fredrik, 2007, Tekla Structures-Staadin soveltuvuus betonielementtien mitoituksessa, Helsingin Ammattikorkeakoulu, Helsinki.
- [14] Von Halász Robert ja Tantow Günter, 1966, Schubfestigkeit der Vertikalfugen und Verteilung der Horizontalkräfte im Grosstafelbau, Wilhelm Ernst & Sohn, Berliini.

- [15] Betoniteollisuus Ry:n verkkosivut, Luettu 20.3.2012,
<http://www.betoni.com/valmisosa_cd_03/M-osa/maindoc3.htm>.
- [16] 1988, Konstruksjonshåndbok Betongelementer, Hefte B, Norges Betongindustriforbund, Oslo.

Taipumien vertailu eri ekvivalentin jäykkyyden menetelmien välillä

Ohjeistus taulukon lukua varten:

Taulukossa on esitetty eri ekvivalentin jäykkyyden menetelmin laskettuja taipumia.

FEM= Elementtimenetelmällä saatu taipuman vertailuarvo.

Ekviv. I= Ekvivalentin jäykkyyden menetelmä, jossa seinän korkeuden suhteen vaihteleva neliömomentti on keskiarvoisesti sama koko rakenteessa.

Ekviv. d= Ekvivalentin jäykkyyden menetelmä, jossa seinän aukonylityspalkkien massa on jaettu koko seinän korkeudelle.

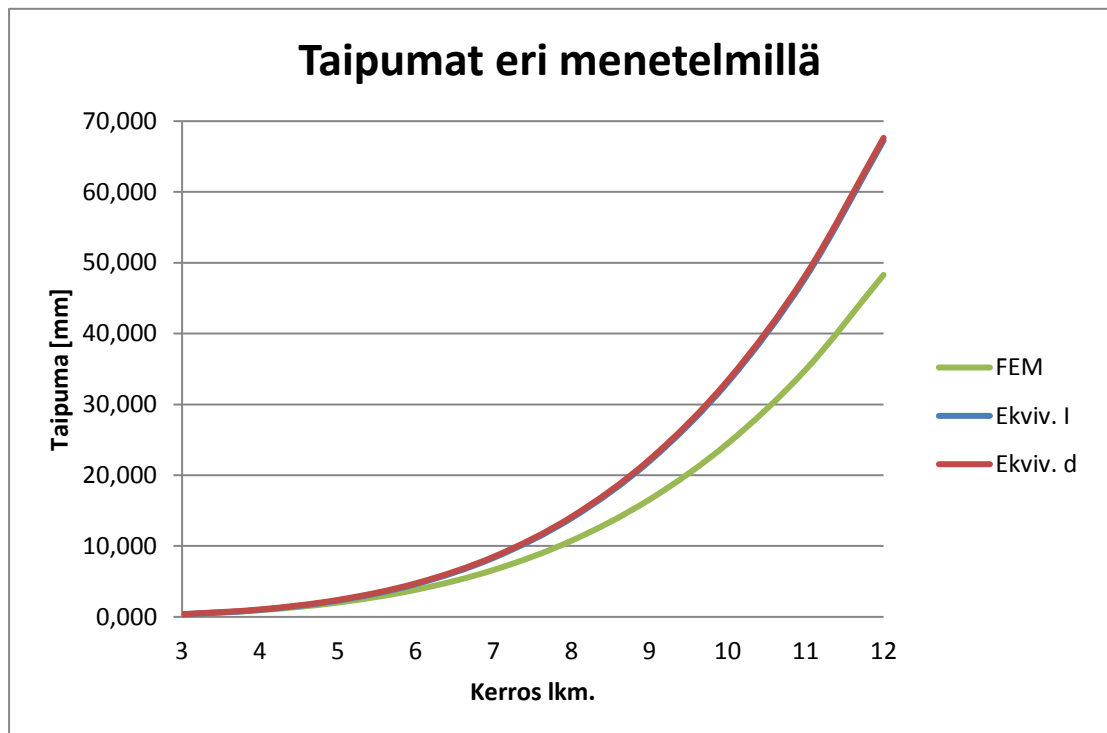
Max. virhe vrt. FEM + = Suurin varmalla puolella oleva virhe

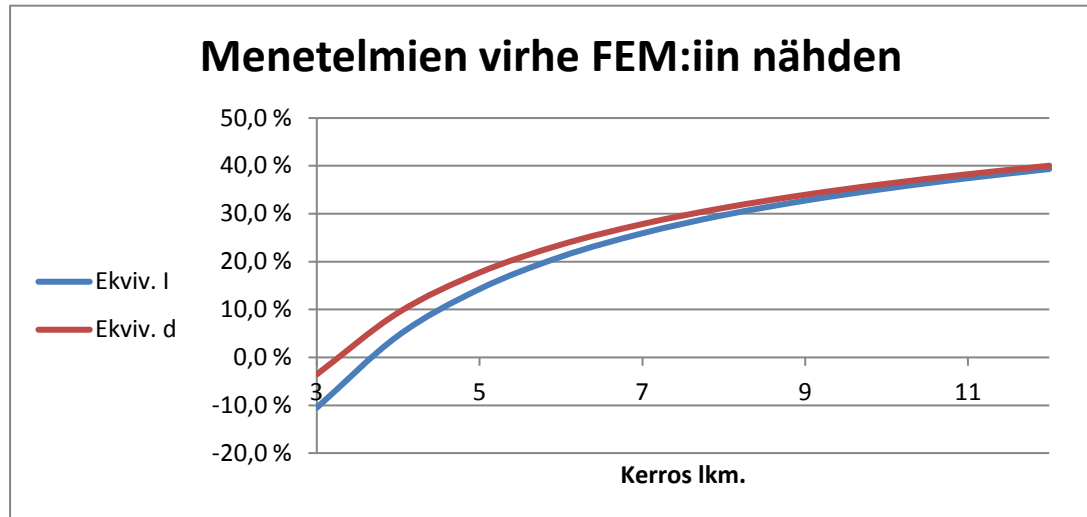
Max. virhe vrt. FEM - = Suurin epävarmalla puolella oleva virhe

Aukollisen jäykistävän seinän taipuma eri menetelmin, kun rakennukseen kohdistetaan kerroksittain 10 kN:n vaakavoima. Seinän pituus 3m ja oviaukko 1000x2100 mm²

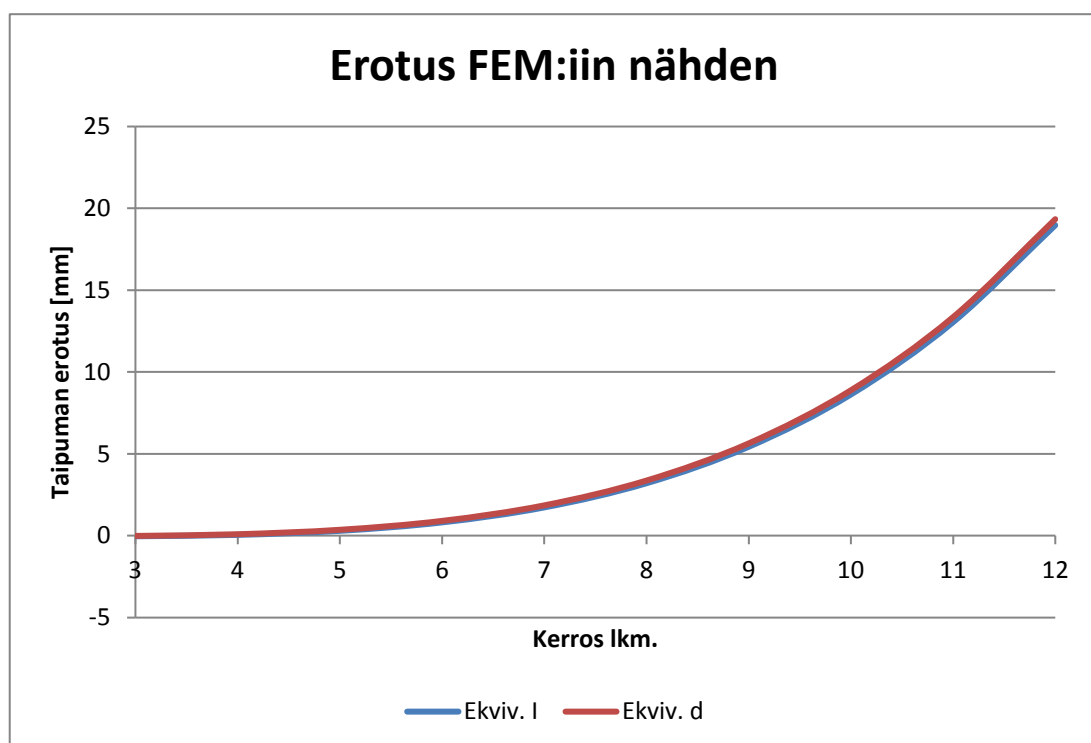
Tapaus, jossa aukko puolessa välissä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	48,279	67,248	39,3 %	67,610	40,0 %
11	34,888	47,931	37,4 %	48,237	38,3 %
10	24,483	33,107	35,2 %	33,363	36,3 %
9	16,593	22,020	32,7 %	22,229	34,0 %
8	10,781	13,981	29,7 %	14,148	31,2 %
7	6,651	8,373	25,9 %	8,503	27,8 %
6	3,842	4,649	21,0 %	4,746	23,5 %
5	2,039	2,330	14,3 %	2,400	17,7 %
4	0,966	1,010	4,6 %	1,056	9,3 %
3	0,391	0,350	-10,5 %	0,377	-3,6 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			39,3 %	40,0 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-10,5 %	-3,6 %	





Todellinen erotus FEM:iin verrattuna		
Menetelmä:	Ekviv. I	Ekviv. d
krs. lkm.	[mm]	[mm]
12	18,969	19,331
11	13,043	13,349
10	8,624	8,88
9	5,427	5,636
8	3,2	3,367
7	1,722	1,852
6	0,807	0,904
5	0,291	0,361
4	0,044	0,09
3	-0,041	-0,014



Seinän pituus 3m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko kolmasosa pisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	51,120	70,484	37,9 %	70,717	38,3 %
11	36,932	50,238	36,0 %	50,452	36,6 %
10	25,906	34,701	33,9 %	34,893	34,7 %
9	17,545	23,080	31,5 %	23,246	32,5 %
8	11,388	14,654	28,7 %	14,794	29,9 %
7	7,013	8,776	25,1 %	8,890	26,8 %
6	4,041	4,872	20,6 %	4,961	22,8 %
5	2,135	2,442	14,4 %	2,507	17,4 %
4	1,004	1,058	5,4 %	1,103	9,9 %
3	0,400	0,366	-8,5 %	0,394	-1,5 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			37,9 %	38,3 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-8,5 %	-1,5 %	

Seinän pituus 3m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko neljäsosapisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	55,251	74,996	35,7 %	75,030	35,8 %
11	39,898	53,453	34,0 %	53,526	34,2 %
10	27,966	36,922	32,0 %	37,016	32,4 %
9	18,920	24,557	29,8 %	24,659	30,3 %
8	12,261	15,592	27,2 %	15,691	28,0 %
7	7,533	9,338	24,0 %	9,427	25,1 %
6	4,326	5,184	19,8 %	5,259	21,6 %
5	2,273	2,599	14,3 %	2,657	16,9 %
4	1,059	1,126	6,3 %	1,168	10,3 %
3	0,415	0,390	-6,0 %	0,416	0,2 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			35,7 %	35,8 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-6,0 %	-	

Seinän pituus 5m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko puolessa välissä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	10,746	14,489	34,8 %	14,706	36,9 %
11	7,775	10,327	32,8 %	10,511	35,2 %
10	5,469	7,133	30,4 %	7,286	33,2 %
9	3,721	4,744	27,5 %	4,870	30,9 %
8	2,433	3,012	23,8 %	3,113	27,9 %
7	1,516	1,804	19,0 %	1,882	24,1 %
6	0,890	1,002	12,6 %	1,060	19,1 %
5	0,485	0,502	3,5 %	0,544	12,2 %
4	0,241	0,218	-9,5 %	0,245	1,7 %
3	0,108	0,075	-30,6 %	0,092	-14,8 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			34,8 %	36,9 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-30,6 %	-14,8 %	

Seinän pituus 5m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko kolmasosa pisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	11,064	14,872	34,4 %	15,081	36,3 %
11	7,999	10,600	32,5 %	10,778	34,7 %
10	5,620	7,322	30,3 %	7,471	32,9 %
9	3,819	4,870	27,5 %	4,992	30,7 %
8	2,492	3,092	24,1 %	3,190	28,0 %
7	1,548	1,852	19,6 %	1,929	24,6 %
6	0,905	1,028	13,6 %	1,086	20,0 %
5	0,490	0,515	5,1 %	0,557	13,7 %
4	0,241	0,223	-7,5 %	0,251	4,1 %
3	0,106	0,077	-27,4 %	0,094	-11,3 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			34,4 %	36,3 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-27,4 %	-11,3 %	

Seinän pituus 5m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko neljäsosa pisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	11,502	15,377	33,7 %	15,573	35,4 %
11	8,308	10,960	31,9 %	11,129	34,0 %
10	5,831	7,570	29,8 %	7,713	32,3 %
9	3,955	5,035	27,3 %	5,154	30,3 %
8	2,576	3,197	24,1 %	3,293	27,8 %
7	1,595	1,915	20,1 %	1,990	24,8 %
6	0,929	1,063	14,4 %	1,120	20,6 %
5	0,500	0,533	6,6 %	0,574	14,8 %
4	0,243	0,231	-4,9 %	0,258	6,2 %
3	0,105	0,080	-23,8 %	0,097	-7,6 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			33,7 %	35,4 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-23,8 %	-7,6 %	

Seinän pituus 7m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko puolessa välissä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	4,990	5,278	5,8 %	5,433	8,9 %
11	3,622	3,762	3,9 %	3,893	7,5 %
10	2,560	2,598	1,5 %	2,708	5,8 %
9	1,753	1,728	-1,4 %	1,818	3,7 %
8	1,157	1,097	-5,2 %	1,169	1,0 %
7	0,732	0,657	-10,2 %	0,713	-2,6 %
6	0,439	0,365	-16,9 %	0,407	-7,3 %
5	0,249	0,183	-26,5 %	0,213	-14,5 %
4	0,132	0,079	-40,2 %	0,099	-25,0 %
3	0,067	0,027	-59,7 %	0,039	-41,8 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			5,8 %	8,9 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-59,7 %	-41,8 %	

Seinän pituus 7m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko kolmasosa pisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	4,052	5,373	32,6 %	5,527	36,4 %
11	2,938	3,830	30,4 %	3,960	34,8 %
10	2,073	2,645	27,6 %	2,754	32,9 %
9	1,418	1,759	24,0 %	1,849	30,4 %
8	0,934	1,117	19,6 %	1,188	27,2 %
7	0,588	0,669	13,8 %	0,725	23,3 %
6	0,352	0,371	5,4 %	0,413	17,3 %
5	0,198	0,186	-6,1 %	0,216	9,1 %
4	0,105	0,081	-22,9 %	0,101	-3,8 %
3	0,053	0,028	-47,2 %	0,040	-24,5 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			32,6 %	36,4 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-47,2 %	-24,5 %	

Seinän pituus 7m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko neljäsosa pisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	4,089	5,498	34,5 %	5,650	38,2 %
11	2,956	3,919	32,6 %	4,048	36,9 %
10	2,079	2,707	30,2 %	2,815	35,4 %
9	1,416	1,800	27,1 %	1,889	33,4 %
8	0,928	1,143	23,2 %	1,214	30,8 %
7	0,582	0,685	17,7 %	0,740	27,1 %
6	0,346	0,380	9,8 %	0,422	22,0 %
5	0,193	0,191	-1,0 %	0,220	14,0 %
4	0,101	0,083	-17,8 %	0,102	1,0 %
3	0,050	0,029	-42,0 %	0,041	-18,0 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			34,5 %	38,2 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-42,0 %	-18,0 %	

Seinän pituus 3m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko puolessa välissä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	64,128	68,814	7,3 %	69,176	7,9 %
11	46,298	49,047	5,9 %	49,354	6,6 %
10	32,495	33,878	4,3 %	34,134	5,0 %
9	22,056	22,533	2,2 %	22,742	3,1 %
8	14,380	14,306	-0,5 %	14,474	0,7 %
7	8,924	8,568	-4,0 %	8,698	-2,5 %
6	5,208	4,757	-8,7 %	4,854	-6,8 %
5	2,810	2,382	-15,2 %	2,454	-12,7 %
4	1,367	1,033	-24,4 %	1,080	-21,0 %
3	0,577	0,358	-38,0 %	0,386	-33,1 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			7,3 %	7,9 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-38,0 %	-33,1 %	

Seinän pituus 3m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko kolmasosa pisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	75,952	77,638	2,2 %	77,176	1,6 %
11	54,759	55,337	1,1 %	55,056	0,5 %
10	38,364	38,223	-0,4 %	38,072	-0,8 %
9	25,977	25,422	-2,1 %	25,361	-2,4 %
8	16,879	16,141	-4,4 %	16,137	-4,4 %
7	10,427	9,667	-7,3 %	9,694	-7,0 %
6	6,043	5,367	-11,2 %	5,407	-10,5 %
5	3,224	2,690	-16,6 %	2,731	-15,3 %
4	1,539	1,166	-24,2 %	1,200	-22,0 %
3	0,628	0,404	-35,7 %	0,427	-32,0 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			2,2 %	1,6 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-35,7 %	-32,0 %	

Seinän pituus 3m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko neljäsosapisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	99,154	92,458	-6,8 %	90,237	-9,0 %
11	71,303	65,900	-7,6 %	64,365	-9,7 %
10	49,790	45,519	-8,6 %	44,502	-10,6 %
9	33,569	30,275	-9,8 %	29,638	-11,7 %
8	21,689	19,222	-11,4 %	18,852	-13,1 %
7	13,290	11,512	-13,4 %	11,320	-14,8 %
6	7,614	6,391	-16,1 %	6,310	-17,1 %
5	3,992	3,204	-19,7 %	3,184	-20,2 %
4	1,853	1,388	-25,1 %	1,396	-24,7 %
3	0,719	0,481	-33,1 %	0,495	-31,2 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			-6,8 %	-9,0 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-33,1 %	-31,2 %	

Seinän pituus 5m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko puolessa välissä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	13,896	14,560	4,8 %	14,777	6,3 %
11	10,081	10,378	2,9 %	10,562	4,8 %
10	7,118	7,168	0,7 %	7,321	2,9 %
9	4,870	4,768	-2,1 %	4,893	0,5 %
8	3,208	3,027	-5,6 %	3,127	-2,5 %
7	2,020	1,813	-10,2 %	1,891	-6,4 %
6	1,204	1,006	-16,4 %	1,065	-11,5 %
5	0,670	0,505	-24,6 %	0,546	-18,5 %
4	0,342	0,219	-36,0 %	0,246	-28,1 %
3	0,158	0,076	-51,9 %	0,092	-41,8 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			4,8 %	6,3 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-51,9 %	-41,8 %	

Seinän pituus 5m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko kolmasosa pisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	14,882	15,448	3,8 %	15,621	5,0 %
11	10,771	11,010	2,2 %	11,163	3,6 %
10	7,583	7,605	0,3 %	7,737	2,0 %
9	5,167	5,058	-2,1 %	5,169	0,0 %
8	3,387	3,212	-5,2 %	3,303	-2,5 %
7	2,118	1,923	-9,2 %	1,996	-5,8 %
6	1,249	1,068	-14,5 %	1,123	-10,1 %
5	0,685	0,535	-21,9 %	0,576	-15,9 %
4	0,343	0,232	-32,4 %	0,259	-24,5 %
3	0,153	0,080	-47,7 %	0,097	-36,6 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			3,8 %	5,0 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-47,7 %	-36,6 %	

Seinän pituus 5m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko neljäsosa pisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	16,428	16,715	1,7 %	16,815	2,4 %
11	11,860	11,912	0,4 %	12,014	1,3 %
10	8,323	8,228	-1,1 %	8,325	0,0 %
9	5,649	5,472	-3,1 %	5,560	-1,6 %
8	3,682	3,474	-5,6 %	3,551	-3,6 %
7	2,285	2,081	-8,9 %	2,145	-6,1 %
6	1,334	1,155	-13,4 %	1,206	-9,6 %
5	0,720	0,579	-19,6 %	0,617	-14,3 %
4	0,352	0,251	-28,7 %	0,277	-21,3 %
3	0,151	0,087	-42,4 %	0,103	-31,8 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			1,7 %	2,4 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-42,4 %	-31,8 %	

Seinän pituus 7m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko puolessa välissä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	5,157	5,287	2,5 %	5,442	5,5 %
11	3,762	3,768	0,2 %	3,900	3,7 %
10	2,676	2,603	-2,7 %	2,712	1,3 %
9	1,848	1,731	-6,3 %	1,821	-1,5 %
8	1,234	1,099	-10,9 %	1,171	-5,1 %
7	0,791	0,658	-16,8 %	0,714	-9,7 %
6	0,484	0,365	-24,6 %	0,407	-15,9 %
5	0,281	0,183	-34,9 %	0,213	-24,2 %
4	0,153	0,079	-48,4 %	0,099	-35,3 %
3	0,079	0,027	-65,8 %	0,039	-50,6 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			2,5 %	5,5 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-65,8 %	-50,6 %	

Seinän pituus 7m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko kolmasosa pisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	5,249	5,497	4,7 %	5,646	7,6 %
11	3,811	3,918	2,8 %	4,045	6,1 %
10	2,696	2,706	0,4 %	2,813	4,3 %
9	1,849	1,800	-2,7 %	1,887	2,1 %
8	1,203	1,143	-5,0 %	1,213	0,8 %
7	0,760	0,684	-10,0 %	0,739	-2,8 %
6	0,456	0,380	-16,7 %	0,421	-7,7 %
5	0,258	0,190	-26,4 %	0,220	-14,7 %
4	0,136	0,083	-39,0 %	0,102	-25,0 %
3	0,067	0,029	-56,7 %	0,040	-40,3 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			4,7 %	7,6 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-56,7 %	-40,3 %	

Seinän pituus 7m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko neljäsosa pisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	5,433	5,786	6,5 %	5,924	9,0 %
11	3,927	4,124	5,0 %	4,243	8,0 %
10	2,762	2,849	3,1 %	2,950	6,8 %
9	1,882	1,895	0,7 %	1,979	5,2 %
8	1,218	1,203	-1,2 %	1,271	4,4 %
7	0,762	0,720	-5,5 %	0,774	1,6 %
6	0,451	0,400	-11,3 %	0,441	-2,2 %
5	0,250	0,201	-19,6 %	0,230	-8,0 %
4	0,129	0,087	-32,6 %	0,107	-17,1 %
3	0,063	0,030	-52,4 %	0,042	-33,3 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			6,5 %	9,0 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-52,4 %	-33,3 %	

Seinän pituus 3m ja oviaukko 1500x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko puolessa välissä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	57,185	73,457	28,5 %	73,820	29,1 %
11	41,649	52,357	25,7 %	52,663	26,4 %
10	29,526	36,164	22,5 %	36,420	23,3 %
9	20,278	24,053	18,6 %	24,262	19,6 %
8	13,411	15,272	13,9 %	15,439	15,1 %
7	8,475	9,146	7,9 %	9,276	9,5 %
6	5,064	5,078	0,3 %	5,175	2,2 %
5	2,821	2,545	-9,8 %	2,615	-7,3 %
4	1,435	1,103	-23,1 %	1,149	-19,9 %
3	0,646	0,382	-40,9 %	0,410	-36,5 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			28,5 %	29,1 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-40,9 %	-36,5 %	

Seinän pituus 3m ja oviaukko 1500x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko kolmasosa pisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	86,889	95,210	9,6 %	91,806	5,7 %
11	63,113	67,861	7,5 %	65,483	3,8 %
10	44,566	46,874	5,2 %	45,275	1,6 %
9	30,433	31,176	2,4 %	30,152	-0,9 %
8	19,962	19,794	-0,8 %	19,178	-3,9 %
7	12,465	11,855	-4,9 %	11,516	-7,6 %
6	7,317	6,582	-10,0 %	6,419	-12,3 %
5	3,965	3,299	-16,8 %	3,238	-18,3 %
4	1,929	1,430	-25,9 %	1,419	-26,4 %
3	0,803	0,495	-38,4 %	0,503	-37,4 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			9,6 %		5,7 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-38,4 %		-37,4 %

Seinän pituus 3m ja oviaukko 1500x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko neljäsosapisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	329,325	151,166	-54,1 %	132,141	-59,9 %
11	240,789	107,744	-55,3 %	94,232	-60,9 %
10	170,682	74,422	-56,4 %	65,133	-61,8 %
9	116,579	49,498	-57,5 %	43,359	-62,8 %
8	76,111	31,427	-58,7 %	27,564	-63,8 %
7	46,980	18,822	-59,9 %	16,538	-64,8 %
6	26,989	10,450	-61,3 %	9,207	-65,9 %
5	14,095	5,238	-62,8 %	4,636	-67,1 %
4	6,445	2,270	-64,8 %	2,025	-68,6 %
3	2,416	0,786	-67,5 %	0,713	-70,5 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			-54,1 %		-59,9 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-67,5 %		-70,5 %

Seinän pituus 5m ja oviaukko 1500x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko puolessa välissä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	11,763	14,757	25,5 %	14,975	27,3 %
11	8,600	10,518	22,3 %	10,702	24,4 %
10	6,127	7,265	18,6 %	7,419	21,1 %
9	4,238	4,832	14,0 %	4,958	17,0 %
8	2,829	3,068	8,4 %	3,168	12,0 %
7	1,812	1,837	1,4 %	1,915	5,7 %
6	1,101	1,020	-7,4 %	1,079	-2,0 %
5	0,629	0,511	-18,8 %	0,553	-12,1 %
4	0,332	0,222	-33,1 %	0,249	-25,0 %
3	0,158	0,077	-51,3 %	0,093	-41,1 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			25,5 %	27,3 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-51,3 %	-41,1 %	

Seinän pituus 5m ja oviaukko 1500x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko kolmasosa pisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	13,369	16,359	22,4 %	16,446	23,0 %
11	9,788	11,660	19,1 %	11,751	20,1 %
10	6,903	8,054	16,7 %	8,143	18,0 %
9	4,744	5,357	12,9 %	5,439	14,7 %
8	3,141	3,401	8,3 %	3,474	10,6 %
7	1,988	2,037	2,5 %	2,099	5,6 %
6	1,190	1,131	-5,0 %	1,180	-0,8 %
5	0,665	0,567	-14,7 %	0,604	-9,2 %
4	0,339	0,246	-27,4 %	0,272	-19,8 %
3	0,154	0,085	-44,8 %	0,101	-34,4 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			22,4 %	23,0 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-44,8 %	-34,4 %	

Seinän pituus 5m ja oviaukko 1500x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko neljäsosa pisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	16,369	18,905	15,5 %	18,738	14,5 %
11	11,872	13,475	13,5 %	13,385	12,7 %
10	8,374	9,307	11,1 %	9,271	10,7 %
9	5,715	6,190	8,3 %	6,190	8,3 %
8	3,749	3,930	4,8 %	3,951	5,4 %
7	2,343	2,354	0,5 %	2,384	1,7 %
6	1,378	1,307	-5,2 %	1,339	-2,8 %
5	0,750	0,655	-12,7 %	0,684	-8,8 %
4	0,368	0,284	-22,8 %	0,306	-16,8 %
3	0,158	0,098	-38,0 %	0,113	-28,5 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			15,5 %	14,5 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-38,0 %	-28,5 %	

Seinän pituus 7m ja oviaukko 1500x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko puolessa välissä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	4,353	5,313	22,1 %	5,468	25,6 %
11	3,971	3,787	-4,6 %	3,918	-1,3 %
10	2,849	2,616	-8,2 %	2,725	-4,4 %
9	1,988	1,740	-12,5 %	1,829	-8,0 %
8	1,344	1,105	-17,8 %	1,176	-12,5 %
7	0,875	0,662	-24,3 %	0,717	-18,1 %
6	0,544	0,367	-32,5 %	0,409	-24,8 %
5	0,322	0,184	-42,9 %	0,214	-33,5 %
4	0,179	0,080	-55,3 %	0,100	-44,1 %
3	0,093	0,028	-69,9 %	0,040	-57,0 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			22,1 %	25,6 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-69,9 %	-57,0 %	

Seinän pituus 7m ja oviaukko 1500x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko kolmasosa pisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	4,338	5,665	30,6 %	5,802	33,7 %
11	3,160	4,038	27,8 %	4,156	31,5 %
10	2,244	2,789	24,3 %	2,889	28,7 %
9	1,547	1,855	19,9 %	1,938	25,3 %
8	1,030	1,178	14,4 %	1,246	21,0 %
7	0,659	0,705	7,0 %	0,759	15,2 %
6	0,402	0,392	-2,5 %	0,432	7,5 %
5	0,232	0,196	-15,5 %	0,226	-2,6 %
4	0,126	0,085	-32,5 %	0,105	-16,7 %
3	0,064	0,029	-54,7 %	0,041	-35,9 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			30,6 %		33,7 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-54,7 %		-35,9 %

Seinän pituus 7m ja oviaukko 1500x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko neljäsosa pisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv. I		Ekviv. d	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	4,596	6,180	34,5 %	6,285	36,7 %
11	3,319	4,405	32,7 %	4,501	35,6 %
10	2,332	3,043	30,5 %	3,127	34,1 %
9	1,587	2,024	27,5 %	2,097	32,1 %
8	1,040	1,285	23,6 %	1,346	29,4 %
7	0,652	0,769	17,9 %	0,819	25,6 %
6	0,388	0,427	10,1 %	0,466	20,1 %
5	0,217	0,214	-1,4 %	0,242	11,5 %
4	0,113	0,093	-17,7 %	0,112	-0,9 %
3	0,065	0,032	-50,8 %	0,044	-32,3 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			34,5 %		36,7 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-50,8 %		-32,3 %

Taipumien vertailu eri menetelmien välillä

Ohjeistus taulukon lukua varten:

Taulukossa on esitetty eri ekvivalentin jäykkyyden menetelmin laskettuja taipumia.

FEM= Elementtimenetelmällä saatu taipuman vertailuarvo.

Rosman= Rosman'in menetelmällä saadut tulokset

Ekviv.= Ekvivalentin jäykkyyden menetelmä, jossa seinän jäyhyysmomentit seinän eri korkeuksissa on suhteutettu koko seinälle.

Lewicki= Lewickin menetelmällä saatu taipuma

Max. virhe vrt. FEM + = Suurin varmalla puolella oleva virhe

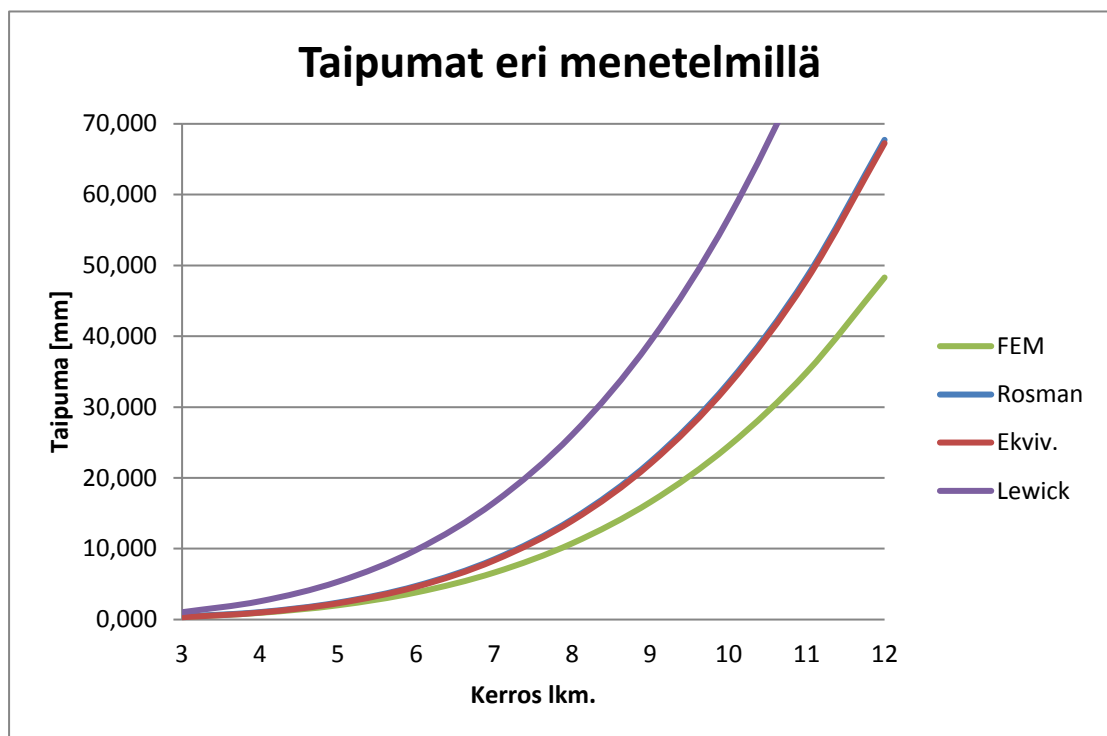
Max. virhe vrt. FEM - = Suurin epävarmalla puolella oleva virhe

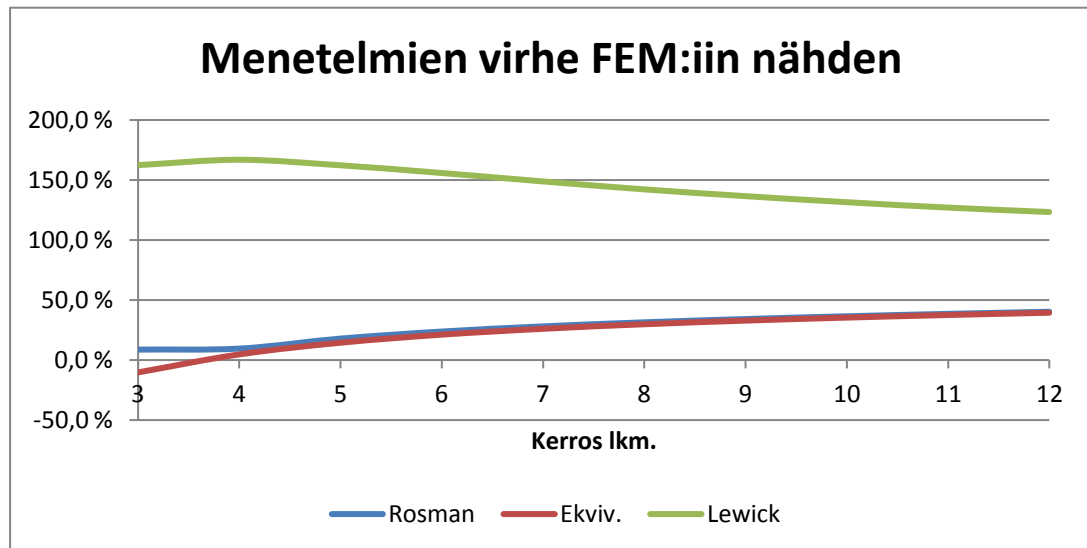
Taipumien vertailu eri menetelmien välillä

Aukollisen jäykistävän seinän taipuma eri menetelmin, kun rakennukseen kohdistetaan kerroksittain 10 kN:n vaakavoima. Seinän pituus 3m ja oviaukko 1000x2100 mm²

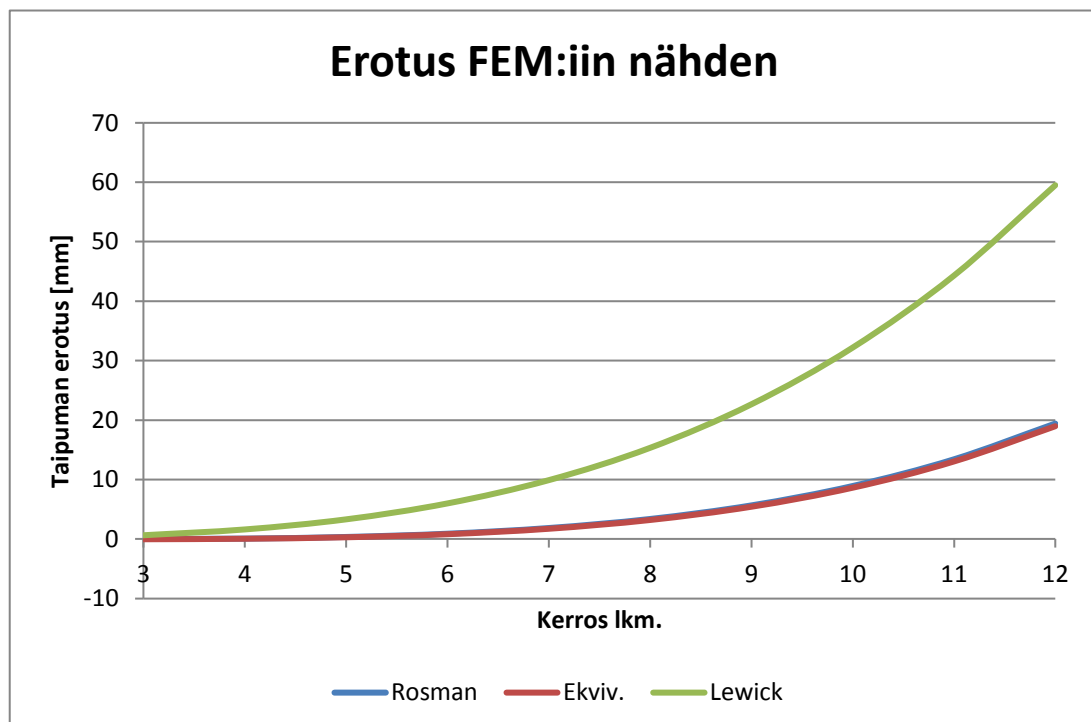
Tapaus, jossa aukko puolessa välissä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	48,279	67,704	40,2 %	67,248	39,3 %	107,780	123,2 %
11	34,888	48,304	38,5 %	47,931	37,4 %	79,183	127,0 %
10	24,483	33,409	36,5 %	33,107	35,2 %	56,668	131,5 %
9	16,593	22,260	34,2 %	22,020	32,7 %	39,245	136,5 %
8	10,781	14,168	31,4 %	13,981	29,7 %	26,108	142,2 %
7	6,651	8,515	28,0 %	8,373	25,9 %	16,547	148,8 %
6	3,842	4,753	23,7 %	4,649	21,0 %	9,828	155,8 %
5	2,039	2,403	17,9 %	2,330	14,3 %	5,347	162,2 %
4	0,966	1,058	9,5 %	1,010	4,6 %	2,578	166,9 %
3	0,391	0,425	8,7 %	0,350	-10,5 %	1,026	162,4 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			40,2 %	39,3 %		166,9 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-	-10,5 %		-	





Todellinen erotus FEM:iin verrattuna			
Menetelmä:	Rosman	Ekviv.	Lewick
kr. lkm.	[mm]	[mm]	[mm]
12	19,425	18,969	59,501
11	13,416	13,043	44,295
10	8,926	8,624	32,185
9	5,667	5,427	22,652
8	3,387	3,2	15,327
7	1,864	1,722	9,896
6	0,911	0,807	5,986
5	0,364	0,291	3,308
4	0,092	0,044	1,612
3	0,034	-0,041	0,635



Seinän pituus 3m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko kolmasosa pisteessä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	51,120	72,538	41,9 %	70,484	37,9 %	96,799	89,4 %
11	36,932	51,750	40,1 %	50,238	36,0 %	70,432	90,7 %
10	25,906	35,789	38,1 %	34,701	33,9 %	49,837	92,4 %
9	17,545	23,842	35,9 %	23,080	31,5 %	34,088	94,3 %
8	11,388	15,173	33,2 %	14,654	28,7 %	22,384	96,6 %
7	7,013	9,117	30,0 %	8,776	25,1 %	13,944	98,8 %
6	4,041	5,087	25,9 %	4,872	20,6 %	8,139	101,4 %
5	2,135	2,571	20,4 %	2,442	14,4 %	4,338	103,2 %
4	1,004	1,130	12,5 %	1,058	5,4 %	2,038	103,0 %
3	0,400	0,418	4,5 %	0,366	-8,5 %	0,785	96,3 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			41,9 %			37,9 %	103,2 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-			-8,5 %	-

Seinän pituus 3m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko neljäsosapisteessä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	55,251	79,653	44,2 %	74,996	35,7 %	93,941	70,0 %
11	39,898	56,821	42,4 %	53,453	34,0 %	67,823	70,0 %
10	27,966	39,292	40,5 %	36,922	32,0 %	47,555	70,0 %
9	18,920	26,172	38,3 %	24,557	29,8 %	32,194	70,2 %
8	12,261	16,652	35,8 %	15,592	27,2 %	20,879	70,3 %
7	7,533	10,002	32,8 %	9,338	24,0 %	12,833	70,4 %
6	4,326	5,579	29,0 %	5,184	19,8 %	7,353	70,0 %
5	2,273	2,817	23,9 %	2,599	14,3 %	3,842	69,0 %
4	1,059	1,237	16,8 %	1,126	6,3 %	1,759	66,1 %
3	0,415	0,440	6,0 %	0,390	-6,0 %	0,657	58,3 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			44,2 %			35,7 %	70,4 %

Seinän pituus 5m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko puolessa välissä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	10,746	14,710	36,9 %	14,489	34,8 %	21,132	96,6 %
11	7,775	10,514	35,2 %	10,327	32,8 %	15,465	98,9 %
10	5,469	7,288	33,3 %	7,133	30,4 %	10,997	101,1 %
9	3,721	4,871	30,9 %	4,744	27,5 %	7,568	103,4 %
8	2,433	3,113	27,9 %	3,012	23,8 %	5,006	105,8 %
7	1,516	1,980	30,6 %	1,804	19,0 %	3,146	107,5 %
6	0,890	1,164	30,8 %	1,002	12,6 %	1,854	108,3 %
5	0,485	0,596	22,9 %	0,502	3,5 %	1,001	106,4 %
4	0,241	0,289	19,9 %	0,218	-9,5 %	0,476	97,5 %
3	0,108	0,136	25,9 %	0,075	-30,6 %	0,187	73,1 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			36,9 %		34,8 %		108,3 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-		-30,6 %		-

Seinän pituus 5m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko kolmasosa pisteessä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	11,064	15,271	38,0 %	14,872	34,4 %	19,265	74,1 %
11	7,999	10,913	36,4 %	10,600	32,5 %	13,988	74,9 %
10	5,620	7,564	34,6 %	7,322	30,3 %	9,865	75,5 %
9	3,819	5,054	32,3 %	4,870	27,5 %	6,724	76,1 %
8	2,492	3,230	29,6 %	3,092	24,1 %	4,396	76,4 %
7	1,548	1,952	26,1 %	1,852	19,6 %	2,728	76,2 %
6	0,905	1,133	25,2 %	1,028	13,6 %	1,580	74,6 %
5	0,490	0,596	21,6 %	0,515	5,1 %	0,837	70,8 %
4	0,241	0,268	11,2 %	0,223	-7,5 %	0,390	61,8 %
3	0,106	0,111	4,7 %	0,077	-27,4 %	0,149	40,6 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			38,0 %		34,4 %		76,4 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-		-27,4 %		-

Seinän pituus 5m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko neljäsosa pisteessä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	11,502	16,029	39,4 %	15,377	33,7 %	18,419	60,1 %
11	8,308	11,454	37,9 %	10,960	31,9 %	13,284	59,9 %
10	5,831	7,938	36,1 %	7,570	29,8 %	9,302	59,5 %
9	3,955	5,303	34,1 %	5,035	27,3 %	6,285	58,9 %
8	2,576	3,388	31,5 %	3,197	24,1 %	4,069	58,0 %
7	1,595	2,047	28,3 %	1,915	20,1 %	2,495	56,4 %
6	0,929	1,152	24,0 %	1,063	14,4 %	1,427	53,6 %
5	0,500	0,610	22,0 %	0,533	6,6 %	0,743	48,6 %
4	0,243	0,274	12,8 %	0,231	-4,9 %	0,339	39,5 %
3	0,105	0,105	0,0 %	0,080	-23,8 %	0,126	20,0 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			39,4 %			33,7 %	60,1 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-			-23,8 %	-

Seinän pituus 7m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko puolessa välissä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	4,990	5,434	8,9 %	5,278	5,8 %	7,442	49,1 %
11	3,622	3,894	7,5 %	3,762	3,9 %	5,430	49,9 %
10	2,560	2,833	10,7 %	2,598	1,5 %	3,857	50,7 %
9	1,753	1,977	12,8 %	1,728	-1,4 %	2,648	51,1 %
8	1,157	1,270	9,8 %	1,097	-5,2 %	1,745	50,8 %
7	0,732	0,773	5,6 %	0,657	-10,2 %	1,094	49,5 %
6	0,439	0,472	7,5 %	0,365	-16,9 %	0,642	46,2 %
5	0,249	0,268	7,6 %	0,183	-26,5 %	0,345	38,6 %
4	0,132	0,140	6,1 %	0,079	-40,2 %	0,164	24,2 %
3	0,067	0,061	-9,0 %	0,027	-59,7 %	0,064	-4,5 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			12,8 %			5,8 %	51,1 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-9,0 %			-59,7 %	-4,5 %

Seinän pituus 7m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko kolmasosa pisteessä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	4,052	5,572	37,5 %	5,373	32,6 %	6,817	68,2 %
11	2,938	3,992	35,9 %	3,830	30,4 %	4,939	68,1 %
10	2,073	2,776	33,9 %	2,645	27,6 %	3,480	67,9 %
9	1,418	1,917	35,2 %	1,759	24,0 %	2,368	67,0 %
8	0,934	1,263	35,2 %	1,117	19,6 %	1,546	65,5 %
7	0,588	0,769	30,8 %	0,669	13,8 %	0,958	62,9 %
6	0,352	0,452	28,4 %	0,371	5,4 %	0,554	57,4 %
5	0,198	0,239	20,7 %	0,186	-6,1 %	0,293	48,0 %
4	0,105	0,128	21,9 %	0,081	-22,9 %	0,136	29,5 %
3	0,053	0,049	-7,5 %	0,028	-47,2 %	0,052	-1,9 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			37,5 %		32,6 %		68,2 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-7,5 %		-47,2 %		-1,9 %

Seinän pituus 7m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko neljäsosa pisteessä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	4,089	5,757	40,8 %	5,498	34,5 %	6,476	58,4 %
11	2,956	4,124	39,5 %	3,919	32,6 %	4,666	57,8 %
10	2,079	2,867	37,9 %	2,707	30,2 %	3,265	57,0 %
9	1,416	1,924	35,9 %	1,800	27,1 %	2,206	55,8 %
8	0,928	1,257	35,5 %	1,143	23,2 %	1,428	53,9 %
7	0,582	0,778	33,7 %	0,685	17,7 %	0,875	50,3 %
6	0,346	0,443	28,0 %	0,380	9,8 %	0,499	44,2 %
5	0,193	0,237	22,8 %	0,191	-1,0 %	0,259	34,2 %
4	0,101	0,114	12,9 %	0,083	-17,8 %	0,118	16,8 %
3	0,050	0,047	-6,0 %	0,029	-42,0 %	0,044	-12,0 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			40,8 %		34,5 %		58,4 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-6,0 %		-42,0 %		-12,0 %

Seinän pituus 3m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko puolessa välissä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	64,128	69,970	9,1 %	68,814	7,3 %	155,085	141,8 %
11	46,298	49,920	7,8 %	49,047	5,9 %	115,697	149,9 %
10	32,495	34,525	6,2 %	33,878	4,3 %	84,019	158,6 %
9	22,056	23,002	4,3 %	22,533	2,2 %	59,190	168,4 %
8	14,380	14,639	1,8 %	14,306	-0,5 %	40,123	179,0 %
7	8,924	8,797	-1,4 %	8,568	-4,0 %	25,953	190,8 %
6	5,208	4,909	-5,7 %	4,757	-8,7 %	15,768	202,8 %
5	2,810	2,484	-11,6 %	2,382	-15,2 %	8,823	214,0 %
4	1,367	1,092	-20,1 %	1,033	-24,4 %	4,376	220,1 %
3	0,577	0,490	-15,1 %	0,358	-38,0 %	1,797	211,4 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			9,1 %		7,3 %		220,1 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-20,1 %		-38,0 %		-

Seinän pituus 3m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko kolmasosa pisteessä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	75,952	84,539	11,3 %	77,638	2,2 %	128,647	69,4 %
11	54,759	60,304	10,1 %	55,337	1,1 %	94,293	72,2 %
10	38,364	41,697	8,7 %	38,223	-0,4 %	67,295	75,4 %
9	25,977	27,772	6,9 %	25,422	-2,1 %	46,486	79,0 %
8	16,879	17,668	4,7 %	16,141	-4,4 %	30,855	82,8 %
7	10,427	10,611	1,8 %	9,667	-7,3 %	19,484	86,9 %
6	6,043	5,916	-2,1 %	5,367	-11,2 %	11,518	90,6 %
5	3,224	2,986	-7,4 %	2,690	-16,6 %	6,250	93,9 %
4	1,539	1,310	-14,9 %	1,166	-24,2 %	2,998	94,8 %
3	0,628	0,465	-26,0 %	0,404	-35,7 %	1,188	89,2 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			11,3 %		2,2 %		94,8 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-26,0 %		-35,7 %		-

Seinän pituus 3m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko neljäosapisteessä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	99,154	148,258	49,5 %	92,458	-6,8 %	136,907	38,1 %
11	71,303	81,563	14,4 %	65,900	-7,6 %	98,940	38,8 %
10	49,790	56,381	13,2 %	45,519	-8,6 %	69,464	39,5 %
9	33,569	37,539	11,8 %	30,275	-9,8 %	47,085	40,3 %
8	21,689	23,869	10,1 %	19,222	-11,4 %	30,590	41,0 %
7	13,290	14,325	7,8 %	11,512	-13,4 %	18,833	41,7 %
6	7,614	7,978	4,8 %	6,391	-16,1 %	10,826	42,2 %
5	3,992	4,020	0,7 %	3,204	-19,7 %	5,671	42,1 %
4	1,853	1,758	-5,1 %	1,388	-25,1 %	2,607	40,7 %
3	0,719	0,620	-13,8 %	0,481	-33,1 %	0,981	36,4 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			49,5 %		-6,8 %		42,2 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-13,8 %		-33,1 %		-

Seinän pituus 5m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko puolessa välissä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	13,896	14,813	6,6 %	14,560	4,8 %	24,783	78,3 %
11	10,081	10,587	5,0 %	10,378	2,9 %	18,273	81,3 %
10	7,118	7,339	3,1 %	7,168	0,7 %	13,125	84,4 %
9	4,870	4,905	0,7 %	4,768	-2,1 %	9,123	87,3 %
8	3,208	3,380	5,4 %	3,027	-5,6 %	6,111	90,5 %
7	2,020	2,177	7,8 %	1,813	-10,2 %	3,888	92,5 %
6	1,204	1,224	1,7 %	1,006	-16,4 %	2,328	93,4 %
5	0,670	0,701	4,6 %	0,505	-24,6 %	1,278	90,7 %
4	0,342	0,358	4,7 %	0,219	-36,0 %	0,622	81,9 %
3	0,158	0,159	0,6 %	0,076	-51,9 %	0,250	58,2 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			7,8 %		4,8 %		93,4 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-		-51,9 %		-

Seinän pituus 5m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko kolmasosa pisteessä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	14,882	16,157	8,6 %	15,448	3,8 %	22,005	47,9 %
11	10,771	11,545	7,2 %	11,010	2,2 %	16,048	49,0 %
10	7,583	8,001	5,5 %	7,605	0,3 %	11,386	50,2 %
9	5,167	5,345	3,4 %	5,058	-2,1 %	7,816	51,3 %
8	3,387	3,414	0,8 %	3,212	-5,2 %	5,148	52,0 %
7	2,118	2,230	5,3 %	1,923	-9,2 %	3,223	52,2 %
6	1,249	1,253	0,3 %	1,068	-14,5 %	1,888	51,2 %
5	0,685	0,641	-6,4 %	0,535	-21,9 %	1,015	48,2 %
4	0,343	0,307	-10,5 %	0,232	-32,4 %	0,481	40,2 %
3	0,153	0,153	0,0 %	0,080	-47,7 %	0,188	22,9 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			8,6 %		3,8 %		52,2 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-10,5 %		-47,7 %		-

Seinän pituus 5m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko neljäsosa pisteessä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewicki	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	16,428	18,214	10,9 %	16,715	1,7 %	21,560	31,2 %
11	11,860	13,011	9,7 %	11,912	0,4 %	15,580	31,4 %
10	8,323	9,013	8,3 %	8,228	-1,1 %	10,939	31,4 %
9	5,649	6,018	6,5 %	5,472	-3,1 %	7,416	31,3 %
8	3,682	3,842	4,3 %	3,474	-5,6 %	4,820	30,9 %
7	2,285	2,319	1,5 %	2,081	-8,9 %	2,969	29,9 %
6	1,334	1,357	1,7 %	1,155	-13,4 %	1,707	28,0 %
5	0,720	0,693	-3,8 %	0,579	-19,6 %	0,895	24,3 %
4	0,352	0,318	-9,7 %	0,251	-28,7 %	0,413	17,3 %
3	0,151	0,124	-17,9 %	0,087	-42,4 %	0,156	3,3 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			10,9 %		1,7 %		31,4 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-17,9 %		-42,4 %		-

Seinän pituus 7m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko puolessa välissä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	5,157	6,096	18,2 %	5,287	2,5 %	8,247	59,9 %
11	3,762	4,366	16,1 %	3,768	0,2 %	6,059	61,1 %
10	2,676	3,034	13,4 %	2,603	-2,7 %	4,328	61,7 %
9	1,848	2,035	10,1 %	1,731	-6,3 %	2,998	62,2 %
8	1,234	1,436	16,4 %	1,099	-10,9 %	1,995	61,7 %
7	0,791	0,978	23,6 %	0,658	-16,8 %	1,264	59,8 %
6	0,484	0,554	14,5 %	0,365	-24,6 %	0,751	55,2 %
5	0,281	0,340	21,0 %	0,183	-34,9 %	0,409	45,6 %
4	0,153	0,184	20,3 %	0,079	-48,4 %	0,198	29,4 %
3	0,079	0,069	-12,7 %	0,027	-65,8 %	0,080	1,3 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			23,6 %		2,5 %		62,2 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-12,7 %		-65,8 %		-

Seinän pituus 7m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko kolmasosa pisteessä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	5,249	5,968	13,7 %	5,497	4,7 %	7,447	41,9 %
11	3,811	4,411	15,7 %	3,918	2,8 %	5,422	42,3 %
10	2,696	3,066	13,7 %	2,706	0,4 %	3,836	42,3 %
9	1,849	2,056	11,2 %	1,800	-2,7 %	2,626	42,0 %
8	1,203	1,320	9,7 %	1,143	-5,0 %	1,725	43,4 %
7	0,760	0,851	12,0 %	0,684	-10,0 %	1,077	41,7 %
6	0,456	0,520	14,0 %	0,380	-16,7 %	0,629	37,9 %
5	0,258	0,330	27,9 %	0,190	-26,4 %	0,336	30,2 %
4	0,136	0,138	1,5 %	0,083	-39,0 %	0,159	16,9 %
3	0,067	0,059	-11,9 %	0,029	-56,7 %	0,062	-7,5 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			27,9 %		4,7 %		43,4 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-11,9 %		-56,7 %		-7,5 %

Seinän pituus 7m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko neljäsosa pisteessä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	5,433	6,206	14,2 %	5,786	6,5 %	7,168	31,9 %
11	3,927	4,534	15,5 %	4,124	5,0 %	5,179	31,9 %
10	2,762	3,207	16,1 %	2,849	3,1 %	3,635	31,6 %
9	1,882	2,150	14,2 %	1,895	0,7 %	2,462	30,8 %
8	1,218	1,380	13,3 %	1,203	-1,2 %	1,597	31,1 %
7	0,762	0,859	12,7 %	0,720	-5,5 %	0,984	29,1 %
6	0,451	0,493	9,3 %	0,400	-11,3 %	0,565	25,3 %
5	0,250	0,267	6,8 %	0,201	-19,6 %	0,296	18,4 %
4	0,129	0,131	1,6 %	0,087	-32,6 %	0,137	6,2 %
3	0,063	0,054	-14,3 %	0,030	-52,4 %	0,052	-17,5 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			16,1 %		6,5 %		31,9 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-14,3 %		-52,4 %		-17,5 %

Seinän pituus 3m ja oviaukko 1500x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko puolessa välissä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	57,185	76,968	34,6 %	73,457	28,5 %	288,526	404,5 %
11	41,649	54,907	31,8 %	52,357	25,7 %	218,208	423,9 %
10	29,526	37,970	28,6 %	36,164	22,5 %	160,911	445,0 %
9	20,278	25,293	24,7 %	24,053	18,6 %	115,277	468,5 %
8	13,411	16,093	20,0 %	15,272	13,9 %	79,575	493,4 %
7	8,475	9,668	14,1 %	9,146	7,9 %	52,408	518,4 %
6	5,064	5,393	6,5 %	5,078	0,3 %	32,465	541,1 %
5	2,821	2,724	-3,4 %	2,545	-9,8 %	18,556	557,8 %
4	1,435	1,197	-16,6 %	1,103	-23,1 %	9,422	556,6 %
3	0,646	0,426	-34,1 %	0,382	-40,9 %	3,975	515,3 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			34,6 %		28,5 %		557,8 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-34,1 %		-40,9 %		-

Seinän pituus 3m ja oviaukko 1500x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko kolmasosa pisteessä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	86,889	124,109	42,8 %	95,210	9,6 %	205,687	136,7 %
11	63,113	88,507	40,2 %	67,861	7,5 %	151,527	140,1 %
10	44,566	61,179	37,3 %	46,874	5,2 %	108,688	143,9 %
9	30,433	40,729	33,8 %	31,176	2,4 %	75,429	147,9 %
8	19,962	25,894	29,7 %	19,794	-0,8 %	50,381	152,4 %
7	12,465	15,538	24,7 %	11,855	-4,9 %	32,039	157,0 %
6	7,317	8,652	18,2 %	6,582	-10,0 %	19,126	161,4 %
5	3,965	4,258	7,4 %	3,299	-16,8 %	10,482	164,4 %
4	1,929	1,905	-1,2 %	1,430	-25,9 %	5,073	163,0 %
3	0,803	0,671	-16,4 %	0,495	-38,4 %	2,037	153,7 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			42,8 %		9,6 %		164,4 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-16,4 %		-38,4 %		-

Seinän pituus 3m ja oviaukko 1500x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko neljäsosapisteessä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	329,325	532,345	61,6 %	151,166	-54,1 %	532,511	61,7 %
11	240,789	379,478	57,6 %	107,744	-55,3 %	379,578	57,6 %
10	170,682	262,161	53,6 %	74,422	-56,4 %	262,193	53,6 %
9	116,579	174,403	49,6 %	49,498	-57,5 %	174,420	49,6 %
8	76,111	110,767	45,5 %	31,427	-58,7 %	110,763	45,5 %
7	46,980	66,367	41,3 %	18,822	-59,9 %	66,341	41,2 %
6	26,989	36,872	36,6 %	10,450	-61,3 %	36,851	36,5 %
5	14,095	18,503	31,3 %	5,238	-62,8 %	18,420	30,7 %
4	6,445	8,034	24,7 %	2,270	-64,8 %	8,013	24,3 %
3	2,416	2,793	15,6 %	0,786	-67,5 %	2,775	14,9 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			61,6 %		-54,1 %		61,7 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-		-67,5 %		-

Seinän pituus 5m ja oviaukko 1500x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko puolessa välissä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	11,763	15,098	28,4 %	14,757	25,5 %	31,032	163,8 %
11	8,600	10,790	25,5 %	10,518	22,3 %	23,092	168,5 %
10	6,127	7,479	22,1 %	7,265	18,6 %	16,763	173,6 %
9	4,238	4,998	17,9 %	4,832	14,0 %	11,793	178,3 %
8	2,829	3,930	38,9 %	3,068	8,4 %	7,984	182,2 %
7	1,812	2,372	30,9 %	1,837	1,4 %	5,161	184,8 %
6	1,101	1,332	21,0 %	1,020	-7,4 %	3,134	184,7 %
5	0,629	0,797	26,7 %	0,511	-18,8 %	1,756	179,2 %
4	0,332	0,552	66,3 %	0,222	-33,1 %	0,873	163,0 %
3	0,158	0,198	25,3 %	0,077	-51,3 %	0,361	128,5 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			66,3 %		25,5 %		184,8 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-		-51,3 %		-

Seinän pituus 5m ja oviaukko 1500x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko kolmasosa pisteessä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	13,369	17,670	32,2 %	16,359	22,4 %	26,270	96,5 %
11	9,788	12,624	29,0 %	11,660	19,1 %	19,275	96,9 %
10	6,903	8,746	26,7 %	8,054	16,7 %	13,751	99,2 %
9	4,744	5,840	23,1 %	5,357	12,9 %	9,508	100,4 %
8	3,141	3,936	25,3 %	3,401	8,3 %	6,309	100,9 %
7	1,988	2,488	25,2 %	2,037	2,5 %	3,991	100,8 %
6	1,190	1,397	17,4 %	1,131	-5,0 %	2,368	99,0 %
5	0,665	0,756	13,7 %	0,567	-14,7 %	1,290	94,0 %
4	0,339	0,383	13,0 %	0,246	-27,4 %	0,623	83,8 %
3	0,154	0,163	5,8 %	0,085	-44,8 %	0,249	61,7 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			32,2 %		22,4 %		100,9 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-		-44,8 %		-

Seinän pituus 5m ja oviaukko 1500x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko neljäsosa pisteessä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	16,369	22,438	37,1 %	18,905	15,5 %	27,002	65,0 %
11	11,872	16,022	35,0 %	13,475	13,5 %	19,543	64,6 %
10	8,374	11,093	32,5 %	9,307	11,1 %	13,735	64,0 %
9	5,715	7,401	29,5 %	6,190	8,3 %	9,335	63,3 %
8	3,749	4,720	25,9 %	3,930	4,8 %	6,079	62,1 %
7	2,343	2,845	21,4 %	2,354	0,5 %	3,757	60,3 %
6	1,378	1,631	18,4 %	1,307	-5,2 %	2,171	57,5 %
5	0,750	0,847	12,9 %	0,655	-12,7 %	1,144	52,5 %
4	0,368	0,387	5,2 %	0,284	-22,8 %	0,531	44,3 %
3	0,158	0,150	-5,1 %	0,098	-38,0 %	0,203	28,5 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			37,1 %		15,5 %		65,0 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-5,1 %		-38,0 %		-

Seinän pituus 7m ja oviaukko 1500x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko puolessa välissä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	4,353	6,362	46,2 %	5,313	22,1 %	9,467	117,5 %
11	3,971	4,555	14,7 %	3,787	-4,6 %	7,001	76,3 %
10	2,849	3,447	21,0 %	2,616	-8,2 %	5,047	77,1 %
9	1,988	2,397	20,6 %	1,740	-12,5 %	3,531	77,6 %
8	1,344	1,775	32,1 %	1,105	-17,8 %	2,375	76,7 %
7	0,875	1,337	52,8 %	0,662	-24,3 %	1,522	73,9 %
6	0,544	0,753	38,4 %	0,367	-32,5 %	0,918	68,8 %
5	0,322	0,386	19,9 %	0,184	-42,9 %	0,511	58,7 %
4	0,179	0,249	39,1 %	0,080	-55,3 %	0,252	40,8 %
3	0,093	0,111	19,4 %	0,028	-69,9 %	0,104	11,8 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			52,8 %		22,1 %		117,5 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-		-69,9 %		-

Seinän pituus 7m ja oviaukko 1500x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko kolmasosa pisteessä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	4,338	6,537	50,7 %	5,665	30,6 %	8,353	92,6 %
11	3,160	4,680	48,1 %	4,038	27,8 %	6,113	93,4 %
10	2,244	3,251	44,9 %	2,789	24,3 %	4,347	93,7 %
9	1,547	2,289	48,0 %	1,855	19,9 %	2,996	93,7 %
8	1,030	1,501	45,7 %	1,178	14,4 %	1,985	92,7 %
7	0,659	0,995	51,0 %	0,705	7,0 %	1,251	89,8 %
6	0,402	0,649	61,4 %	0,392	-2,5 %	0,740	84,1 %
5	0,232	0,334	44,0 %	0,196	-15,5 %	0,402	73,3 %
4	0,126	0,175	38,9 %	0,085	-32,5 %	0,194	54,0 %
3	0,064	0,084	31,3 %	0,029	-54,7 %	0,078	21,9 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			61,4 %			30,6 %	93,7 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-			-54,7 %	-

Seinän pituus 7m ja oviaukko 1500x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko neljäsosa pisteessä

Taipumat							
Menetelmä:	FEM	Rosman		Ekviv.		Lewick	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	4,596	7,027	52,9 %	6,180	34,5 %	8,170	77,8 %
11	3,319	5,130	54,6 %	4,405	32,7 %	5,918	78,3 %
10	2,332	3,562	52,7 %	3,043	30,5 %	4,164	78,6 %
9	1,587	2,386	50,3 %	2,024	27,5 %	2,830	78,3 %
8	1,040	1,570	51,0 %	1,285	23,6 %	1,847	77,6 %
7	0,652	0,964	47,9 %	0,769	17,9 %	1,143	75,3 %
6	0,388	0,573	47,7 %	0,427	10,1 %	0,661	70,4 %
5	0,217	0,321	47,9 %	0,214	-1,4 %	0,351	61,8 %
4	0,113	0,146	29,2 %	0,093	-17,7 %	0,163	44,2 %
3	0,065	0,064	-1,5 %	0,032	-50,8 %	0,063	-3,1 %
Max. virhe vrt. FEM:iin			54,6 %			34,5 %	78,6 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-1,5 %			-50,8 %	-3,1 %

Pilarin ja seinän yhteistoiminnan kartoitus ekvivalentin jäykkyyden menetelmällä

Ohjeistus taulukon lukua varten:

Taulukossa on esitetty eri menetelmin laskettuja taipumia.

FEM= Elementtimenetelmällä saatu taipuman vertailuarvo.

Ekviv.= Tulokset laskettu ekvivalentin jäykkyyden menetelmällä.

Rosman= Tulokset laskettu Rosman'in menetelmällä.

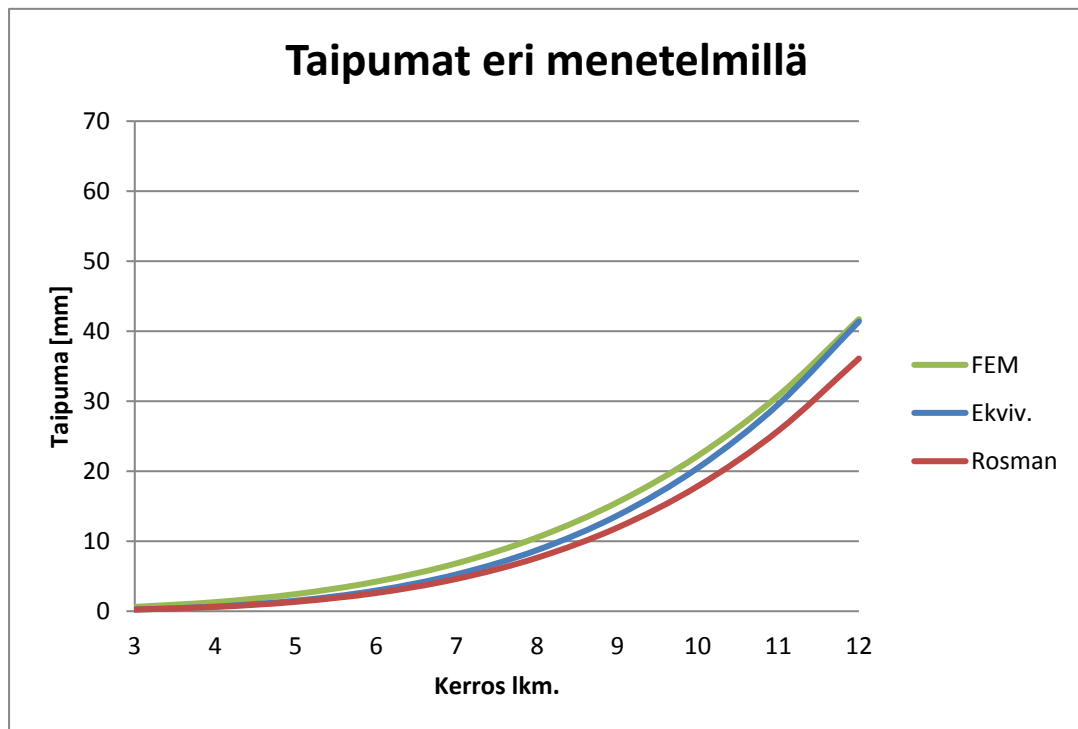
Max. virhe vrt. FEM + = Suurin varmalla puolella oleva virhe

Max. virhe vrt. FEM - = Suurin epävarmalla puolella oleva virhe

Aukollisen jäykistävän seinän taipuma eri menetelmin, kun rakennukseen kohdistetaan kerroksittain 10 kN:n vaakavoima.
Seinän pituus 3m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko puolessa välissä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv.		Rosman	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	41,71	41,392	-0,8 %	36,086	-13,5 %
11	30,809	29,577	-4,0 %	25,785	-16,3 %
10	22,207	20,496	-7,7 %	17,869	-19,5 %
9	15,553	13,692	-12,0 %	11,937	-23,2 %
8	10,525	8,746	-16,9 %	7,625	-27,6 %
7	6,833	5,284	-22,7 %	4,607	-32,6 %
6	4,213	2,972	-29,5 %	2,591	-38,5 %
5	2,433	1,522	-37,4 %	1,327	-45,5 %
4	1,288	0,684	-46,9 %	0,597	-53,6 %
3	0,603	0,255	-57,7 %	0,222	-63,2 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			-0,8 %	-13,5 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-57,7 %	-63,2 %	



Seinän pituus 3m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko kolmasosa pisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv.		Rosman	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	59,275	44,727	-24,5 %	39,084	-34,1 %
11	43,434	31,959	-26,4 %	27,927	-35,7 %
10	31,014	22,147	-28,6 %	19,353	-37,6 %
9	21,459	14,795	-31,1 %	12,929	-39,8 %
8	14,315	9,451	-34,0 %	8,259	-42,3 %
7	9,111	5,710	-37,3 %	4,989	-45,2 %
6	5,484	3,212	-41,4 %	2,807	-48,8 %
5	3,054	1,644	-46,2 %	1,437	-52,9 %
4	1,538	0,739	-52,0 %	0,646	-58,0 %
3	0,668	0,276	-58,7 %	0,241	-63,9 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			-24,5 %		-34,1 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-58,7 %		-63,9 %

Seinän pituus 3m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko neljäsosapisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv.		Rosman	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	87,143	48,818	-44,0 %	43,613	-50,0 %
11	63,599	34,882	-45,2 %	31,163	-51,0 %
10	45,193	24,173	-46,5 %	21,596	-52,2 %
9	31,061	16,148	-48,0 %	14,427	-53,6 %
8	20,548	10,315	-49,8 %	9,216	-55,1 %
7	12,922	6,232	-51,8 %	5,567	-56,9 %
6	7,66	3,506	-54,2 %	3,132	-59,1 %
5	4,164	1,795	-56,9 %	1,603	-61,5 %
4	2,028	0,807	-60,2 %	0,721	-64,4 %
3	0,837	0,301	-64,0 %	0,269	-67,9 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			-44,0 %		-50,0 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-64,0 %		-67,9 %

Seinän pituus 5m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko puolessa välissä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv.		Rosman	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	3,571	10,138	183,9 %	9,520	166,6 %
11	2,821	7,236	156,5 %	6,795	140,9 %
10	2,184	5,008	129,3 %	4,703	115,3 %
9	1,65	3,339	102,4 %	3,136	90,1 %
8	1,212	2,127	75,5 %	1,998	64,9 %
7	0,858	1,280	49,2 %	1,298	51,3 %
6	0,581	0,716	23,2 %	0,726	25,0 %
5	0,371	0,364	-1,9 %	0,369	-0,5 %
4	0,219	0,161	-26,5 %	0,173	-21,0 %
3	0,116	0,058	-50,0 %	0,073	-37,1 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			183,9 %	166,6 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-50,0 %	-37,1 %	

Seinän pituus 5m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko kolmasosa pisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv.		Rosman	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	3,601	10,666	196,2 %	10,041	178,8 %
11	2,839	7,613	168,2 %	7,167	152,4 %
10	2,193	5,268	140,2 %	4,960	126,2 %
9	1,652	3,513	112,7 %	3,307	100,2 %
8	1,208	2,238	85,3 %	2,107	74,4 %
7	0,851	1,347	58,3 %	1,268	49,0 %
6	0,572	0,754	31,8 %	0,732	28,0 %
5	0,362	0,383	5,8 %	0,372	2,8 %
4	0,211	0,169	-19,9 %	0,168	-20,4 %
3	0,109	0,061	-44,0 %	0,067	-38,5 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			196,2 %	178,8 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-44,0 %	-38,5 %	

Seinän pituus 5m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko neljäsosa pisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv.		Rosman	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	3,764	11,118	195,4 %	10,517	179,4 %
11	2,96	7,936	168,1 %	7,506	153,6 %
10	2,279	5,492	141,0 %	5,195	128,0 %
9	1,711	3,662	114,0 %	3,464	102,5 %
8	1,245	2,333	87,4 %	2,207	77,3 %
7	0,871	1,404	61,2 %	1,328	52,5 %
6	0,581	0,786	35,3 %	0,743	27,9 %
5	0,363	0,399	9,9 %	0,383	5,5 %
4	0,207	0,177	-14,5 %	0,170	-17,9 %
3	0,104	0,064	-38,5 %	0,062	-40,4 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			195,4 %	179,4 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-38,5 %	-40,4 %	

Seinän pituus 7m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko puolessa välissä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv.		Rosman	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	1,593	3,986	150,2 %	4,132	159,4 %
11	1,261	2,844	125,5 %	2,948	133,8 %
10	0,98	1,967	100,7 %	2,039	108,1 %
9	0,743	1,311	76,4 %	1,358	82,8 %
8	0,549	0,834	51,9 %	0,901	64,1 %
7	0,391	0,501	28,1 %	0,551	40,9 %
6	0,268	0,280	4,5 %	0,364	35,8 %
5	0,173	0,142	-17,9 %	0,184	6,4 %
4	0,105	0,062	-41,0 %	0,081	-22,9 %
3	0,059	0,022	-62,7 %	0,034	-42,4 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			150,2 %	159,4 %	
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-62,7 %	-42,4 %	

Seinän pituus 7m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko kolmasosa pisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv.		Rosman	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	1,572	4,104	161,1 %	4,187	166,3 %
11	1,243	2,928	135,6 %	2,987	140,3 %
10	0,963	2,025	110,3 %	2,066	114,5 %
9	0,729	1,349	85,0 %	1,388	90,4 %
8	0,536	0,859	60,3 %	0,890	66,0 %
7	0,381	0,516	35,4 %	0,535	40,4 %
6	0,259	0,288	11,2 %	0,299	15,4 %
5	0,167	0,146	-12,6 %	0,153	-8,4 %
4	0,101	0,064	-36,6 %	0,071	-29,7 %
3	0,056	0,023	-58,9 %	0,025	-55,4 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			161,1 %		166,3 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-58,9 %		-55,4 %

Seinän pituus 7m ja oviaukko 1000x2100 mm²

Tapaus, jossa aukko neljäsosa pisteessä

Taipumat					
Menetelmä:	FEM	Ekviv.		Rosman	
krs. lkm.	[mm]	[mm]	virhe	[mm]	virhe
12	1,568	4,258	171,6 %	4,328	176,0 %
11	1,236	3,038	145,8 %	3,088	149,8 %
10	0,955	2,101	120,0 %	2,136	123,7 %
9	0,72	1,400	94,4 %	1,423	97,6 %
8	0,527	0,891	69,1 %	0,906	71,9 %
7	0,372	0,536	44,1 %	0,547	47,0 %
6	0,252	0,299	18,7 %	0,306	21,4 %
5	0,161	0,151	-6,2 %	0,155	-3,7 %
4	0,096	0,067	-30,2 %	0,069	-28,1 %
3	0,053	0,024	-54,7 %	0,025	-52,8 %
Max. virhe vrt. FEM:iin +			171,6 %		176,0 %
Max. virhe vrt. FEM:iin -			-54,7 %		-52,8 %