



RAKENNUSTIETO >

Rakennusalan täyden palvelun tietotalo

Rakennustieto Oy edistää hyvää rakennustapaa ja tuottaa rakentamisesta luotettavaa tietoa. Puolueettoman ja asiakaslähtöisen Rakennustieto Oy:n tuotteet kattavat rakentamisen koko elinkaaren suunnittelusta ylläpitoon. Yhtiön omistaa Rakennustietosäätiö RTS.

Tutustu palveluihimme

> rakennustieto.fi/rk/palvelut

Rakentajain kalenterin artikkelit

Tämä artikkeli on julkaistu alun perin Rakentajain kalenterissa, jota ovat julkaisseet Rakennustietosäätiö RTS sr ja Rakennusmestarit ja -insinöörit AMK RKL ry.

Julkaisu oli rakennusalan ammattilaisten ja opiskelijoiden käsikirja, joka yhdisteli teoriaa ja käytäntöä sekä kannusti hyvään rakentamiseen. Artikkelin vasemmassa reunassa olevasta vesileimasta näkee ko. Rakentajain kalenterin vuosikerran.

> [Artikkeliarkisto, kokoelma vuosien 1997–2018 Rakentajain kalenterissa julkaistuista artikkeleista](#)

Metalliohutlevys sandwich-elementtien kiinnitykset ja aukot

Paavo Hassinen

Laboratorioinsinööri, Teknillinen korkeakoulu, rakenteiden mekaniikan laboratorio
paavo.hassinen@hut.fi

Rakennusten seinien ja kattojen verhoamisessa, sisäseinissä ja alakatoissa käytettyjen metalliohutlevypintaisten sandwich-elementtien pintakerrokset valmistetaan nimensä mukaisesti metallisista ohutlevyistä, tavallisesti teräksestä, mutta myös ruostumatonta terästä ja alumiinia ja kuparia käytetään pintakerrosmateriaalina. Rakennusteknisissä sovelluksissa ydinkerros on tavallisesti polyuretaani- tai polystyreeni-solumuovia tai rakenteellista kivi- tai lasivillaa.

Rakennusten seiniin ja kattoihin asennettavat sandwich-elementit ovat rakenteellisen toimintansa puolesta tyyppillisesti palkki-rakenteita. Sandwich-elementtien ydin- ja pintakerrosten materiaaliominaisuuksia ja sandwich-palkkien mitoitusta on esitelty Rakentajain kalenterissa 2003 julkaistussa artikkelissa [1]. Tämä Rakentajain Kalenteri 2005:n artikkeli on sandwich-elementtien mitoitusta käsittelevän kokonaisuuden toinen osa. Artikkelissa kuvataan sandwich-elementtien kiinnityksen mitoitusta ja elementtien tehtyjen aukkojen vaikutusta elementtikentän käyttäytymiseen ja kestävyYTEEN.

Euroopassa valmistellaan sandwich-elementtien valmistusta, suunnittelua ja käyttöä koskevaa tuotestandardia, josta on elokuussa 2004 julkaistu lopulliseen äänestykseen menevä versio [2]. Standardissa asetetaan vaatimuksia elementin pinta- ja ydinkerrosaineille ja näiden väliselle saumalle sekä erikseen sandwich-elementin eli lopputuotteen seuraaville ominaisuuksille:

- mekaaninen kestävyys
- lämmönläpäisy
- pitkäaikaiskestävyys
- tulipalokäyttäytyminen
- mittatarkkuus
- vedenläpäisevyys
- ilman läpäisevyys
- vesihöyryn läpäisevyys
- ilmaäänien eristyskyky
- äänen eristävyys.

Tuotestandardi rajautuu metallisilla pintakerroksilla varustettujen sandwich-elementtien arviointiin. Ominaisuuksille asetettujen vaatimusten esittelyn jälkeen standardissa esitetään menetelmiä, joilla sandwich-tuotteiden ominaisuudet todennetaan. Standardi sisältää myös lujuus-

teknistä mitoitusta käsittelevän normatiivisen liitteen. Tuotestandardi esittää ne vaatimukset ja mahdollisuudet, joilla sandwich-elementille voidaan aikanaan standardin lopullisesti valmistuttua hakea ce-merkintä.

Sandwich-elementtien mitoitusta voidaan perustaa joko laskennallisiin tai kokeellisiin tarkasteluihin. Laskennallista mitoitusta varten tarvittavat lähtötiedot kuten ydin- ja pintakerroksen lujuus- ja jäykkyysominaisuudet on ensin haettava kokeellisesti. Suomessa, Pohjoismaissa ja laajasti Keski-Euroopassa sandwich-elementtien mitoitusta perustuu laskelmiin, joissa tutkitaan elementin kelpoisuus käyttörajatilassa ja kestävyys murtorajatilassa sandwich-elementeille johdettujen mitoituslausekkeiden perusteella. Niitä on esitelty Rakentajain kalenterissa 2003 [1] alkuun ECCS- ja CIB-suosituksissa esitettyjen laskentamallien pohjalta [3], [4].

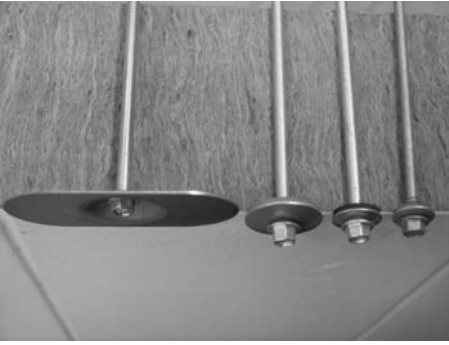
Kokeellinen mitoitusta perustuu täyden mittakaavan koekappaleilla tehtäviin testeihin. Kokeellista mitoitusta käytetään erityisesti Ranskassa. Se sopii ja sitä käytetään muissakin maissa sellaisissa mitoitustapauksissa, joille luotettavia laskentamalleja ei ole.

Sandwich-elementtien kiinnittäminen

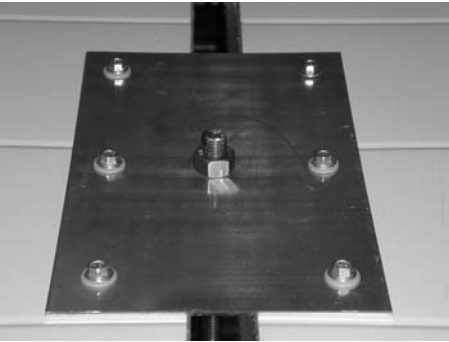
Kiinnitys runkorakenteeseen

Sandwich-elementin ja rakennuksen primaarisen tai sekundaarisen runkorakenteen välinen kiinnitys voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Kiinnitysmenetelmän ja kiinnikkeen valinta riippuu runkorakenteen materiaalista, kiinnityskohtaan kohdistuvista voimista, ulkonäkötekojöstä ja käytettävästä asennustekniikasta.

Teräs- tai puurakenteeseen runkoon sandwich-elementit kiinnitetään tavallisimmin ruuveilla, joiden kärki porataan elementin läpi suoraan alusrakenteeseen ilman esireikää. Ruuvin kärki valitaan runkorakenteen materiaalin ja ainepaksuuden perusteella. Ruuvin kannan alle voidaan valita erikoisaisia ja -tyyppisiä aluslevyjä. Tavallisia ovat halkaisijaltaan 16, 19 ja 29 mm olevat pyöreät aluslevyt, mutta kiinnittämiseen



Kuva 1. Tyypillinen kiinnike sandwich-elementin ja runkorakenteen välillä on elementtiruuvi, jonka rakenne, paksuus, materiaali ja aluslevy valitaan kohteen vaatimusten mukaan. Kuvassa vasemmalta lukien uppokiinnitys aluslevy ja pyöreät halkaisijaltaan 29, 19 ja 16 mm olevat aluslevyt.



Kuva 2. Vetomutterikiinnitys perustuu runkopilarin hitsattuun mutteriin kierrettyyn pultiin tai kierretankoon, joka puristaa kookasta suoraa tai profiloitua aluslevyä elementin ulkopintaa vasten. Aluslevy voidaan lukita paikoilleen ohutlevyruuveilla.

käytetään myös näitä suurempia erikoisaluslevyjä ja uppokiinnitys aluslevyjä. Uppokiinnitys aluslevyjen ansiosta myös ruuvin kanta jää piiloon ohuen, elementin pintaa myötäilevän verhoislistan alle.

Betonirakenteeseen sandwich-elementit kiinnitetään ankkureilla, joista esimerkiksi spike-ankkuri lyödään elementin läpi esiporattuun reikään. Ankkurin kannan alle voidaan valita erikokoisia ja -muotoisia aluslevyjä ruuvikiinnikkeen tapaan.

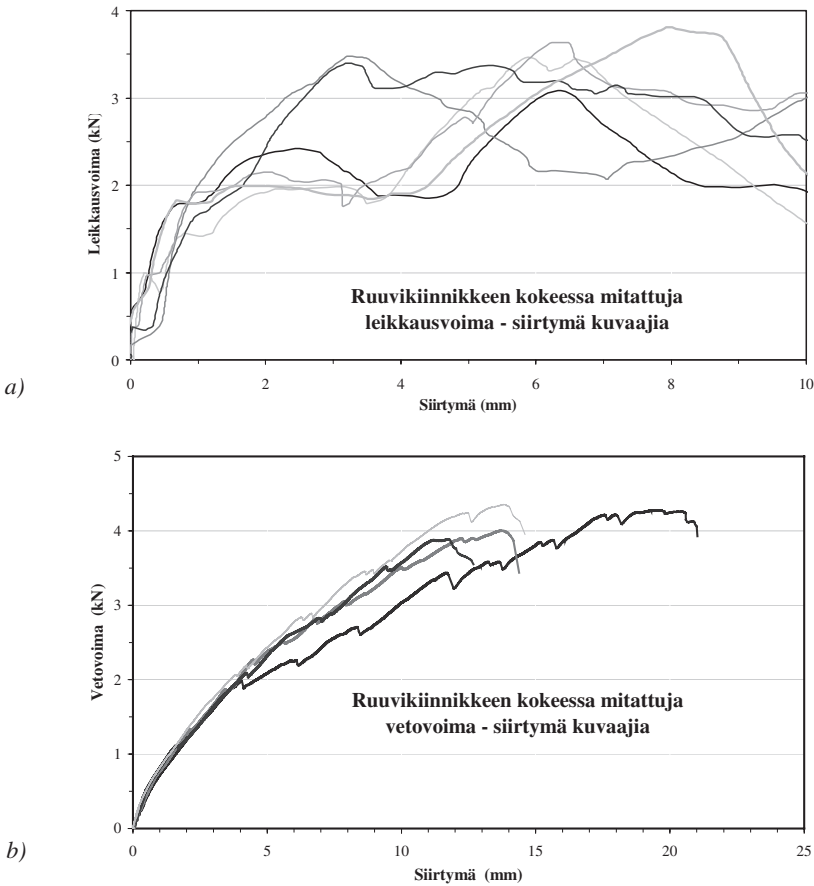
Teräksiseen runkorakenteeseen sandwich-elementtejä kiinnitetään myös vetomutterikiinnityksen avulla, jossa runkorakenteeseen hitsattuun mutteriin kierretään elementtien päittäisauman kohdasta tai elementin läpi kierretanko tai pulti. Elementin ulkopuolelle kierretangon tai pultin varaan asennetaan suora tai profiloitu aluslevy. Kooltaan tämä on tavallisesti 200 x 300 ... 600 mm ja on siten merkittävästi ruuvin tavallista aluslevyä suurempi. Aluslevy kiristetään elementin ulkopintaa vasten mutterin avulla ja mahdollisesti varmistetaan aluslevyn läpi sandwich-elementin ulkopintakerrokseen porattujen ohutlevyruuvien avulla.

Sandwich-elementtejä kiinnitetään myös piilokiinnikkeillä, jotka jäävät elementin pituussaumojen sisään näkymättömiin. Kattoelementtejä kiinnitetään niin sanotuilla lipareikiinnikkeillä, jotka kylmämuovataan elementin ulkopintakerroksen pituussaumojen konesaumauksen yhteydessä elementin pituussaumojen sisään.

Ruuvikiinnikkeet ovat tyypillisesti itseporaa- via ruuveja, jotka on valmistettu karkaistusta hiiliteräksestä tai ruostumattomasta teräksestä. Hiiliteräksestä valmistetut kiinnikkeet on suojattu korroosiota vastaan sinkkikerroksella tai pinnoitettu muilla pinnoitteilla. Ruuvikiinnikkeen tyyppi valitaan tarvittavan ruuvipituuden, käytettävän asennustekniikan ja alustarakenteen perusteella. Kiinnikkeen materiaali valitaan rakennetta ympäröivän ympäristöolosuhteen aiheuttaman rasituksen perusteella. Rakenteiden suunnittelu varten ympäristöolosuhteet on jaettu viiteen luokkaan M0 ... M4 [5]. Kiinnikkeen materiaalia valittaessa on huomattava, että sandwich-elementin sisään jäävä ruuvin varsi saattaa joutua erilaiseen rasitusluokkaan kuin elementin ulkopuolelle jäävä ruuvin kärki tai kanta.

Elementtikiinnikkeiden mitoitus

Metallisten ohutlevyrakenteiden kiinnikkeiden kestävyys veto- ja leikkausrasituksia vastaan määritetään mitoitusohjeissa, esimerkiksi B6-ohjeessa [6], eurooppalaisissa standardissa [7] tai varmennetuissa käyttöselosteissa annettujen laskentalausekkeiden tai numeroarvojen perusteella. Sandwich-elementtien kiinnikkeiden kestävyyttä ei voida arvioida näiden laskentalausekkeiden tai numeroarvojen avulla, koska kiinnityksen murtumismekanismi on toisenlainen. Sandwich-elementtien kiinnityksissä kaksi kiinnitettävää osaa eivät liitoksessa puristu tiiviisti toisiaan vasten vaan kiinnitettävien osien välissä on joustava ydinkerros. Kahden ohutlevyn liitokselle standardeissa annetut laskentalausekkeet eivät siitä syystä kuvaa luotettavalla tavalla sandwich-elementtien elementti-kiinnitysten kestävyyttä.



Kuva 3. a) Sandwich-elementin tasonsuuntainen kuorma siirtyy kiinnikkeiden leikkausrasituksena alusrakenteeseen. Kokeessa mitattu elementtiruuvien leikkausvoima-siirtymä kuvaaja osoittaa liitoksen omaavan suurta muodonmuutoskykyä. b) Tuulen imukuorman ja moniaukkoisten elementtien pintakerrosten väliset lämpötilaerot aiheuttavat elementin kiinnityksiin vetorasituksia. Vetokestävyyden määrää tavallisesti ruuvien aluslevyn ja kannan läpivetomurtuminen ulkopintakerroksen läpi. Kokeessa mitattu vetovoima – siirtymä kuvaaja osoittaa liitoksen omaavan vähäisen plastisen muodonmuutoskyvyn.

Elementtikiinnityksiin kohdistuu vetorasituksia tuulen imukuormasta ja jatkuissa moniaukkoisissa palkeissa myös lämpötilaeroista pintakerrosten välillä. Kiinnityksen vetokestävyys tarkistetaan mitoitusehdosta (1), jossa kolmen murtumistavan antamasta kestävyysarvosta valitaan pienin. Mitoitusyhtälössä (1) vasen puoli kuvaa ulkoisten kuormien aiheuttamaa kiinnityksen suunnittelurasitusta, joka muodostuu kuorman osavarmuusluvulla γ_{Fi} ja samanai-

kaisuusluvulla ψ_i kerrottujen eri kuormista aiheutuvien vetovoimien ominaisarvojen (F_{ti}) summasta. Yhtälön oikea puoli kuvaa suunnittelukestävyyttä, joka muodostuu ominaiskestävyydestä (F_{Rik}) jaettuna aineen osavarmuusluvulla γ_M .

Elementin massa sekä elementtiin kiinnitettyjen varusteiden ja laitteiden massa aiheuttavat leikkausrasituksia seinäelementtien ruuvikiinnityksiin. Vinolla kattopinnalla lumikuormasta

ja hyötykuormasta syntyy katon tason suuntaisen komponentti, joka tuottaa leikkausvoimia kattoelementtien kiinnikkeisiin. Kiinnityksen leikkauskestävyys tarkistetaan mitoitus ehdosta (2).

Koska ruuvikiinnikkeet leikkausvoima rasittaa pääosin elementin sisäpintakerrosta ja veto-voima pääosin ulkopintakerrosta, ei näiden kahden voiman vaikutus suoraan kombinoitu samaan kohtaan ja samaan murtumismekanismiin elementissä. Yhteisvaikutusta ei siten tavallisesti tarvitse ottaa huomioon.

Vetokuormitukselle voidaan kirjoittaa mitoitus ehto

$$\sum \gamma_{Fi} \psi_i F_{ti} \leq \min \begin{cases} F_{Rtk,panel} / \gamma_{M2} \\ F_{Rtk,kiinnike} / \gamma_{M2} \\ F_{Rtk,alusla} / \gamma_{M2} \end{cases} \quad (1)$$

ja vastaavasti leikkauskuormitukselle ehto

$$\sum \gamma_{Fi} \psi_i F_{vi} \leq \min \begin{cases} F_{Rvk,panel} / \gamma_{M2} \\ F_{Rvk,kiinnike} / \gamma_{M2} \\ F_{Rvk,alusla} / \gamma_{M2} \end{cases} \quad (2)$$

jossa

$F_{Rtk,panel}$, $F_{Rvk,panel}$
kokeillisesti määritetty elementtikiinnikkeen veto- ja leikkauskestävyys, joka määräytyy kiinnityksen kohtaan sandwich-elementtiin syntyvän murtumismekanismien perusteella,

$F_{Rtk,kiinnike}$, $F_{Rvk,kiinnike}$
elementtikiinnikkeen varren veto- ja leikkauskestävyys, arvot saadaan kiinnikkeiden toimittajilta

$F_{Rtk,alusla}$, $F_{Rvk,alusla}$
elementtikiinnikkeen ulosvetokestävyys ja leikkauskestävyys alusrakenteesta tai runkorakenteesta. Nämä kiinnikkeen kärjen alueen murtumisen määräävät ominaiskestävyydet saadaan kiinnikkeiden toimittajilta.

γ_{M2}
kiinnityksen aineosavarmuusluku
($\gamma_{M2} = 1.33 / [3], [4]$)

Tavanomaisilla ruuvikiinnikkeillä ja aluslevyillä varustettuun tyyppilliseen sandwich-elementin kiinnityksen kohtaan syntyvän murtumismekanismien määräämä vetokestävyyden ominaisarvo on 2–4 kN. Leikkauskestävyyden ominaisarvo on vastaavasti 1–3 kN. Tavallisesti muiden murtumismekanismien näitä arvoja suurempi. Rakennusten seinien ja kattojen elementtien kiinnitykset mitoitetaan staattiseksi kuormaksi mallinnetun tuuli- ja lumikuorman sekä

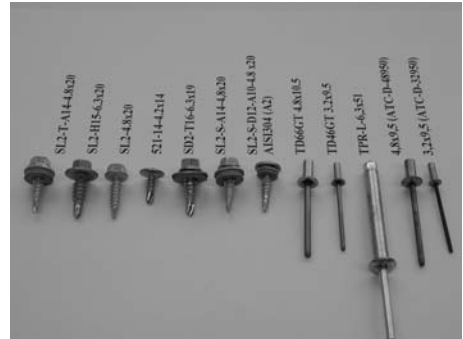
elementin ja varusteiden massojen perusteella. Käytännössä saattaa esiintyä tilanteita, jossa kuorman vaihtelu ja dynaamisuus pitää ottaa huomioon.

Kiinnityksen mitoittaminen saattaa joskus olla myös ulkonäkökysymys. Ruuvien esikierityksen aiheuttama voima ja ulkoiset kuormat aiheuttavat kiinnityksen alueelle ulkopintaan muodonmuutoksia, jotka näkyvät sopivassa valaistuksessa. Muodonmuutoksia voidaan pienentää esimerkiksi käyttämällä suurempia aluslevyjä tai niitä voidaan peittää ruuvien päälle asettavilla suojuksilla tai listoilla.

Kiinnitys yhteen pintakerrokseen

Ohutlevyruuveilla tai niiteillä ripustetaan laitteita ja varustuksia ja niillä kiinnitetään listoja ja kylttejä sandwich-elementin yhteen pintakerrokseen. Listakiinnityksissä ruuvitiheyden ja ruuvityypin määräävät liitoksen syntyvät kuormat mutta myös liitoksen ilma- tai vesitiiviyys ja ulkonäköseikat, jotka ovat yhtä lailla tärkeitä suunnittelukriteereitä. Ripustusten ja laitteiden kiinnityksissä kiinnityksen veto- ja leikkauskestävyys ovat olennaisia mitoitus- ja valintakysymyksiä. Kiinnitettävien varusteiden aiheuttamat voimat kiinnityspisteisiin on selvitettävä tarkasti. Kiinnitettävät kuormat ovat usein pieniä, mutta niin ovat yhteen pintakerrokseen tehtyjen kiinnitysten kestävydetkin.

Sandwich-elementin yhteen pintakerrokseen kiinnitetään tyyppillisesti myös verhoulevyjä. Sisäpintakerros voidaan verhoilla kipsilevyillä ja puupohjaisilla levyillä. Ulkopintaan kiinnitetään verhousrakenteita varten kevytorsia ja varsinaisia verhouselementtejä kuten muotolevyjä ja kasetteja. Verhousrakenteiden aiheuttamia voimia



Kuva 4. Erilaisilla ohutlevyruuveilla tai niiteillä kiinnitetään sandwich-elementin yhteen pintakerrokseen verhousrakenteita, varusteita ja kylttejä. Lujuusteknisten seikkojen lisäksi myös liitoksen ilma- ja vesitiiviyys vaikuttaa kiinnikkeen valintaan.

kiinnityspisteisiin on joskus vaikea arvioida. Erityisesti tämä koskee verhoursakenteen ja pintakerroksen välisen lämpötilaeron aiheuttamien voimien arvioimista.

Yhteen pintakerrokseen tehtävässä kiinnityksessä ruuviliitos tehdään yleensä liittämällä paksu aine ohueen aineeseen. Ruuviliitoksen ylikiristäminen liitosta tehtäessä muodostaa tästä syystä suuren riskin. Standardeissa annetuissa laskentamalleissa oletetaan, että liitoksessa ohuempi ainepaksuus on ruuvin kannan puolella. Koska tämä vaatimus ei sandwich-elementtien kohdalla toteudu, on yhteen pintakerrokseen tehtävien ruuvikiinnitysten lujustechniset ominaisarvot määritettävä kokeellisesti.

Kiinnikkeiden materiaalin valinnassa pitää ottaa huomioon kiinnikkeen ja liitettävien levyjen yhteensopivuus, jotta korroosio-ongelmilta kyseisessä ympäristöolosuhteessa vältytään.

Yhteen pintakerrokseen tehtyjen kiinnitysten kestävyys

Vektorasituksen alainen ohutlevyruuvi tai niitti saattaa murtua

- ruuvin kärjen tai niitin sisäosan irrotessa pintakerroksesta
- niitin varren katketessa
- sandwich-elementin pinta- ja ydinkerroksen välisen sauman murtuessa kiinnikkeen kohdalla.

Leikkausrasituksen alainen ohutlevyruuvi tai niitti voi murtua

- liitoksen ohuemman aineen leikkautuessa kiinnikkeen varren kohdalla
- kiinnikkeen varren, erityisesti niittien varren murtuessa.

Kiinnityksen kestävyuden kokeellisissa arvioinnissa, pienimmän kestävyuden antama murtumismekanismi määrää murtokuorman. Kokeen aikana saadaan havainto murtumistavasta, jonka luonteen mukaan voidaan esimerkiksi aineosavarmuusluku arvioida erikseen.

Yhteen pintakerrokseen tehtävän liitoksen veto-kestävyydelle voidaan kirjoittaa mitoitusehto

$$F_{t,Sd} \leq F_{Rtk} / \gamma_{M2} \quad (3)$$

ja vastaavasti leikkauskestävyydelle mitoitusehto

$$F_{v,Sd} \leq F_{Rvk} / \gamma_{M2} \quad (4)$$

Koska veto- ja leikkausrasitus kohdistuvat samaan kohtaan kiinnityksessä, on tutkittava myös näiden yhteisvaikutus. Yhteen pintakerrokseen tehtävän liitoksen yhteisvaikutusta voidaan arvioida esimerkiksi eurooppalaisessa standardissa [7] annetun, lineaarisella yhteydel-

lä kuvattuun yhteisvaikutukseen perustuvan mitoitusvedon (5) avulla.

$$\frac{F_{t,Sd}}{F_{Rtk} / \gamma_{M2}} + \frac{F_{v,Sd}}{F_{Rvk} / \gamma_{M2}} \leq 1 \quad (5)$$

Lausekkeissa (3), (4) ja (5)

$$F_{t,Sd} = \sum \gamma_{Fi} \psi_i F_{ti} \quad \text{ja} \quad (6)$$

$$F_{v,Sd} = \sum \gamma_{Fi} \psi_i F_{vi} \quad (7)$$

on samaan aikaan vaikuttavista ulkoisista kuormista syntyvä mitoituskuorma.

Lausekkeissa (3) – (5):

γ_{Fi} kuorman osavarmuusluku
($\gamma_{Fi} = 1.50, 1.35$ tai 1.00 [3], [4])

ψ_i kuormien samanaikaisuusluku
($\psi_i = 0.6$ tai 1.0 [3], [4])

F_{ti}, F_{vi} eri kuormien kiinnityspisteeseen aiheuttamat veto- ja leikkausvoimien ominaisarvot

F_{Rtk}, F_{Rvk} kiinnitykselle kokeellisesti määritettyjä veto- ja leikkauskestävyyden ominaisarvoja, jotka kattavat kaikki murtumismekanismit ja

γ_{M2} kiinnityksen aineosavarmuusluku
($\gamma_{M2} = 1.33$ / [3], [4])

Yhteen pintakerrokseen kiinnitettyjen ohutlevyruuvi- tai niittien kestävyysarvot riippuvat kiinnikkeestä, liitettävien levyjen lujudesta ja paksuudesta, liitoksen etäisyydestä sandwich-elementin reunoihin ja kiinnikkeiden keskinäisistä etäisyyksistä. Yksittäisen kiinnikkeen vetokestävyys on alueella $0,1\text{--}2$ kN ja leikkauskestävyys alueella $0,5\text{--}2$ kN. Tarkemmat kestävyysarvot saadaan kiinnikkeiden ja sandwich-elementtien toimittajilta.

Yhteen pintakerrokseen tehtävät kiinnitykset mitoitetaan tavallisesti staattisesti kuormitettuna liitoksina. Laitteiden ja mahdollisesti tuulen aiheuttamalle värähtelylle alttiina olevien kylttien ja ripustusten kiinnitysten yhteydessä vaihtuvan kuormituksen ja väsymisen vaikutus on syytä ottaa huomioon.

Aukkojen vaikutus kestävyteen

Pienet aukot

Sandwich-elementtiin joudutaan tekemään aukkoja ikkunoiden, ovien, ilmastointiputkien ja muiden julkisivun ja katon varustusten vuoksi. Aukot pienentävät elementtien pinta- ja ydinkerrosten pinta-alaa ja heikentävät niiden mahdollisuutta kantaa elementtiin kohdistuvat kuormat.

Aukon reunat voivat lisäksi aiheuttaa lovivaikutuksen tyyppisiä jännityskeskittymiä, jotka kasvattavat aukon vaikutuksen aukon aiheuttamaa pinta-alavähennystä suuremmaksi.

Lähdeviitteessä [9] on esitetty laskennallisten analyysien ja solumuoviytimisillä sandwich-elementeillä tehtyjen kokeiden perusteella johdetut lausekkeet ydinkerroksen leikkauskestävyyden ja pintakerroksen lommahduslujuuden muuttumisesta elementtiin tehdyn aukon seurauksena. Lausekkeet pätevät vapaasti tuetulle yksiaukkoiselle sileillä tai vain lievästi profiloituilla pintakerroksilla varustetulle elementille. Aukolliselle elementille johdettuja lausekkeitä voidaan käyttää arvioitaessa myös sellaisen sandwich-elementtien kestävyyttä, joiden yhteen pintakerrokseen on tehty lävistys.

Aukollisen elementin leikkauskestävyys arvioidaan lausekkeista (8a, 8b). Lauseke (8a) sisältää elementin leikkausjännitystarkastelun bruttopoikkileikkauksessa suurimman leikkausvoiman kohdalla. Lauseke (8b) tarkoittaa jännitystarkastelua aukon kohdalla. Molempien ehtojen on oltava voimassa.

$$\left. \begin{aligned} \tau_c &= \frac{V_{d,max}}{e_c B} \leq \frac{f_{Cv}}{\gamma_M} \\ \tau_c &= \frac{V_d(x_1)}{e_c B} \leq k_{Ch} \frac{f_{Cv}}{\gamma_M} \end{aligned} \right\} \quad (8a, 8b)$$

jossa

$$k_{Ch} = 0.9 \left(1 - \frac{b_h}{B} \right) \leq 1.0 \quad (9)$$

- $V_{d,max}$ yksiaukkoiseen sandwich-elementtiin vaikuttava suurin leikkausvoima elementin tuen vieressä
- $V_d(x_1)$ leikkausvoima aukon määrävän reunan kohdalla kohdassa x_1 , joka on tyypillisesti lähimpänä tekoa oleva aukon poikkisuuntainen reuna
- e_c elementin pintakerrosten painopisteiden välinen etäisyys
- B elementin leveys
- b_h elementtiin avatun aukon leveys
- k_{Ch} kerroin ottaa huomioon ydinkerroksen pinta-alan pienemisen lisäksi aukon alueelle syntyvien jännityshuippujen vaikutuksen. Lausekkeen kertoimet määritetään tuotohtaaisesti kokeellisesti. Tässä esitetyt kertoimet edustavat varovasta arviota ydinkerroksen leikkauskestävyydestä.

Pintakerroksen lommahduskestävyyttä pienentää sen pinta-alan vähentymisen lisäksi suora-

kaiteen muotoiseksi leikatun aukon nurkkaan syntyvä jännityshuippu ja aukon leikkauksen aiheuttamat alkuvirheet. Lauseke (10a) sisältää elementin jännitystarkastelun pintakerroksen lommahduslujuuden suhteen suurimman taiputusmomentin kohdalla. Lauseke (10b) sisältää jännitystarkastelun aukon reunan kohdalla. Jälkimmäisessä lausekkeessa on helposti laskettavaan kertoimeen k_{Fh} yhdistetty pintakerroksen pinta-alan pienemisen lisäksi aukon reunaan syntyvän jännityshuipun vaikutus ja aukon leikkauksen aiheuttamien alkuvirheiden vaikutus. Molempien lausekkeiden (10a, 10b) on luonnollisesti oltava voimassa. Jos aukko tai aukon nurkka on muodoltaan pyöreä, lauseke (10b) on turvallisella puolella.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{Fc} &= \frac{M_{d,max}}{e_c B t_F} \leq \frac{f_{Fc}}{\gamma_M} \\ \sigma_{Fc} &= \frac{M_d(x_2)}{e_c B t_F} \leq k_{Fh} \frac{f_{Fc}}{\gamma_M} \end{aligned} \right\} \quad (10a, 10b)$$

jossa

$$k_{Fh} = 1 - 2 \left(\frac{b_h}{B} \right) + 1.33 \left(\frac{b_h}{B} \right)^2 \leq 1.0, \quad (11)$$

jossa $0 \leq b_h/B \leq 0,6$

- $M_{d,max}$ yksiaukkoisen sandwich-elementin suurin taiputusmomentin suunnittelu-arvo
- $M_d(x_2)$ taiputusmomentin suunnittelu-arvo aukon määrävässä reunassa kohdassa x_2 , joka on tavallisesti lähimpänä jännemitan keskipeitettä oleva aukon poikkisuuntainen reuna
- t_F puristetun pintakerroksen teräsytimen paksuus
- k_{Fh} lommahduslujuuden pienemistä kuvaava parametri. Esitetty parametrin lauseke perustuu rajallisella koekappalemäärällä tehtyyn kokeelliseen tutkimukseen [9]. Lausekkeen pätevyys pitää varmistaa tuotohtaaisesti.

Lausekkeiden (8) – (11) käytön ehtoina on aukon leveyden rajoitus $b_h/B \leq 0,6$. Aukon etäisyys elementin pituussuuntaiseen reunaviivaan pitää olla vähintään 200 mm, jos kysymyksessä on elementtikentän reunimmainen elementti. Elementtikentän on lisäksi oltava homogeeninen, ts. kaikilla kentän elementeillä on oltava sama paksuus, sama pintakerrosten paksuus, sama ydinkerros ja sama staattinen systeemi. Jos nämä ehdot eivät ole voimassa, aukko on luoki-

teltava suureksi aukoksi, jonka lujuusteknistä tarkastelua on esitelty jäljempänä.

Elementin tukireaktiokestävyys määritetään samaan tapaan kuin ilman aukkoja olevan elementin tukireaktiokestävyys [1]. Aukot pienentävät sandwich-elementin taiputus- ja leikkausjäykkyyttä [9].

Aukon tekeminen sandwich-elementtiin edellyttää aina suurta huolellisuutta. Aukon reunaan päätyvän pintakerroksen on säilyttävä geometrisesti ehdottoman suorana eikä aukon leikkaus saa vahingoittaa ydinkerrosta ja ydin- ja pintakerroksen välistä saamaa. Pintakerroksia aukon reunassa ei saa yllielekata ohi aukon reunaviivan.

Esimerkki aukollisen sandwich-elementin kuormankantokyvyn arvioimisesta

Tarkastellaan yksiaukkoista seinäelementtiä, jonka jännemitta on 5,94 m (kuva 5) Kehäväli on 6 m. Elementin paksuus on 150 mm. Symmetrisen elementin pintakerrosten nimelliset paksuudet ovat 0,6 mm ja laskentapaksuudet 0,53 mm. Pintakerroksen lommahduslujuus on 150 N/mm². Ydinkerroksen puristus- ja leikkauslujuudet ovat 0,10 ja 0,08 N/mm².

Elementtiä kuormittaa tasaisesti jakautunut painekuorma 0,9 kN/m². Kuorman osavarmuusluku on 1,5 ja pintakerroksen puristumurtumista ja ydinkerroksen puristus- ja leikkausmurtumista koskeva aineosavarmuusluku 1,25.

Ohjan elementin jännitystarkastelu ydinkerroksen leikkauslujuuden sekä pinta- ja ydinkerroksen puristuslujuuden suhteen.

$$\tau_c = \frac{V_{d,max}}{e_c B} = \frac{\gamma_F B q L}{2 e_c B} = \frac{1,5 \cdot 1200 \cdot 0,0009 \cdot 5940}{2 \cdot 149,4 \cdot 1200} =$$

$$0,027 \frac{N}{mm^2} < \frac{f_{cv}}{\gamma_M} = 0,064 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{Fc} = \frac{M_{d,max}}{e_c B t_{F1}} = \frac{\gamma_F B q L^2}{8 e_c B t_{F1}} = \frac{1,5 \cdot 1200 \cdot 0,0009 \cdot 5940^2}{8 \cdot 149,4 \cdot 1200 \cdot 0,53} =$$

$$75,2 \frac{N}{mm^2} < \frac{f_{Fc}}{\gamma_M} = 120 \frac{N}{mm^2}$$

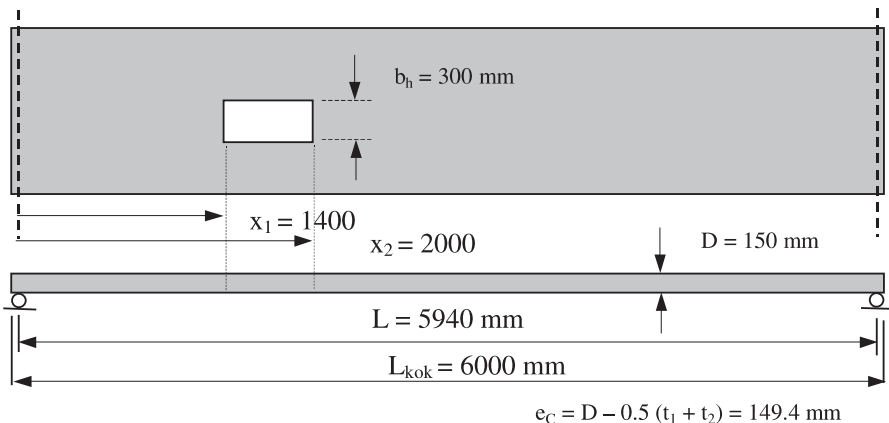
$$\sigma_{cc} = \frac{F_{d,max}}{(L_s + k \cdot \min(100, e_c)) B} = \frac{\gamma_F B q L_{kok}}{2(L_s + k \cdot \min(100, e_c)) B} =$$

$$\frac{1,5 \cdot 1200 \cdot 0,0009 \cdot 6000}{2(40 + 0,5 \cdot 100) 1200} =$$

$$0,045 \frac{N}{mm^2} < \frac{f_{cc}}{\gamma_M} = 0,08 \frac{N}{mm^2}$$

Aukollisen elementin jännitystarkastelu ydinkerroksen leikkauslujuuden ja pintakerroksen puristuslujuuden suhteen.

$$k_{ch} = 0,9 \left(1 - \frac{b_h}{B} \right) = 0,9 \left(1 - \frac{300}{1200} \right) = 0,675$$



Kuva 5. Esimerkkirakenne seinäelementtiin avatun aukon vaikutuksen arvioimisesta elementin kestävyteen.

$$k_{Fh} = 1 - 2 \left(\frac{b_h}{B} \right) + 1.33 \left(\frac{b_h}{B} \right)^2 = 1 - 2 \left(\frac{300}{1200} \right) + 1.33 \left(\frac{300}{1200} \right)^2 = 0.583$$

$$\tau_{c,aukko} = \frac{\gamma_F B q L}{2} \frac{1 - 2 \frac{x_1}{L}}{e_c B} = \frac{1.5 \cdot 1200 \cdot 0.0009 \cdot 5940}{2} \frac{1 - 2 \frac{1400}{5940}}{149.4 \cdot 1200} =$$

$$0.014 \frac{N}{mm^2} < k_{Ch} \frac{f_{Cv}}{\gamma_M} = 0.675 \frac{0.08}{1.25} = 0.043 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{Fc,aukko} = \frac{\gamma_F B q L^2}{2} \frac{\left(\frac{x_2}{L} \right) - \left(\frac{x_2}{L} \right)^2}{e_c B t_{F1}} = \frac{1.5 \cdot 1200 \cdot 0.0009 \cdot 5940^2}{2} \frac{\left(\frac{2000}{5940} \right) - \left(\frac{2000}{5940} \right)^2}{149.4 \cdot 1200 \cdot 0.53} =$$

$$67.2 \frac{N}{mm^2} < k_{Fh} \frac{f_{Fc}}{\gamma_M} = 0.583 \frac{150}{1.25} = 70.0 \frac{N}{mm^2}$$

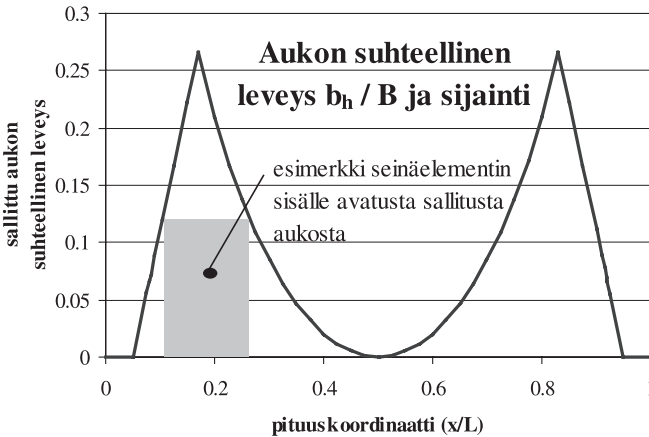
Havaitaan, että esimerkissä kooltaan, $l_h \times b_h = 600 \times 300$ mm, olevan aukon vaikutuksesta elementin taivutuskestävyyteen suoraan vaikuttava pintakerroksen puristuslujuus pieniä 0,58-kertaiseksi ja elementin leikkauskestävyys 0,68-kertaiseksi.

Aukot ilman laskelmia

Sandwich-elementin tiettyihin kohtiin voidaan tehdä määrätyn suuruisia aukkoja ilman, että elementin kantokyky elementtiin kohdistuvia kuormia vastaan vaarantuu. Aukkoja voidaan tehdä kohtiin, jossa leikkauskestävyyden ja lommahduslujuuden hyväksikäyttösuhde on alhainen.

Esimerkkinä tässä artikkelissa on tarkasteltu tasaisen pintakuorman kuormittamaa yksiaukkoista sandwich-elementtiä. Asettamalla aukollisen elementin ydinkerroksen leikkausjännitystaso leikkauslujuuden hyväksikäytön kannalta samansuuruisiksi koko jännemitan alueella, saadaan mitoitusohjeiden (8a) ja (8b) avulla ehto aukon maksimileveydelle. Ydinkerroksen leikkausjännitykselle elementin ehjässä poikkileikkauksessa tuen keskiviivalla voidaan kirjoittaa

$$\tau_c = \frac{V_{max}}{e_c B} = \frac{qL}{2e_c B} \tag{12}$$



Kuva 6. Tasaisesti yli jännemitan jakautuneella kuormalla kuormitettuun seinäelementtiin voidaan tehdä pieniä aukkoja niille alueille, joissa elementin leikkaus- ja taivutuskestävyyden hyväksikäytöstä ei ole täysin hyödynnetty. Jos elementtiin avattu aukko mahtuu kokonaisuudessaan kuvassa esitetyn kuvaajan ja x-akselin rajaamalle alueelle, ei muita aukon vaikutusta selvittäviä laskelmia tarvitsi tehdä. Pystyakseli kuvaa aukon leveyttä suhteessa elementin leveyteen ja vaak-akseli (x/L) aukon sijaintia elementin pituussuunnassa.

ja vastaavasti aukon määräävässä kohdassa

$$\tau_{C,aukko} = \frac{V(x)}{k_{ch} e_c B} = \frac{qL(1-2x/L)}{2k_{ch} e_c B} \quad (13)$$

jossa x on aukon reunan etäisyys tuen keskiviivasta. Asettamalla ehto $\tau_C \geq \tau_{C,aukko}$ saadaan leikkauksen hyväksikäyttösuhteen määräämä mitoitusehto aukon suurimmalle leveydelle etäisyyden x funktiona

$$\frac{b_h}{B} \leq 1 + \frac{1}{0.9} \left(\frac{2x}{L} - 1 \right) \quad (14)$$

Asettamalla aukollisen elementin pintakerroksen puristusjännitystasoa puristuslujuuden hyväksikäyttösuhteella mitattuna samansuuruiseksi koko jännemitan alueella, saadaan mitoitusehto (10a) ja (10b) avulla toinen ehto aukon leveydelle. Pintakerroksen puristusjännitykselle elementin ehjässä poikkileikkauksessa jännemitan puolivälissä voidaan kirjoittaa

$$\sigma_{Fc} = \frac{M_{\max}}{e_c B t_F} = \frac{qL^2}{8e_c B t_F} \quad (15)$$

ja vastaavasti aukon reunan kohdalla

$$\sigma_{Fc,aukko} = \frac{M(x)}{k_{Fh} e_c B t_F} = \frac{qL^2 \left((x/L) - (x/L)^2 \right)}{2k_{Fh} e_c B t_F} \quad (16)$$

Asettamalla ehto $\sigma_{Fc} \geq \sigma_{Fc,aukko}$ saadaan puristuslujuuden hyväksikäyttösuhteen määräämä mitoitusehto aukon suurimmalle leveydelle etäisyyden x funktiona

$$\frac{b_h}{B} \leq 0.752 - \sqrt{3.01 \left(\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right) - 0.187} \quad (17)$$

Lausekkeiden (14) ja (17) rajaama aukon kooka ja sijaintia on havainnollistettu kuvassa 6.

Suuret aukot

Suuret aukot heikentävät sandwich-elementtiä niin paljon, että elementin nettopoikkileikkaus ei ole enää riittävä takaamaan elementin kuormankantokykyä. Aukko luokitellaan suureksi, jos

- aukon leveys on suurempi kuin 60 % elementin leveydestä ts. $b_h/B > 0.6$,

- lausekkeiden (8) – (11) perusteella elementin ydinkerroksen leikkaukskestävyys tai pintakerroksen puristuslujuus ylittävät
 - kentän reunimmaisen elementin aukon etäisyys elementin pituussuuntaiseen reunaviivaan on vähemmän kuin 200 mm.
- Suuren aukon sisältävän elementin kuorma on kokonaisuudessaan tuettava apurungon varaan tai kuorma on elementin pituussuuntaisten saumojen kautta siirrettävä naapurielementeille. Koska aukollisen elementin kuorma siirtyy naapurielementin pituussuuntaiseen saumaan epäkeskisesti elementin keskiviivaan nähden, aiheuttaa aukollisesta elementistä tuleva lisäkuorma naapurielementtiin vääntörasituksia. Suunnitteluyön helpottamiseksi sandwich-elementtien valmistajat ovat laatineet taulukoita, joista löytyy eri tapauksille kuorman siirtokertoimia aukollisesta elementistä naapurielementeille siirtyvän kuorman määrittämiseksi. Naapurielementtien jännitys- ja siirtymätarkastelu on tehtävä aukollisesta elementistä siirtyvillä rasituksilla korotetuille kuormille.

KIRJALLISUUSLUETTELO

- [1] Hassinen, Paavo, Metalliohutlevy sandwich-elementtien suunnittelu. Rakentajain kalenteri 2003, ss. 484-507.
- [2] Cen/TC 128/SC11, Self-supporting double skin metal faced insulating panels – Factory made products – Specifications. prEN 14509. N208 (7.7.2004).
- [3] European Recommendations for Sandwich Panels. Part I: Design. CIB/ECCS Report Publication No 257. 2000.
- [4] European Recommendations for Sandwich Panels. Part I: Design. ECCS Publication No 115. 2001.
- [5] SFS 4596 Metallien korroosio. Ympäristöolosuhteiden luokitus. 1980.
- [6] Ympäristöministeriö, Suomen Rakentamismääräyskokoelma, Osa B6 Teräsohutlevyrakenteet. 1989.
- [7] EN 1993-1-3: 2004. Eurocode 3, Design of Steel Structures: Part 1-3: General rules, Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. (Draft 23 April 2004).
- [8] Lightweight Sandwich Construction (Ed. J.M. Davies). Blackwell Science Ltd. 2001.
- [9] Courage, W.M.G & Tomà, A.W., Structural detailing of openings in sandwich panels. European Commission. Final report EUR 18459. 1998.