

PUULEVYJÄYKISTEISEN SEINÄRAKENTEEN STAATTINEN TOIMINTA JA MITOITUS

Jarmo Leskelä
Mikko Kilpeläinen

Rakenteiden Mekaniikka, Vol. 28
No. 1, 1995, s. 34-49

Tiivistelmä: Artikkelissa johdetaan mitoitusyhtälöt puulevyjäykisteisen seinärakenteen liitosvoimien ja siirtymien määrittämiseksi. Laskelmissa otetaan huomioon levyn eri kiinnitystapojen vaikutus jäykistysseinän voima- ja siirtymäsuureisiin.

JOHDANTO

Puulevyjen käyttö rakennusten seinärakenteissa on varsin yleistä. Levyjä voidaan käyttää sisäverhouslevyinä, jolloin ne muodostavat rakenteen näkyvän pinnan, tai tuulensuojalevyinä, jolloin ne toimivat osana eristyskerrosta. Samalla ne lisäävät rakennuksen rungon kantokykyä ja jäykkyyttä. Rungon jäykistämiseen soveltuvia levyjä ovat vaneri-, lastu-, kuitu- ja kipsilevyt.

Jäykistyslevyt kiinnitetään rakennuksen puiseen runkoon joko nauloilla, ruuveilla tai liimaamalla. Jälkimmäisen kiinnitystavan käyttö yksinään ei ole suositeltavaa, vaan sitä voidaan käyttää yhdessä naula- tai ruuviliitosten kanssa. Levyn ja rungon välinen liitos on siten joko joustava (naulaus, ruuvaus) tai jäykkä (liimaus). Tässä työssä keskitytään nauloilla/ruuveilla koottuihin rakenteisiin, jolloin levyn ja rungon välisen liitoksen ajatellaan toimivan joustavana.

Rakennuksen ulkomittojen ja kerrosluvun kasvaessa tulee rungon jäykistämiseen kiinnittää entistä suurempaa huomiota. Levyjäykistys on tehokas ja käytännöllinen tapa hoitaa puurunkoisen rakennuksen jäykistäminen vaakakuormia vastaan. Levyjäykisteisen seinärakenteen mitoitusohjeet Puurakenteiden suunnitteluohjeessa /6/ ovat kuitenkin niukat ja osittain epäselvät. Suunnitteluohjeessa otetaan huomioon ainoastaan levyn

reunoilla olevat naularivit, eikä näin ollen huomioida levyn eri kiinnitystapojen vaikutusta seinän kuormituskapasiteettiin ja jäykkyysominaisuuksiin. Mitoitusyhtälöitä johdettaessa tehdyt rakenteelliset otaksumat, etenkin seinän alareunan kiinnityksen osalta, ovat epäselvät. Lisäksi yläpuolisilta rakenteilta runkoon kohdistuvien pystysuuntaisten normaalivoimien vaikutusta ja rungon ankkurointia perustuksiin ei ole riittävän selkeästi otettu huomioon.

Levyjäykisteisen seinärakenteen laskennallista mitoitusta on aiemmin käsitelty lähteissä /1/ ja /2/. Puurakenteiden suunnitteluohjeissa /6/ esitetty jäykistysseinän mitoitusohje perustuu näihin julkaisuihin. Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa B10 "Puurakenteet" ei käsitellä jäykistysseinien mitoitusta lainkaan ja Puurakenteiden yleiseurooppalaiset suunnittelusäännöt "Eurocode 5" käsittelee asiaa niin ikään hyvin niukasti.

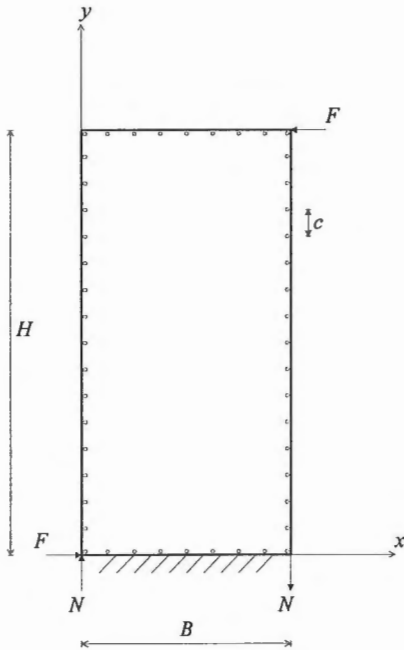
Källsner on julkaisuissaan /3/, /4/ käsitellyt seikkaperäisesti jäykistysseinien laskennallista ja kokeellista mitoitusta. Eri tutkimusryhmien suorittamien kuormituskokeiden tuloksia on esitetty useissa koti- ja ulkomaisissa julkaisuissa. Leskelän diplomityö /4/ pohjautuu pääasiassa edellämainittuihin julkaisuihin täydennettynä omilla tarkasteluilla. Tämä artikkeli on lyhennelmä diplomityön jäykistysseinää koskevasta osuudesta.

JÄYKISTYSSEINÄN TOIMINTA JA MITOITUS

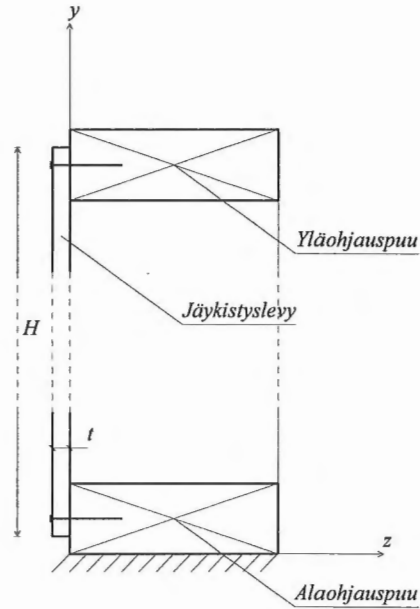
Jäykistysseinää käytetään ottamaan vastaan rakennukseen kohdistuvat vaakakuormat ja siirtämään ne ankkuroinnin välityksellä perustuksille. Tavallisin vaakakuorma on tuulikuorma sekä seismisesti aktiivisilla alueilla maanjäristyskuorma. Näiden lisäksi otetaan huomioon pystykuormista aiheutuva lisävaakavoima.

Rakennuksen jäykistäminen pidemmälle sivulle kohdistuvaa vaakakuormaa vastaan tapahtuu jäykistäväillä päätyseinillä ja vastaavasti lyhyemmälle sivulle kohdistuva vaakakuorma otetaan vastaan pidemmän sivun jäykistysseinillä. Siten mitoittavammaksi tekijäksi muodostuu päätyseinän jäykistystekninen tarkastelu.

LÄHTÖKOHDAT JA OLETUKSET



Kuva 1: Jäykistysseinän runkoon kohdistuvat kuormat



Kuva 2: Jäykistyslevyn kiinnityksen reunaehdot

Otetaan lähtökohdaksi kuvan 1 mukainen alustaansa liukumattomasti kiinnitetty jäykistysseinä. Seinän yläreunaan vaikuttaa vaakasuuntainen kuorma F , jonka ajatellaan kohdistuvan seinän runkoon. Runkoon on kiinnitetty kuvan 2 mukaisin reunaehdoin jäykistyslevy, jonka leveys on B ja korkeus H naulavälin ollessa vakio c . Levyyn kohdistuu ainoastaan naulojen leikkausvoimat, joten siihen syntyy vain leikkausmuodonmuutoksia. Runkopuutavaran normaalivoima- ja taivutusjäykkyydet otaksutaan suuriksi, eikä niissä oleteta tapahtuvan muodonmuutoksia. Runkopuiden väliset liitokset oletetaan nivelellisiksi.

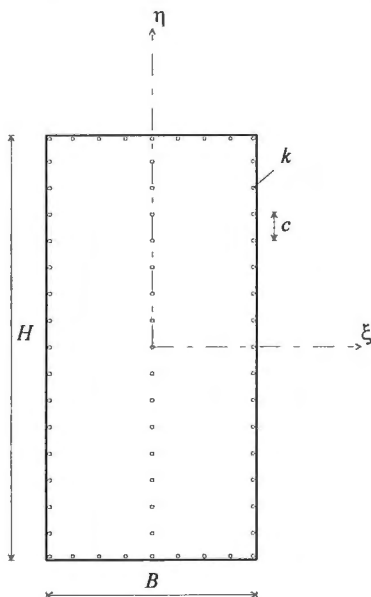
Vaakasuurta voiman F vaikutuksesta syntyy seinän alareunaan pystysuuntaiset tukivoimat N . Tasapainotilan vallitessa täytyy olla voimassa

$$N = \frac{H}{B} F \quad (1)$$

Koska toinen tukivoimista N on vetävä, on runkotolppa ankkuroitava tältä kohdalta vetoakestävästi alustarakenteeseen. Yläpuolisilta rakenteilta kohdistuu runkoon yleensä pystysuuntaisia normaalivoimia. Nämä jätetään kuitenkin seuraavissa tarkasteluissa huomioon ottamatta, koska ne eivät vaikuta levyn ja rungon välisiin liitosvoimiin eivätkä näin ollen myöskään levyn rasituksiin ja muodonmuutoksiin.

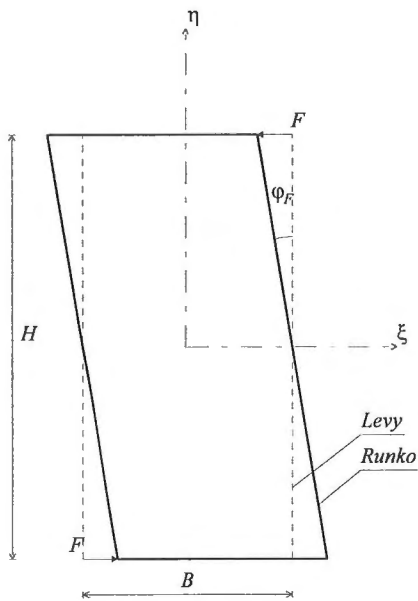
LIITINVOIMAT JA SIIRTYMÄT

Tarkastellaan kuutta eri tapaa kiinnittää jäykistyslevy runkoonsa sekä johdetaan kullekin kiinnitystavalle mitoitusyhtälöt vaakasuuntaisesta pistekuormasta F aiheutuvien liitinvoimien ja siirtymien määrittämiseksi.

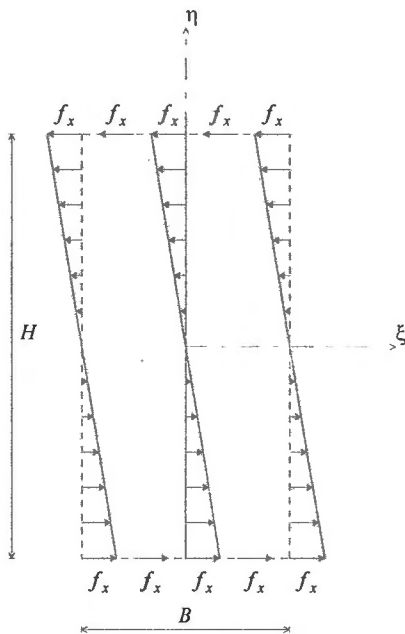


Kuva 3: Levyn kiinnitystapa 1

Oletetaan levy kiinnitettyksi runkoon kuvan 3 mukaisesti. Tarkastellaan kuvan 4 mukaista vaakasuuntaisen voiman F aiheuttamaa levyn ja rungon välistä siirtymää ja kiertymää ξ -akselin suhteen sekä tästä aiheutuvaa kuvan 5 mukaista liitosvoimajakautumaa.



Kuva 4: Levyn ja rungon välinen siirtymä ja kiertymä ξ -akselin suhteen



Kuva 5: Voiman F aiheuttama liitosvoimajakauma

Integroimalla F :stä aiheutuvien liitosvoimapintojen yli saadaan momenttiyhtälöksi levyn keskipisteen suhteen

$$FH = \frac{k}{c} \oint \varphi_F \eta^2 ds = \varphi_F D_x \quad (2)$$

jossa

$$D_x = \frac{k}{c} \oint \eta^2 ds = \frac{k}{c} \left[2 \int_{-B/2}^{B/2} \left(\frac{H}{2} \right)^2 d\xi + 6 \int_0^{H/2} \eta^2 d\eta \right] = \frac{k}{c} \left(\frac{BH^2}{2} + \frac{H^3}{4} \right) \quad (3)$$

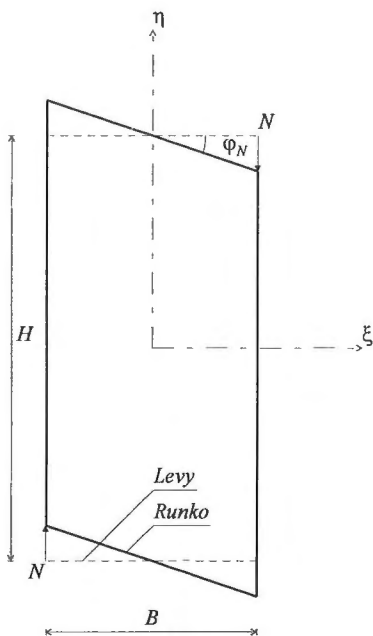
kun k on yksittäisen naulan siirtymäkerroin

Vaakaasuuntaiseksi maksimiliitinvoimaksi f_x ja rungon yläreunan vaakasuoraksi siirtymäksi δ_F alareunan suhteen saadaan

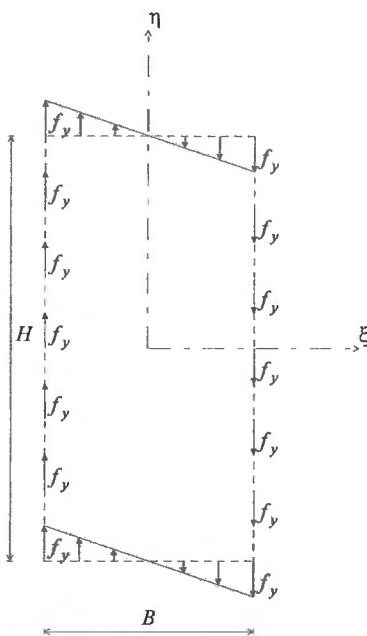
$$f_x = k\varphi_F \frac{H}{2} = k \frac{H^2 F}{2D_x} = \frac{2cF}{2B+H} \quad (4)$$

$$\delta_F = \varphi_F H = \frac{H^2 F}{D_x} = \frac{c}{k} \frac{4F}{(2B+H)} \quad (5)$$

Tarkastellaan seuraavaksi kuvan 6 mukaista pystysuuntaisen voiman N aiheuttamaa levyn ja rungon välistä siirtymää ja kiertymää η -akselin suhteen sekä tästä aiheuttua kuvan 7 mukaista liitosvoimajakaamaa.



Kuva 6: Levyn ja rungon välinen siirtymä ja kiertymä η -akselin suhteen



Kuva 7: Voiman N aiheuttama liitosvoimajakaama

Integroimalla N :stä aiheutuvien liitosvoimapintojen yli saadaan momenttiyhtälöksi levyn keskipisteen suhteen

$$NB = \frac{k}{c} \oint \varphi_N \xi^2 ds = \varphi_N D_y \quad (6)$$

jossa

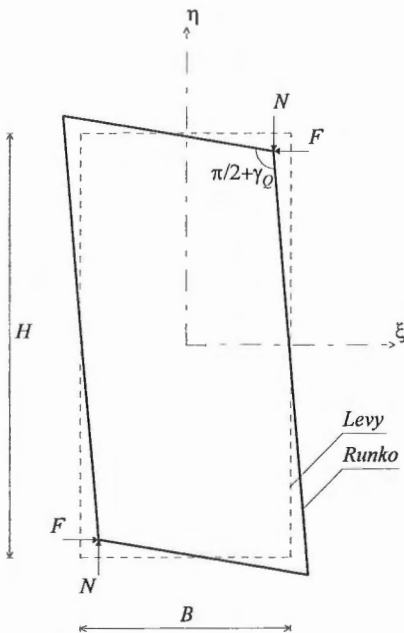
$$D_y = \frac{k}{c} \oint \xi^2 ds = \frac{k}{c} \left[4 \int_0^{B/2} \xi^2 d\xi + 2 \int_{-H/2}^{H/2} \left(\frac{B}{2} \right)^2 d\eta \right] = \frac{k}{c} \left(\frac{B^3}{6} + \frac{B^2 H}{2} \right) \quad (7)$$

Pystysuuntaiseksi maksimiliitosvoimaksi f_y ja rungon yläreunan vaakasuoraksi siirtymäksi δ_N alareunan suhteen saadaan

$$f_y = k \varphi_N \frac{B}{2} = k \frac{BHF}{2D_y} = \frac{3cHF}{B^2 + 3BH} \quad (8)$$

$$\delta_N = \varphi_N H = \frac{H^2 F}{D_y} = \frac{c}{k} \frac{6H^2 F}{(B^3 + 3B^2 H)} \quad (9)$$

Liitoksessa tapahtuvan liukuman lisäksi levyyn syntyy kuvan 8 mukainen voimien F ja N aiheuttama leikkausmuodonmuutos.



Kuva 8: Leikkausvoiman aiheuttama levyn leikkausmuodonmuutos

Rungon yläreunan vaakasuoraksi siirtymäksi δ_Q alareunan suhteen saadaan

$$\delta_Q = \gamma_Q H = \frac{\tau}{G} H = \frac{HF}{BGt} \quad (10)$$

kun G on levyn liukumoduuli

t on levyn paksuus.

Suurin liitinvoima f esiintyy levyn nurkissa, joissa

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} = \frac{kHF}{2} \sqrt{\frac{H^2}{D_x^2} + \frac{B^2}{D_y^2}} = \frac{\gamma c F}{B} \quad (11)$$







$$\text{jossa } \gamma = \sqrt{\frac{4}{\left(2 + \frac{H}{B}\right)^2} + \frac{9}{\left(\frac{B}{H} + 3\right)^2}} \quad (12)$$

Rungon yläreunan vaakasuoraksi kokonaissiirtymäksi δ alareunan suhteen saadaan osasiirtymien summana

$$\delta = \delta_F + \delta_N + \delta_Q = \left(\frac{1}{D_x} + \frac{1}{D_y}\right) H^2 F + \frac{HF}{BGt} = \left(\beta \frac{c}{k} \frac{H^2}{B^3} + \frac{H}{BGt}\right) F \quad (13)$$

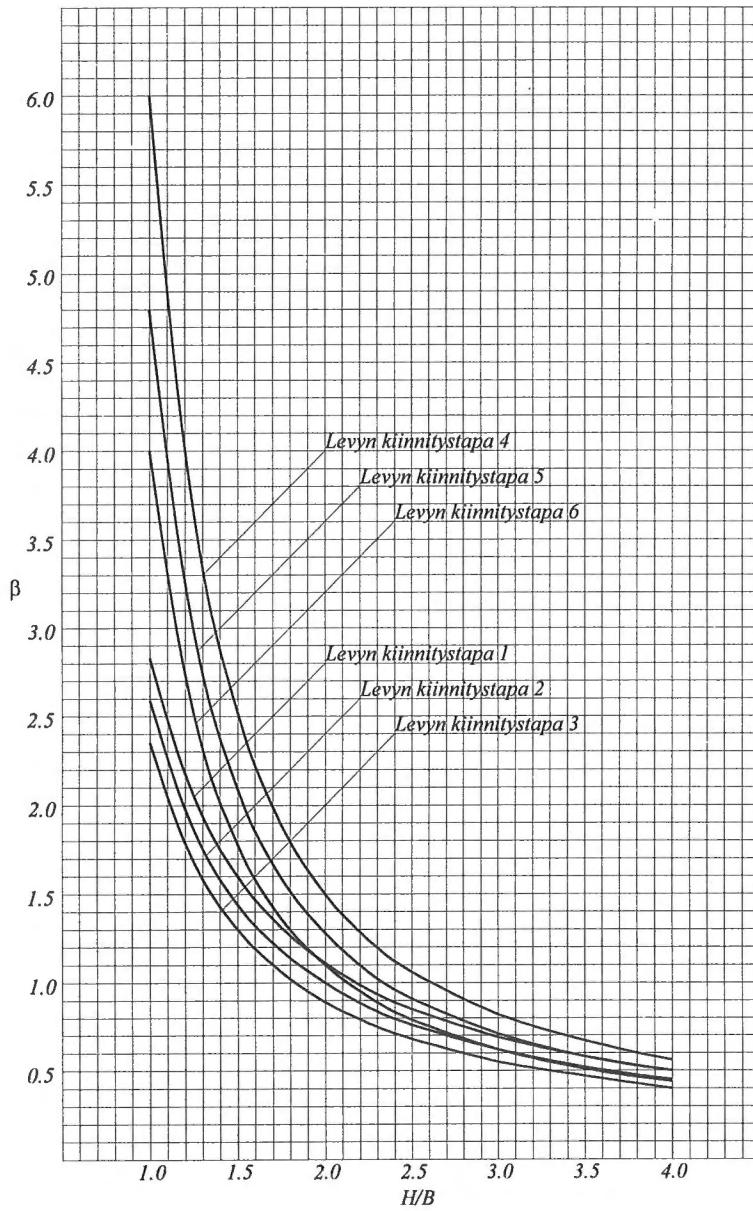
$$\text{jossa } \beta = \frac{4}{2\left(\frac{H}{B}\right)^2 + \left(\frac{H}{B}\right)^3} + \frac{6}{1 + 3\left(\frac{H}{B}\right)} \quad (14)$$

Levyn muissa kiinnitystapauksissa saadaan β - ja γ -kertoimille taulukon 1 mukaiset arvot.

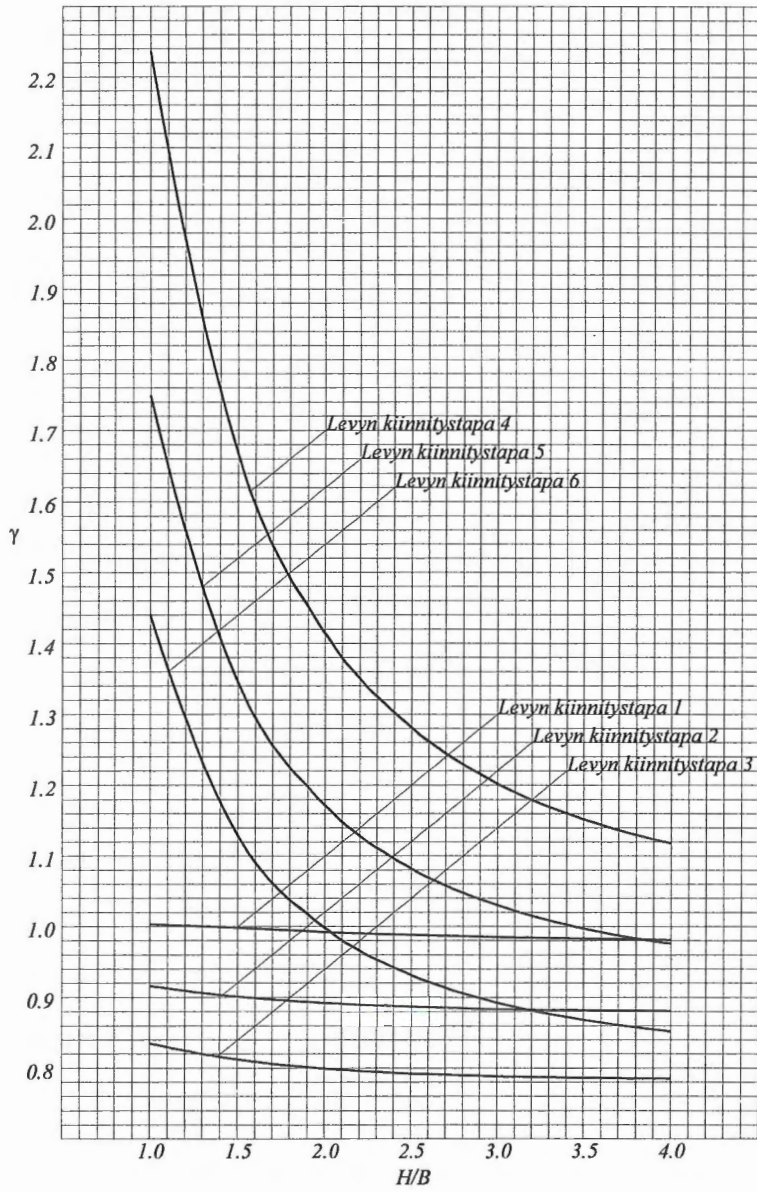
Levyn kiinnitystapa	β -kerroin	γ -kerroin
1. 	$\frac{4}{2\left(\frac{H}{B}\right)^2 + \left(\frac{H}{B}\right)^3} + \frac{6}{1+3\left(\frac{H}{B}\right)}$	$\sqrt{\frac{4}{\left(2+\frac{H}{B}\right)^2} + \frac{9}{\left(\frac{B}{H}+3\right)^2}}$
2. 	$\frac{6}{3\left(\frac{H}{B}\right)^2 + 2\left(\frac{H}{B}\right)^3} + \frac{18}{3+10\left(\frac{H}{B}\right)}$	$\sqrt{\frac{9}{\left(3+2\frac{H}{B}\right)^2} + \frac{81}{\left(3\frac{B}{H}+10\right)^2}}$
3. 	$\frac{12}{6\left(\frac{H}{B}\right)^2 + 5\left(\frac{H}{B}\right)^3} + \frac{24}{4+15\left(\frac{H}{B}\right)}$	$\sqrt{\frac{36}{\left(6+5\frac{H}{B}\right)^2} + \frac{144}{\left(4\frac{B}{H}+15\right)^2}}$
4. 	$\frac{4}{\left(\frac{H}{B}\right)^3} + \frac{2}{\left(\frac{H}{B}\right)}$	$\sqrt{\frac{4}{\left(\frac{H}{B}\right)^2} + 1}$
5. 	$\frac{3}{\left(\frac{H}{B}\right)^3} + \frac{9}{5\left(\frac{H}{B}\right)}$	$\sqrt{4\left(\frac{H}{B}\right)^2 + \frac{81}{100}}$
6. 	$\frac{12}{5\left(\frac{H}{B}\right)^3} + \frac{8}{5\left(\frac{H}{B}\right)}$	$\sqrt{25\left(\frac{H}{B}\right)^2 + \frac{16}{25}}$

Taulukko 1: Yhteenveto jäykistyssseinän suurimman liitinvoiman ja yläreunan vaakasuoran kokonaissiirtymän määrittämiseen tarvittavista kertoimista

Mitoitustyön helpottamiseksi esitetään taulukon 1 kaavoista määritetyt kertoimet mitoituskuvajien muodossa kuvissa 9 ja 10.

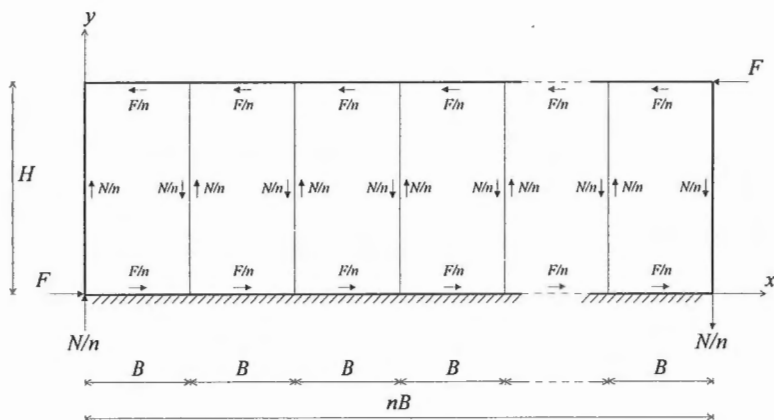


Kuva 9: β -kerroin jäykistyslevyn sivusuhteen funktiona levyn eri kiinnitystapauksissa



Kuva 10: γ -kerroin jäykistyslevyn sivusuhteen funktiona levyn eri kiinnitystapauksissa

JÄYKISTYSLEVYJÄ n KPL VIEREKKÄIN



Kuva 11: Jäykistysseinä, jossa levyjä n kpl vierekkäin

Tarkastellaan kuvan 11 mukaista seinärakennetta, jossa on n kpl $B \times H$ -kokoisia jäykistyslevyjä vierekkäin. Vierekkäiset levyt oletetaan naulatuksi samoihin runkotolppiin. Vaakavoima F jakaantuu nyt tasan jokaisen levyn osalle, jolloin saadaan suurin liitinvoima f ja kokonaissiirtymä δ

$$f = \frac{1}{n} \sqrt{f_x^2 + f_y^2} = \frac{\gamma c F}{nB} \quad (15)$$

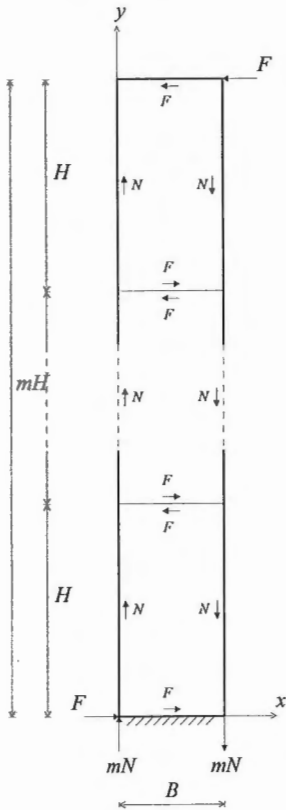
$$\delta = \frac{1}{n} (\delta_F + \delta_N + \delta_Q) = \left(\beta \frac{c}{k} \frac{H^2}{B^3} + \frac{H}{BGt} \right) \frac{F}{n} \quad (16)$$

Vierekkäisistä levyistä kohdistuu runkotolppiin toisensa kumoavat pystyvoimat

$$\frac{N}{n} = \frac{HF}{nB} \quad (17)$$

Reunimmaisissa runkotolpissa tämä voima N/n on ankkuroidava perustuksiin.

JÄYKISTYSLEVYJÄ m KPL PÄÄLLEKKÄIN



Kuva 12: Jäykistysseinä, jossa levyjä m kpl päällekkäin

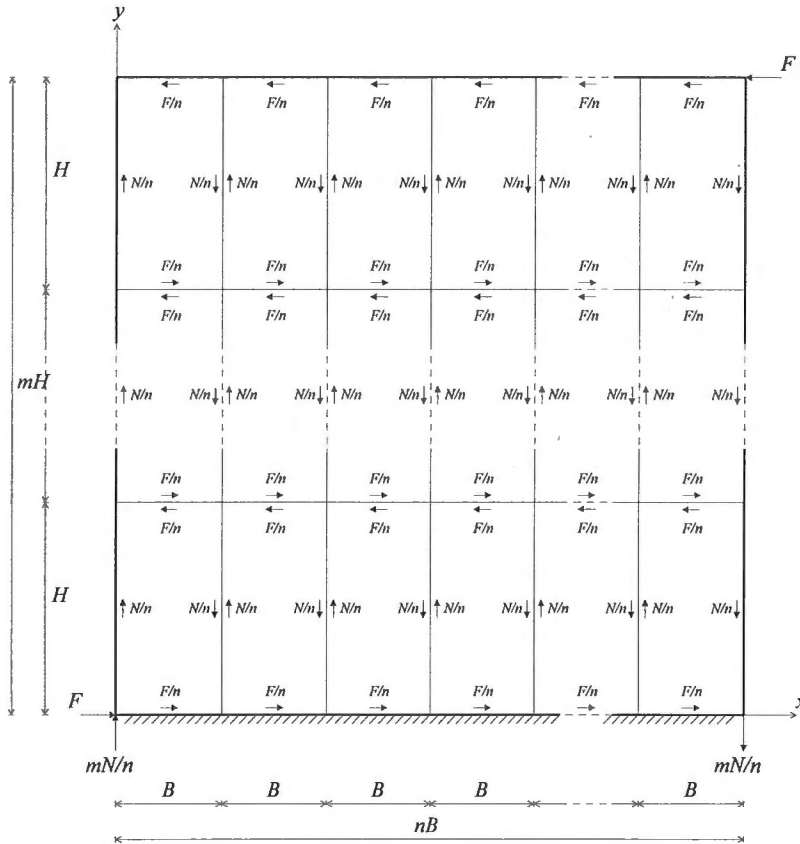
Jos $B \times H$ -kokoisia jäykistyslevyjä on kuvan 12 mukaisesti m kpl päällekkäin, on rasi-
tustila sama kuin yhden levyn tapauksessa. Sen sijaan kokonaissiirtymä δ on päällekkäisten levyjen siirtymien summa eli

$$\delta = \sum_{i=1}^m \delta_i = m(\delta_F + \delta_N + \delta_Q) = \left(\beta \frac{c}{k} \frac{H^2}{B^3} + \frac{H}{BGt} \right) mF \quad (18)$$

Reunimmaisten runkotolppien ankkurointivoima mN on nyt

$$mN = \frac{mHF}{B} \quad (19)$$

JÄYKISTYSLEVYJÄ n KPL VIEREKKÄIN JA m KPL PÄÄLLEKKÄIN



Kuva 13: Jäykistysseinä, jossa levyjä n kpl vierekkäin ja m kpl päällekkäin

Edellä esitetyn perusteella saadaan kuvan 13 mukainen tapaus, jossa $B \times H$ -kokoisia jäykistyslevyjä on n kpl vierekkäin ja m kpl päällekkäin. Suurin liitinvoima f ja kokonaissiirtymä δ on nyt

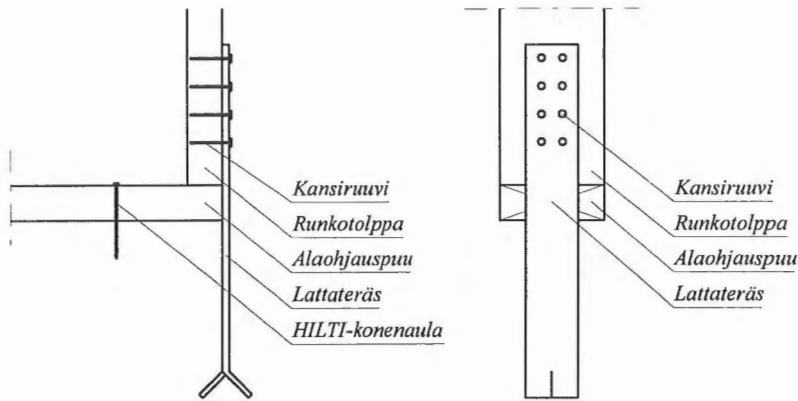
$$f = \frac{1}{n} \sqrt{f_x^2 + f_y^2} = \frac{\gamma c F}{nB} \quad (20)$$

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \delta_i = \frac{m}{n} (\delta_F + \delta_N + \delta_Q) = \left(\beta \frac{c}{k} \frac{H^2}{B^3} + \frac{H}{BGt} \right) \frac{mF}{n} \quad (21)$$

Reunimmaisten runkotolppien ankkurointivoima mN/n on siten

$$\frac{mN}{n} = \frac{mHF}{nB} \quad (22)$$

JÄYKISTYSSEINÄN ANKKUROINTI



Kuva 14: Jäykistyseinän ankkurointi

Seinä rakenne ankkuroidaan vaakavoimaa F vastaan alaohjauspuustaan liukumattomasti perustuksiin. Ankkurointi tapahtuu esimerkiksi kuvan 14 mukaisesti säännöllisin välein sijoitettavilla *HILTI*-koneenauiloilla, joille tarkistetaan ehto

$$F_v \leq F_{vd} \quad (23)$$

jossa F_v on liitokseen kohdistuva laskentaleikkausvoima
 F_{vd} on liitoksen laskentaleikkalujuus

Ankkurointi pystyvoimaa mHF/nB vastaan tapahtuu esimerkiksi kuvan 14 mukaisesti reunimmaisista runkotolpista lattateräksillä, joille tarkistetaan vastaavasti ehto

$$\frac{mHF}{nB} \leq F_{td} \quad (24)$$

jossa mHF/nB on lattateräkseen kohdistuva laskentavetovoima

F_{td} on lattateräksen laskentavetolujuus

Lattateräs kiinnitetään runkotolppaan esimerkiksi kansiruuvilla, joiden lukumäärä saadaan jakamalla laskentavetovoima mHF/nB liitoksen laskentaleikkauslujuudella.

LÄHDEKIRJALLISUUS

- /1/ Korttesmaa, M.; Puurakenteet 4, Laskentamenetelmät, Rakentajain Kustannus Oy, Helsinki 1981.
- /2/ Källsner, B.; Skivor som vindstabiliserande element vid träregelväggar, Träteknik Rapport Nr 56, Träteknik Centrum, Stockholm, 1984.
- /3/ Källsner, B.; Windaussteifung von Wandkonstruktionen im Holzskelettbau mit Plattenwerkstoffen, Bauen mit Holz 6/1983.
- /4/ Leskelä, J.; Puulevyjäykisteisen seinä- ja yläpohjarakenteen staattinen toiminta ja mitoitus, Diplomityö, Oulun Yliopisto, 1995.
- /5/ Rautakorpi, H., Leppänen, P.; Kantavien levyseinien laskentaohjeita, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Rakenteiden mekaniikan laboratorio, tiedonanto 3, Otaniemi 1976.
- /6/ RIL 120-1986; Puurakenteiden suunnitteluohjeet, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki 1986.

Jarmo Leskelä, DI
Oulun yliopisto
Rakentamistekniikan osasto
PL 191
90101 Oulu

Mikko Kilpeläinen, professori
Oulun yliopisto
Rakentamistekniikan osasto
PL 191
90101 Oulu