

## 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](https://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 julkaistuja artikkeleita](#)

# Metalliohutlevys sandwich-elementtien suunnittelu

*Paavo Hassinen  
paavo.hassinen@hut.fi*

## 1 Tuotteet ja käyttökohteet

Metalliohutlevypintaiset sandwich-elementit koostuvat tyypillisesti kolmesta kerroksesta; kahdesta pintakerroksesta ja ydinkerroksesta. Pintakerrokset kiinnitetään ydinkerrokseen liimaamalla tai ydinkerros kiinnittyy pintakerrokseen valmistusprosessin aikana. Pintakerrokset voivat olla sileitä tai vain lievästi profiloituja, jolloin ne muodostavat kalvomaisen pintakerroksen ja rakenteena ottavat vastaan vain veto- ja puristusjännityksiä. Pintakerrokset voivat olla myös voimakkaasti profiloituja, muotolevyn tyyppisiä rakenneosia, jolloin pintakerrosten omalla taiputusjäykkyydellä ja taiputuskestävyydellä on merkitystä sandwich-elementin teknisen toiminnan kannalta.

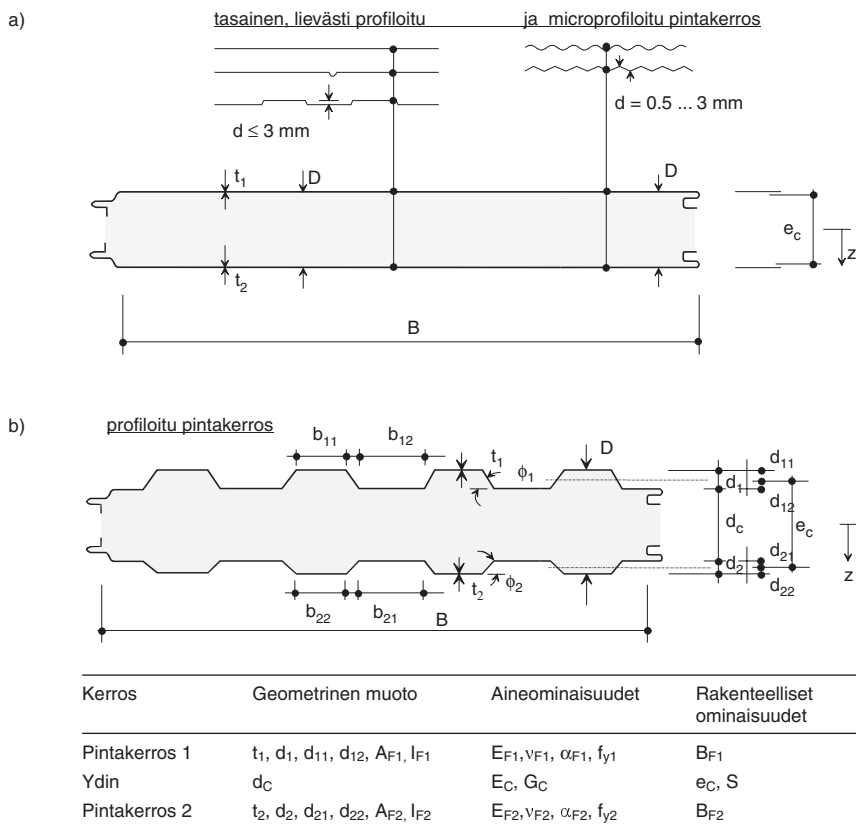
Yleisin pintakerrosmateriaali on paksuudeltaan 0,5–0,8 mm oleva kylmävalssattu teräsohutlevy, joka on suojattu sinkkipinnoitteella. Levyn sisäpinta on lisäksi suojattu pohja- ja taustamaalilla ja ulkopinta maalipinnoitteella. Teräspintakerrokset valmistetaan nykyään lähes aina rakenneteräksestä, jonka eri lajien mörtörajat ovat välillä 220–550 N/mm<sup>2</sup> /SFS-EN 10147, SFS-EN 10214, SFS-EN 10215/. Levyn metallinen korroosiopinnoite voi olla sinkkiä tai koostua sinkki-alumiiniseoksesta.

Sandwich-elementtien pintakerroksina käytetään myös ruostumatonta teräsohutlevyä sekä alumiiniohutlevyä, jotka levyt korroosiotekniseltä kannalta eivät tarvitse pinnoitteita /SFS-EN 10088-2, SFS-EN 485-2/. Myös kupariohutlevyistä on valmistettu sandwich-elementtien pintakerroksia /SFS-EN 1172/. Metalliohutlevyjen ohella ja rinnalla pintakerroksina käytetään puupohjaisia levyjä kuten vaneria ja lastulevyä. Lastu- ja kipsilevyjä on käytetty myös neljäntenä ja viidentenä pintakerroksena metalliohutlevyn ja ydinkerroksen välissä suojaamassa solumuovia olevaa ydinkerrosta tulipalotilanteessa. Myös ohuita kuitubetonilevyjä on kehitetty sandwich-elementtien pintakerroksiksi. Asuinrakennuksissa tyypillisten paksukuoristen sandwich-elementtien betonikuoret on kiinnitetty toisiinsa ydinkerroksen läpi ansarakenteilla. Näille elementeille jäljempänä esitetyt

laskentakaavat eivät rakenteen erilaisen toimintatavan vuoksi kaikin osin sovellu.

Rakennusteollisuudessa kevyiden sandwich-elementtien ydinkerroksina käytetään umpisoluisia solumuoveja, joista tunnetuimmat ovat solupolyuretaani (PU) ja solupolystyreeni (EPS). Polyuretaani on maailmalla yleisimmin käytetty ydinkerrosmateriaali, johtuen sen soveltuvuudesta pitkälle kehittyneeseen automaattiseen valmistusprosessiin, jossa PU-vaahdot ruiskutetaan valmiiksi profiloitujen pintakerrosten väliin. Paisuessaan vaahdot täyttävät pintakerrosten välisen tilan ja kiinnittyy liiman lailla kiinni pintakerroksiin. Valmistustekniikan vuoksi PU-tytimisten elementtien pintakerrokset voidaan varsin vapaasti muotoilla, ne voivat olla sileitä, lievästi tai hyvinkin voimakkaasti profiloituja. PU-solumuovien tiheys ja mekaaniset ominaisuudet vaihtelevat elementin paksuussuunnassa. PU-solumuoviin on lievästi ei-isotrooppinen. EPS-ydinkerrokset valmistetaan tavallisimmin leikkaamalla ne paisutetuista EPS-blokeista oikeaan muotoon ja mittoihin ja liimaamalla pintakerrokset kiinni valmiiseen ydinkerrokseen. EPS-ydinkerroksia voidaan aineominaisuuksiltaan pitää isotrooppisina. EPS-solumuovien samoin kuin nykyään myös PU-solumuovien valmistuksessa käytettävät ponnekaasut ovat freonittomia, siten eivät ole haitallisia ilmakehän otsonikerrokselle. Muita lähinnä laiva- ja kuljetusvälineiteollisuudesta tunnettuja ydinkerros-materiaaleja ovat suulakepuristettu solupolystyreeni (XPS) ja PVC-solumuovi, jotka molemmat kiinnitetään liimaamalla pintakerroksiin. Uusi kehitysvaiheessa oleva rakennustuotteiden ydinkerrosmateriaali on fenolisolumuovi (PF), joka kiinnitetään liimaamalla pintakerroksiin.

Rakennusteollisuudessa nykyisin tunnetut villaydinkerrokset valmistetaan ns. rakenteellisesta villasta, jossa villan kuitusuunta on käänetty kahden toisiinsa vastaan kohtisuoran akselin ympäri 90°. Optimoidun kuitusuunnan avulla sandwich-palkkeina toimivien elementtien leikkajäykkyys ja -kestävyys on saatu kasvatettua ratkaisevasti suuremmaksi verrattuna elementtiin, jossa tavanomaisen eristevillalevyn pintoihin on liimattu pintakerrokset. Valmistustavasta



Kuva 1. Sandwich-elementtien poikkileikkaukset ja merkinnät, a) ohutkuorinen ja b) paksukuorinen sandwich-palkki. Liimaamalla valmistettuja elementtejä kuten EPS- ja villaytimisiä elementtejä voidaan tyypillisesti tarkastella ohutkuorina elementteinä. Monet PU-ytimiset elementit on varustettu voimakkaasti profiloituilla pintakerroksilla ja ne on mitoitettava paksukuoristen sandwich-palkkien teoriaa käyttäen.

johtuen rakenteelliset villaydinkerrokset ovat voimakkaasti suuntautuneita. Sandwich-elementin ominaisuuksien riippuvuus villaydinkerroksen kuormitus suunnasta on otettava huomioon, jos elementtien laattavaikutusta käytetään hyväksi. Villa-elementeille ilmoitettujen mekaanisten ominaisuuksien arvot pätevät tavallisesti silloin, kun elementtiä tarkastellaan kahden tai useamman tuen päällä olevana sandwich-palkkina. Pienestä sideainemäärästä johtuen mineraalivilloja voidaan käytännössä pitää palamatomina aineina, josta syystä villaytimiset elementit ovat laajentaneet sandwich-elementtien käyttöaluetta kohteisiin, mm. osastoiviin seinäin ja kattoihin, joille asetetaan korkeita palonkestävyysvaatimuksia. Tunnetuin ja yleisin villa-

ydinkerrosmateriaali on kivivilla, joka kuidutetaan korkeassa lämpötilassa luonnon kivistä. Viime vuosina markkinoille on tullut myös lasivillaa olevalla ydinkerroksella varustettuja elementtejä. Lasin pääraaka-aineet ovat kvartsihiekkä, sooda ja kalkki. Lasivillassa on mukana myös kierrätyslasiä.

Tulipalotilanteen varalta verhoaville sandwich-elementeille asetetaan tavallisesti vaatimuksia osastoivuutta kuvaavan E-luokituksen sekä eristävyyttä kuvaavan I-luokituksen avulla. Kivivillaytimisillä elementeillä voidaan päästä jopa korkeimpaan osastoivan seinän paloluokkaan EI240. Rakenteen kestävyyttä tulipalossa kuvataan R-luokituksella. Ohutkuorinen sandwich-elementti menettää kuormankan-



a)



b)

Kuva 2. Sandwich-elementeillä voidaan verhoilla monimutkaisia ja moni-ilmeisiä julkisivuja, a) urheiluhallin ja b) näköalatornin julkisivu.

tokykinsä toisen pintakerroksen irrotessa tai myötäessä tulipalossa. Kuormankantokykyä voidaan kasvattaa kytkemällä peräkkäisten elementtien pintakerrokset toisiinsa ja rakenteen päässä tukirakenteisiin siten, että yksi pintakerros voi muodostaa jännitetyn köyden ja kantaa elementin omapainon köysivaikutuksen avulla. Sandwich-elementin profiloitu pintakerros tai tasaiseen pintakerrokseen kiinnitetty muotolevy voivat myös kantaa elementin omapainon palkkirakenteen tavoin tulipalotilanteessa.

Lisää tietoa sandwich-elementtien pinta- ja ydinkerrosmateriaalien ominaisuuksista löytyy mm. kirjasta /Lightweight sandwich construction 2001/.

Sandwich-elementeillä saadaan aikaan samalla kertaa lämpöä eristävä, tiivis ja kantava verhouks rakenne. Massaltaan kevyiden sandwich-elementtien asennustyö on kehittyneiden pontti- ja kiinnitysjärjestelmien ansioista selkeää ja suoraviivaista. Asennustyössä pitää kuitenkin ottaa huomioon elementin ja sen ohuiden pintakerrosten vaurioitumisherkkyys. Sandwich-elementtien käyttökohteita ovat olleet erityisesti varasto-, teollisuus- ja toimistorakennusten mutta myös asuinrakennusten ulkoseinät. Elementtejä käytetään paljon myös rakennusten kattojen verhoamiseen. Villa-ytimisiä sandwich-elementtejä käytetään nykyään osastoivina sisäseininä. Laajeneva käyttöalue ovat teollisuusrakennusten sisäkatot.

Elementtejä käytetään tavallisesti vain verhoavina rakennusosina, jolloin niihin kohdistuu

oman massan aiheuttaman kuorman lisäksi ilmanpaine-eroista ja lumen massasta aiheutuvia kuormia. Koska sandwich-elementin ydinkerros on myös erinomainen lämmöneriste, muodostuu rakennuksen ulkokuoren verhouksena toimivien elementtien ulko- ja sisäpintakerrosten välille suuri lämpötilaero. Tämä lämpötilaero aiheuttaa elementtiin taipumia ja staattisesti jatkuviin moniaukkokoisiin elementteihin myös tukireaktioita, leikkausvoimia ja taivutusmomentteja, jotka yleensä ovat merkittäviä elementin toiminnan ja kestävyyskannalta. Lämpötilan vaihteluista aiheutuvat taipumat ja jännitykset ovat sandwich-elementtien erityispiirre, joka on huomioitava suunnittelussa ja mitoituksessa.

Tavanomaisten, kolmesta kerroksesta muodostuvien sandwich-elementtien ohella markkinoille on kehitetty sekarakenteita, joissa pintakerrosten väliin on asennettu puusoiro tai metalliorsi jäykistämään ja vahvistamaan elementtiä ja sen saumoja ja ottamaan vastaan aksiaalisia kuormia tai elementin tasossa vaikuttavia leikkauskuormia. Näille erikoistuotteille voidaan soveltaa jäljempänä esitettyjä mitoitusääntöjä. Sandwich-levyjen ja laattojen rakenteellista toimintaa ja mitoitusta on jossakin määrin kuvattu kirjallisuussiviteissä /Stamm & Witte 1974, Zenkert 1995/.

Suomessa valmistettiin teollisia menetelmiä käyttäen ensimmäiset sandwich-elementit v. 1967. 60- ja 70-luvulla tuotetut elementit olivat raken-

nusten seinien ja kattojen verhoamiseen tarkoitettuja PU- ja EPS-ytimisiä elementtejä. 80-luvulla aloitettiin kivivillaytimisten sandwich-elementtien valmistus, jotka tuotteet ovat laajentaneet sandwich-elementtien käyttöaluetta. Käyttökokemukset teknisestä toiminnasta ja ominaisuuksien säilymisestä ovat pääsääntöisin olleet positiivisia. Havaitut ongelmat ovat tavallisesti liittyneet pinta- ja ydinkerroksen väliseen liitokseen ja rajapintaan joko materiaalien yhteensopimattomuuden tai valmistusteknisten puutteiden vuoksi. Tietous sandwich-tuotteiden vaativista käyttöolosuhteista, käyttöikävaatimukset ja kattava sandwich-tuotteiden alkutestaus ja tehokas jatkuva tuotannon laadunvalvonta ovat vähentäneet, mahdollisesti jopa poistaneet laatuun liittyvät ongelmat käytännössä.

## 2 Ohjeet ja standardit

Sandwich-elementeille on luotu yhtenäisiä suunnitteluperusteita eurooppalaisen yhteistyön puitteissa 80-luvulta lähtien. ECCS- ja CIB-järjestöjen työryhmissä on 80- ja 90-luvuilla kirjoitettu suunnitteluohjesuosituksia, joita sovelletaan varsin yleisesti eri maissa, myös Suomessa. ECCS julkaisi ensimmäiset kevyitä metalliohutlevypintaisia sandwich-elementtejä koskevat suunnitteluohjeet vuosina 1990 (Good practice) ja 1991 (Design). Jälkimmäinen ohje päivitettiin CIB W56 työryhmän toimesta v. 1993 kattamaan myös villaytimiset sandwich-elementit. Tämä ohje (Design) kirjoitettiin CIB- ja ECCS-järjestöjen työryhmien yhteistyönä 90-luvun lopussa uudelleen, jonka työn tuloksia ovat vuonna 2000 julkaistu 'CIB Report- Publication 257' ja v. 2001 julkaistu 'ECCS Report 115', jotka ovat identtisiä julkaisuja ja joiden niminä on 'European recommendations for sandwich panels- Part 1: Design' (Taulukko 1). Nämä ohjeet toimivat sandwich-elementtien eurooppalaisen tuotestandardin tausta-asiakirjana. Seuraavassa luvussa esitetyt sandwich-element-

tien mitoitusäännöt ovat edellä mainittujen uusimpien suunnittelusuositusten mukaisia.

Eurooppalaisen standardointielimen CENin puitteissa aloitettiin vuonna 1996 harmonisoidun EN-tuotestandardin laatiminen metalliohutlevypintaisille sandwich-elementeille. Valmistukseen tuotestandardi mahdollistaa teollisesti valmistettujen sandwich-elementtien CE-merkin. Keväällä 2002 julkaistiin standardin prEN 14509 versio 'Self-supporting double skin metal faced insulating sandwich panels - Factory made products - Specification, March 2002'. Lopullisesti standardin odotetaan valmistuvan vuonna 2003.

Harmonisointu tuotestandardi sisältää olennaisiksi katsotut vaatimukset materiaaleille ja valmiille elementille, joiksi on katsottu mekaaninen kestävyys, mittavaihtelut, lämmöneristävyys, pitkäaikaiskestävyys, palokäyttäytyminen ja palonkestävyys, vesi-, ilma- ja veshöyrytiiviys ja ääneneristävyys. Standardi esittelee vaatimusten täyttymisen todentamiseen tarkoitettut kokeelliset ja laskennalliset menetelmät. Myös elementeiltä edellytetty laadunvalvonta on määritelty standardissa. Lisäksi mukaan on otettu normatiivisena liitteenä myös suunnitteluperusteita koskeva osa, joka on CIB/ECCS-ohjeen mukainen ja jossa on esitetty vaadittavat varmuusluvut.

CEN-tyon ulkopuolelle jäävät kaikki muut kuin metallipintaiset elementit. Eurooppalainen EOTA-järjestö on laatimassa näille ETAG-ohjeita (taulukko 1). ETAG-ohjeissa annetaan suuntaaviivat, joiden perusteella nimetyt laitteet (Suomessa VTT) voivat antaa tuotteelle ETA-hyväksynnän, joka edelleen mahdollistaa tuotteen CE-merkinnän. EOTA-järjestön ETAG-ohjeen ensimmäinen, yleisiä periaatteita koskeva osa on jo hyväksytty ja seuraavat, kattojen ja seinien elementtejä koskevat osat ovat tätä kirjoitettaessa (kesäkuu 2002) valmistumassa. Osia ilmestyyne kaikkiaan viisi. ETAG sisältää osin samoja kokeita ja koejärjestelyitä kuin tuleva EN-standardi.

Taulukko 1. Sandwich-elementtejä koskevat ohjeet ja standardit.

|                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CIB/ECCS 2000, Publication 257<br>ECCS 2001, Publication No. 115<br>European Recommendations for sandwich panels | valmistusta, suunnittelua ja käyttöä koskeva yleiseurooppalainen suositus, joka korvaa v. 1991 ja v. 1993 ilmestyneet ECCS- ja CIB-suositukset                                    |
| European standard prEN 14509<br>Self-supporting double skin metal faced insulating sandwich panels               | valmisteilla oleva eurooppalainen harmonisointu tuotestandardi, jonka perusteella metalliohutlevypintaisille sandwich-elementeille voidaan myöntää CE-merkki                      |
| ETAG guidelines, Self-supporting composite lightweight panels, Parts 1, 2, 3, 4 and 5                            | valmisteilla olevat ETAG-ohjeet, joiden perusteella harmonisoidun EN-standardin ulkopuolelle jääville sandwich-elementeille voidaan myöntää CE-merkki ETA-hyväksynnän perusteella |

### 3 Materiaalien ominaisuuksia

Rakenteiden suunnittelussa ja mitoituksessa käytetään yleensä tuote- ja ainestandardeissa annettuja mittoja ja ainevakioita. Metallisten pintakerrosten fysikaalisista ominaisuuksista löytyy kirjallisuudesta runsaasti yleistä tietoa ja myös standardeissa kuvattua suunnittelutietoa (taulukko 2). Metallisten ohutlevyjen paksuussille käytetään rakennelaskelmissa nimellispaksuudesta ja paksuustoleranssista riippuvaa laskentapaksuutta, joka määritetään lausekkeesta /prEN 14509/

$$t_d = t_{nom} - t_{zinc} - \frac{1}{2}t_{tol} \quad (1)$$

missä  $t_{nom}$  on ohutlevyn nimellinen paksuus,  $t_{zinc}$  molempien pintojen sinkkipinnoitteen yhteenlaskettu paksuus ja  $t_{tol}$  paksuuden normaali toleranssi tai erityistoleranssi. Ruostumattomien ja alumiiniohutlevyjen laskentapaksuutta määritettäessä sinkkipinnoitteen paksuutta ei ole lau-

sekkeessa mukana. Normaali- tai erityistoleranssin käyttö riippuu levyn toimituksesta (taulukko 3). Kotimaisille teräsohutlevylajeille voidaan laskennassa käyttää ns. taattuja laskentapaksuuksia /Rautaruukki 2000/.

Ydinkerroksena käytettyjen solumuovien ja konstruktivisten mineraalivillojen mekaanisille ominaisuuksille ei löydy standardoituja arvoja, vaan suunnittelussa on nojaututtava kyseisen tuotteen valmistajan ilmoittamiin ydinkerroksen lujuuksien ja kimmokertoimien keskiarvoihin ja ominaisarvoihin. Taulukossa 4 on ohje- ja suuruusluokka-arvoiksi esitetty tyypillisiä lujuuksien ja kimmovakioiden lyhytaikaisia arvoja. Solumuovit ovat luonteeltaan viskoelastisia aineita, joiden muodonmuutoksiin kuormitusajalla on merkittävä vaikutus. Viskoelastisten aineiden virumismallien sijasta käytännön suunnittelutyössä käytetään solumuoveille menettelyä, jossa lyhytaikaista kimmovakiota pienennetään kuormitusajasta riippuvalla virumisluvulla /CIB 2000/ (taulukko 4).

$$G_c(t) = G_c / (1 + \phi(t)) \quad (2)$$

Taulukko 2. Pintakerrosten mekaanisten ominaisuuksien arvoja.

|                                             | teräsohutlevy                  | ruostumaton teräsohutlevy | alumiiniohutlevy             |
|---------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| tiheys, kg/m <sup>3</sup>                   | 7850                           | 7900                      | 2700                         |
| lämpölaajenemiskerroin, 1/°C                | 0.000012                       | 0.000016                  | 0.000023                     |
| kimmokerroin, N/mm <sup>2</sup>             | 210000                         | 200000                    | 70000                        |
| Poissonin vakio                             | 0.3                            | 0.3                       | 0.3                          |
| myötöraja tai 0.2 %-raja, N/mm <sup>2</sup> | 220 ... 550                    | > 200                     | 165 ... 200                  |
| murtoraja, N/mm <sup>2</sup>                | 300 ... 560                    | > 500                     | 185 ... 220                  |
| nominaalisia paksuuksia, mm                 | 0.5, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8 | 0.5, 0.6, 0.7, 0.8        | 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 |

Taulukko 3. Metallisten ohutlevyjen paksuustoleransseja.

| materiaali                | standardi    | paksuus                                                    | normaali toleranssi | erityistoleranssi |
|---------------------------|--------------|------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------|
| teräsohutlevy             | SFS-EN 10143 | 0.4 < t ≤ 0.6 <sup>1)</sup><br>0.6 < t ≤ 0.8 <sup>1)</sup> | ±0.08<br>±0.09      | ±0.06<br>±0.07    |
| ruostumaton teräsohutlevy | SFS-EN 10259 | 0.5 ≤ t < 0.6 <sup>2)</sup><br>0.6 ≤ t < 0.8 <sup>2)</sup> | ±0.05<br>±0.05      | ±0.035<br>±0.04   |
| alumiiniohutlevy          | SFS-EN 485-4 | 0.5 < t ≤ 0.6 <sup>3)</sup><br>0.6 < t ≤ 0.8 <sup>3)</sup> | ±0.05<br>±0.06      |                   |

1) 1200 < nauhan leveys ≤ 1500 mm,  $f_y \geq 280$  N/mm<sup>2</sup> (ei Fe E550G tai S500GD)

2) 1000 < nauhan leveys ≤ 1300 mm

3) 1000 < nauhan leveys ≤ 1250 mm, seosryhmä I, johon kuuluvat mm. AW3103, AW3004, AW3005 ja AW5005A



Taulukko 4. Ydinkerrosten lujuuksien ja kimmovakioiden tyypillisiä arvoja lämpötilassa 20°C (N/mm<sup>2</sup>).

|                           | solupolystyreeni EPS | solupolyuretaani PU | konstruktioivinen villa |
|---------------------------|----------------------|---------------------|-------------------------|
| Tiheys, kg/m <sup>3</sup> | n. 20                | 37–45               | 70–140                  |
| Vetokimmokerroin *        | 5–10                 | 3–8                 | 10–40                   |
| Puristuskimmokerroin *    | 3–7                  | 3–6                 | 5–20                    |
| Liukukerroin              | 3–5                  | 2–5                 | 2–10**                  |
| Vetolujuus *              | 0.1–0.2              | 0.1–0.2             | 0.1–0.3                 |
| Puristuslujuus *          | 0.08–0.15            | 0.08–0.2            | 0.05–0.2                |
| Leikkauslujuus            | 0.06–0.15            | 0.08–0.2            | 0.05–0.1**              |
| Virumisluvut              |                      |                     |                         |
| – lumikuorma (2000 h)     | 2.4                  | 2.4                 | 1.0                     |
| – omapaino (100000 h)     | 7                    | 7                   | 2.0                     |

\* elementin pintaa vastaan kohtisuorassa suunnassa (z-suunta)

\*\* pituus- ja paksuussuunnan määrittämässä tasossa (xz-taso)

## 4 Jännitysten ja siirtymien laskenta

Sandwich-elementtien lujustekniseen toimintaa vaikuttaa pintakerrosten muodon, paksuuden ja kimmokertoimen ohella ydinkerroksen leikkausjäykkyys. Erona tavallisiin, teknistä taivutusteoriaa noudattaviin palkkeihin on ydinkerroksen leikkausmuodonmuutoksen vaikutus sandwich-elementin taipumiin ja taivutusmomentti- ja leikkausvoimajakautumiin. Sandwich-elementit mitoitetaan tavallisesti palkkeina, jotka asennetaan kuormaa kantaviksi rakenneosiksi elementin pituussuuntaa vasten kohtisuorassa suunnassa olevien pääkannattimina toimivien palkkien tai ristikoiden tai sekundaaristen orsiraakenteiden päälle. Sandwich-palkkien taipumaviivan ja momentti- ja leikkausvoimapintojen muotoon vaikuttaa myös ydinkerroksen leikkausviruminen, joka mitoitussuunnassa otetaan huomioon virumisluvun avulla.

Pintakerroksen muodolla on suuri merkitys elementin käyttäytymiseen ja sitä kautta myös mitoitussuunnassa. Jos pintakerrokset ovat tasomaisia tai vain lievästi profiloituja, niiden taivutusjäykkyys on vähäinen. Elementtien lujustekninen tarkastelu voidaan silloin suorittaa ns. ohutkuorisen sandwich-palkin teoriaa käyttäen. Jos ainakin toinen pintakerroksesta on voimakkaasti profiloitu tai pintakerros muodostuu paksumasta rakennuslevystä tai tasaiseen pintakerrokseen on kiinnitetty lisäverhouslevy, pintakerroksen taivutusjäykkyys kerroksen oman painopisteakselin suhteen vaikuttaa sandwich-elementin taipumiin ja jännitysten jakautumiseen. Tällaiset sandwich-elementit on mitoitettava käyttäen ns. paksukuorisen sandwich-palkin teoriaa.

Ohut- ja paksukuorisen sandwich-palkkien lausekkeiden perusteet ja johtaminen on esitetty mm. kirjallisuussiviteissä /Stamm & Witte 1974,

Tolva & Jumppanen 1980/. Tähän artikkeliin on käytännön suunnittelutyötä varten on johdettu valmiita lausekkeitä muutamille tärkeille kuormitustapauksille. Lausekkeet ohutkuorisille sandwich-palkeille on annettu taulukossa 5 ja paksukuorisille palkeille taulukossa 6. Lisäksi on esitetty ohutkuorisille jatkuville sandwich-palkeille suurimpien taivutusmomenttien, leikkausvoimien ja taipumien lausekkeitä, kun palkkia kuormittaa tasainen pintakuorma tai pintakerrosten välinen lämpötilaero (Taulukko 7). Uusille kuormitustapauksille mitoitussausekkeitä voidaan muodostaa taulukoiden 5 ja 6 yhtälöiden avulla siirtymämenetelmää käyttäen.

Sandwich-palkin taivutusjäykkyys leveysyksikköä kohti lasketaan lausekkeesta (3)

$$B_s = \frac{E_{F1} A_{F1} (E_{F2} A_{F2}) e_c^2}{E_{F1} A_{F1} + E_{F2} A_{F2} B} \quad (3)$$

Pinta-alojen  $A_{F1}$  ja  $A_{F2}$  arvoihin vaikuttavat ainepaksuus  $t$  ja pintakerroksen profilointi. Jos sandwich-palkin molemmat pintakerrokset ovat tasaisia ja samanlaisia, lauseke (3) yksinkertaistuu muotoon (4)

$$B_s = 0.5 E_F t_F e_c^2 \quad (4)$$

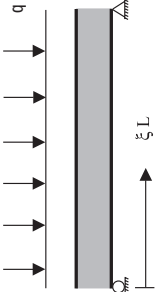
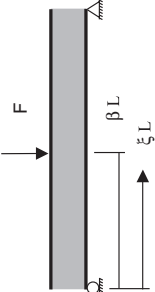
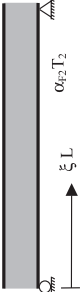
Sandwich-palkin leikkausjäykkyys leveysyksikköä kohti saadaan lausekkeesta (5)

$$S = G_c e_c \quad (5)$$

Käytetyt merkinnät selviävät kuvasta 1.

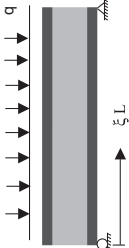
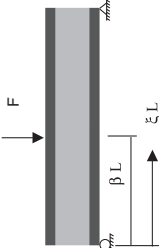
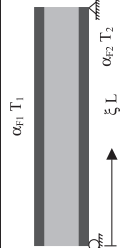
Ydinkerroksen leikkausmuodonmuutos ei vaikuta yksiaukkoisen, nivellellisesti tuetun ohutkuorisen sandwich-palkin taivutusmomentti- ja leikkausvoimapintoihin, mutta taipumaan ydinkerroksen leikkausmuodonmuutoksella on vaikutusta (lauseke 6).

Taulukko 5. Ohutkuorisen, päistään nivelleisesti tuetun taivutetun sandwich-palkin ratkaisuja. Palkin reunaehdot ovat  $w(0) = w(L) = 0$  ja  $\gamma'(0) - w''(0) = \gamma'(L) - w''(L) = 0$ . Ohutkuoriselle sandwich-palkille taivutusjäykkyys on  $B = B_s$ .

| kuormitustapaus                                                                     | taivutusmomentti                                | leikkausvoima                                                                      | taipuma                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | $M(\xi) = \frac{1}{2} q L^2 \xi (1 - \xi)$      | $V(\xi) = q L (\frac{1}{2} - \xi)$                                                 | $w(\xi) = \frac{q L^4}{24 B_s} \xi (1 - \xi) (-\xi^2 + \xi + 1) + \frac{q L^2}{2 S} \xi (1 - \xi)$         |
|                                                                                     | $M_{\max} = M(\frac{1}{2}) = \frac{1}{8} q L^2$ | $V_{\max} = V(\frac{1}{2}) = \frac{1}{2} q L$                                      | $w_{\max} = w(\frac{1}{2}) = \frac{5}{384} \frac{q L^4}{B_s} + \frac{1}{8} \frac{q L^2}{S}$                |
| kun $0 \leq \xi \leq \beta$ kun $0 \leq \xi \leq \beta$                             |                                                 |                                                                                    |                                                                                                            |
|  | $M(\xi) = F L (1 - \beta) \xi$                  | $V(\xi) = F (1 - \beta)$                                                           | $w(\xi) = \frac{F L^3}{6 B_s} (1 - \beta) \xi (-\xi^2 + 2\beta - \beta^2) + \frac{F L}{S} (1 - \beta) \xi$ |
|                                                                                     | $M_{\max} = M(\beta) = F L (1 - \beta) \beta$   | $V_{\max} = \max \begin{cases} V(0) = F (1 - \beta) \\ V(1) = F \beta \end{cases}$ | $w(\beta = \frac{1}{2})_{\max} = \frac{1}{48} \frac{F L^3}{B_s} + \frac{1}{4} \frac{F L}{S}$               |
|  |                                                 |                                                                                    |                                                                                                            |
|                                                                                     | $M(\xi) = 0$                                    | $V(\xi) = 0$                                                                       | $w(\xi) = \frac{1}{2} \theta L^2 \xi (1 - \xi)$                                                            |
|                                                                                     |                                                 |                                                                                    | $w_{\max} = w(\frac{1}{2}) = \frac{1}{8} \theta L^2$                                                       |
| $\theta = \frac{\alpha_{F2} T_2 - \alpha_{F1} T_1}{e_c}$                            |                                                 |                                                                                    |                                                                                                            |



Taulukko 6. Paksukuorisen, päistään nivelleisesti tuetun taivutetun sandwich-palkin ratkaisuja. Palkin reunaehdot ovat  $w(0) = w(L) = 0$ ,  $\gamma'(0) = \gamma'(L) = 0$  ja  $w''(0) = w''(L) = 0$ . Lausekkeissa on käytetty merkintöjä:  $\alpha = B_1/l$ ,  $\alpha_1 = B_1/B_{12}$ ,  $\alpha_2 = B_1/B_{12}$ ,  $B_2 = B_1 + B_3$ ,  $B_3 = B_1 + B_3$ ,  $B_4 = B_1 + B_3$ ,  $B_5 = B_1 + B_3$ ,  $B_6 = B_1 + B_3$ ,  $B_7 = B_1 + B_3$ ,  $B_8 = B_1 + B_3$ ,  $B_9 = B_1 + B_3$ ,  $B_{10} = B_1 + B_3$ ,  $B_{11} = B_1 + B_3$ ,  $B_{12} = B_1 + B_3$ ,  $B_{13} = B_1 + B_3$ ,  $B_{14} = B_1 + B_3$ ,  $B_{15} = B_1 + B_3$ ,  $B_{16} = B_1 + B_3$ ,  $B_{17} = B_1 + B_3$ ,  $B_{18} = B_1 + B_3$ ,  $B_{19} = B_1 + B_3$ ,  $B_{20} = B_1 + B_3$ ,  $B_{21} = B_1 + B_3$ ,  $B_{22} = B_1 + B_3$ ,  $B_{23} = B_1 + B_3$ ,  $B_{24} = B_1 + B_3$ ,  $B_{25} = B_1 + B_3$ ,  $B_{26} = B_1 + B_3$ ,  $B_{27} = B_1 + B_3$ ,  $B_{28} = B_1 + B_3$ ,  $B_{29} = B_1 + B_3$ ,  $B_{30} = B_1 + B_3$ ,  $B_{31} = B_1 + B_3$ ,  $B_{32} = B_1 + B_3$ ,  $B_{33} = B_1 + B_3$ ,  $B_{34} = B_1 + B_3$ ,  $B_{35} = B_1 + B_3$ ,  $B_{36} = B_1 + B_3$ ,  $B_{37} = B_1 + B_3$ ,  $B_{38} = B_1 + B_3$ ,  $B_{39} = B_1 + B_3$ ,  $B_{40} = B_1 + B_3$ ,  $B_{41} = B_1 + B_3$ ,  $B_{42} = B_1 + B_3$ ,  $B_{43} = B_1 + B_3$ ,  $B_{44} = B_1 + B_3$ ,  $B_{45} = B_1 + B_3$ ,  $B_{46} = B_1 + B_3$ ,  $B_{47} = B_1 + B_3$ ,  $B_{48} = B_1 + B_3$ ,  $B_{49} = B_1 + B_3$ ,  $B_{50} = B_1 + B_3$ ,  $B_{51} = B_1 + B_3$ ,  $B_{52} = B_1 + B_3$ ,  $B_{53} = B_1 + B_3$ ,  $B_{54} = B_1 + B_3$ ,  $B_{55} = B_1 + B_3$ ,  $B_{56} = B_1 + B_3$ ,  $B_{57} = B_1 + B_3$ ,  $B_{58} = B_1 + B_3$ ,  $B_{59} = B_1 + B_3$ ,  $B_{60} = B_1 + B_3$ ,  $B_{61} = B_1 + B_3$ ,  $B_{62} = B_1 + B_3$ ,  $B_{63} = B_1 + B_3$ ,  $B_{64} = B_1 + B_3$ ,  $B_{65} = B_1 + B_3$ ,  $B_{66} = B_1 + B_3$ ,  $B_{67} = B_1 + B_3$ ,  $B_{68} = B_1 + B_3$ ,  $B_{69} = B_1 + B_3$ ,  $B_{70} = B_1 + B_3$ ,  $B_{71} = B_1 + B_3$ ,  $B_{72} = B_1 + B_3$ ,  $B_{73} = B_1 + B_3$ ,  $B_{74} = B_1 + B_3$ ,  $B_{75} = B_1 + B_3$ ,  $B_{76} = B_1 + B_3$ ,  $B_{77} = B_1 + B_3$ ,  $B_{78} = B_1 + B_3$ ,  $B_{79} = B_1 + B_3$ ,  $B_{80} = B_1 + B_3$ ,  $B_{81} = B_1 + B_3$ ,  $B_{82} = B_1 + B_3$ ,  $B_{83} = B_1 + B_3$ ,  $B_{84} = B_1 + B_3$ ,  $B_{85} = B_1 + B_3$ ,  $B_{86} = B_1 + B_3$ ,  $B_{87} = B_1 + B_3$ ,  $B_{88} = B_1 + B_3$ ,  $B_{89} = B_1 + B_3$ ,  $B_{90} = B_1 + B_3$ ,  $B_{91} = B_1 + B_3$ ,  $B_{92} = B_1 + B_3$ ,  $B_{93} = B_1 + B_3$ ,  $B_{94} = B_1 + B_3$ ,  $B_{95} = B_1 + B_3$ ,  $B_{96} = B_1 + B_3$ ,  $B_{97} = B_1 + B_3$ ,  $B_{98} = B_1 + B_3$ ,  $B_{99} = B_1 + B_3$ ,  $B_{100} = B_1 + B_3$ ,  $B_{101} = B_1 + B_3$ ,  $B_{102} = B_1 + B_3$ ,  $B_{103} = B_1 + B_3$ ,  $B_{104} = B_1 + B_3$ ,  $B_{105} = B_1 + B_3$ ,  $B_{106} = B_1 + B_3$ ,  $B_{107} = B_1 + B_3$ ,  $B_{108} = B_1 + B_3$ ,  $B_{109} = B_1 + B_3$ ,  $B_{110} = B_1 + B_3$ ,  $B_{111} = B_1 + B_3$ ,  $B_{112} = B_1 + B_3$ ,  $B_{113} = B_1 + B_3$ ,  $B_{114} = B_1 + B_3$ ,  $B_{115} = B_1 + B_3$ ,  $B_{116} = B_1 + B_3$ ,  $B_{117} = B_1 + B_3$ ,  $B_{118} = B_1 + B_3$ ,  $B_{119} = B_1 + B_3$ ,  $B_{120} = B_1 + B_3$ ,  $B_{121} = B_1 + B_3$ ,  $B_{122} = B_1 + B_3$ ,  $B_{123} = B_1 + B_3$ ,  $B_{124} = B_1 + B_3$ ,  $B_{125} = B_1 + B_3$ ,  $B_{126} = B_1 + B_3$ ,  $B_{127} = B_1 + B_3$ ,  $B_{128} = B_1 + B_3$ ,  $B_{129} = B_1 + B_3$ ,  $B_{130} = B_1 + B_3$ ,  $B_{131} = B_1 + B_3$ ,  $B_{132} = B_1 + B_3$ ,  $B_{133} = B_1 + B_3$ ,  $B_{134} = B_1 + B_3$ ,  $B_{135} = B_1 + B_3$ ,  $B_{136} = B_1 + B_3$ ,  $B_{137} = B_1 + B_3$ ,  $B_{138} = B_1 + B_3$ ,  $B_{139} = B_1 + B_3$ ,  $B_{140} = B_1 + B_3$ ,  $B_{141} = B_1 + B_3$ ,  $B_{142} = B_1 + B_3$ ,  $B_{143} = B_1 + B_3$ ,  $B_{144} = B_1 + B_3$ ,  $B_{145} = B_1 + B_3$ ,  $B_{146} = B_1 + B_3$ ,  $B_{147} = B_1 + B_3$ ,  $B_{148} = B_1 + B_3$ ,  $B_{149} = B_1 + B_3$ ,  $B_{150} = B_1 + B_3$ ,  $B_{151} = B_1 + B_3$ ,  $B_{152} = B_1 + B_3$ ,  $B_{153} = B_1 + B_3$ ,  $B_{154} = B_1 + B_3$ ,  $B_{155} = B_1 + B_3$ ,  $B_{156} = B_1 + B_3$ ,  $B_{157} = B_1 + B_3$ ,  $B_{158} = B_1 + B_3$ ,  $B_{159} = B_1 + B_3$ ,  $B_{160} = B_1 + B_3$ ,  $B_{161} = B_1 + B_3$ ,  $B_{162} = B_1 + B_3$ ,  $B_{163} = B_1 + B_3$ ,  $B_{164} = B_1 + B_3$ ,  $B_{165} = B_1 + B_3$ ,  $B_{166} = B_1 + B_3$ ,  $B_{167} = B_1 + B_3$ ,  $B_{168} = B_1 + B_3$ ,  $B_{169} = B_1 + B_3$ ,  $B_{170} = B_1 + B_3$ ,  $B_{171} = B_1 + B_3$ ,  $B_{172} = B_1 + B_3$ ,  $B_{173} = B_1 + B_3$ ,  $B_{174} = B_1 + B_3$ ,  $B_{175} = B_1 + B_3$ ,  $B_{176} = B_1 + B_3$ ,  $B_{177} = B_1 + B_3$ ,  $B_{178} = B_1 + B_3$ ,  $B_{179} = B_1 + B_3$ ,  $B_{180} = B_1 + B_3$ ,  $B_{181} = B_1 + B_3$ ,  $B_{182} = B_1 + B_3$ ,  $B_{183} = B_1 + B_3$ ,  $B_{184} = B_1 + B_3$ ,  $B_{185} = B_1 + B_3$ ,  $B_{186} = B_1 + B_3$ ,  $B_{187} = B_1 + B_3$ ,  $B_{188} = B_1 + B_3$ ,  $B_{189} = B_1 + B_3$ ,  $B_{190} = B_1 + B_3$ ,  $B_{191} = B_1 + B_3$ ,  $B_{192} = B_1 + B_3$ ,  $B_{193} = B_1 + B_3$ ,  $B_{194} = B_1 + B_3$ ,  $B_{195} = B_1 + B_3$ ,  $B_{196} = B_1 + B_3$ ,  $B_{197} = B_1 + B_3$ ,  $B_{198} = B_1 + B_3$ ,  $B_{199} = B_1 + B_3$ ,  $B_{200} = B_1 + B_3$ ,  $B_{201} = B_1 + B_3$ ,  $B_{202} = B_1 + B_3$ ,  $B_{203} = B_1 + B_3$ ,  $B_{204} = B_1 + B_3$ ,  $B_{205} = B_1 + B_3$ ,  $B_{206} = B_1 + B_3$ ,  $B_{207} = B_1 + B_3$ ,  $B_{208} = B_1 + B_3$ ,  $B_{209} = B_1 + B_3$ ,  $B_{210} = B_1 + B_3$ ,  $B_{211} = B_1 + B_3$ ,  $B_{212} = B_1 + B_3$ ,  $B_{213} = B_1 + B_3$ ,  $B_{214} = B_1 + B_3$ ,  $B_{21$

| kuormitustapaus                                                                     | taivutusmomentti                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | leikkausvoima | taipuma                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| yleiset lausekkeet                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|  | $f_1(\xi) = 1 - \cosh(\varepsilon/2) \sinh(\varepsilon\xi^2), f_{11}(\xi) = (\varepsilon/L) \left( \tanh(\varepsilon/2) \cosh(\varepsilon\xi^2) - \sinh(\varepsilon\xi^2) \right)$<br>$f_2(\xi) = \sinh(\varepsilon(1-\beta)) \sinh(\varepsilon\xi^2) / \sinh(\varepsilon), f_{21}(\xi) = (\varepsilon/L) \left( \sinh(\varepsilon(1-\beta)) \cosh(\varepsilon\xi^2) / \sinh(\varepsilon) \right)$<br>$f_3(\xi) = 1 - \cosh(\varepsilon\xi^2) + \tanh(\varepsilon/2) \sinh(\varepsilon\xi^2), f_{31}(\xi) = (\varepsilon/L) (-\sinh(\varepsilon\xi^2) + \tanh(\varepsilon/2) \cosh(\varepsilon\xi^2))$ |               | $w(\xi) = \frac{qL^2}{B} \left( \frac{\xi - 2\xi^3 + \xi^4}{24} + \frac{1-\alpha}{\alpha\varepsilon^3} (0.5\varepsilon^2(\xi - \xi^2) - f_1(\xi)) \right)$<br>$w_{\max} = w(1/2) = \frac{qL^4}{B} \left( \frac{5}{384} + \frac{1-\alpha}{\alpha\varepsilon^4} \left( \frac{\varepsilon^2}{8} - f_1(0.5) \right) \right)$ |
|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| $\theta = \frac{\alpha_{T2} T_2 - \alpha_{T1} T_1}{e_c}$                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

Taulukko 7. Tukireaktio reuna- ja välituella, taivutusmomentti reunakentässä ja välituen kohdalla ja liikimääräinen lauseke suurimmalle taipumalle reu-  
nakenkässä. Ohutkuorinen tasajänteinen yksi-, kaksi- tai kolmeaukkoinen sandwich-palkki, jota kuormittaa tasaisesti jakautunut kuorma q tai lämpötila-  
ero ulkopintakerroksen ( $T_1$ ) ja sisäpintakerroksen ( $T_2$ ) välillä.  $k = (3B_s)/(L^2 S)$ .  $\theta = (\alpha_{F2} T_2 - \alpha_{F1} T_1) / e_C$ .

|                                               | Tukireaktio reunatuella<br>$F_1$                   | Tukireaktio välituella<br>$F_2$              | Taivutusmomentti<br>kentässä<br>M                      | Taivutusmomentti<br>välituella<br>M           | Taipuma kentässä<br>w                                                 |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Yksiaukkoinen palkki, Jännemitta = L          |                                                    |                                              |                                                        |                                               |                                                                       |
| q                                             | $\frac{qL}{2}$                                     | –                                            | $\frac{qL^2}{8}$                                       | –                                             | $\frac{5qL^4}{384B_s} \left( 1 + \frac{16}{5}k \right)$               |
| $(T_2 - T_1)$                                 | –                                                  | –                                            | –                                                      | –                                             | $\frac{\theta L^2}{8}$                                                |
| Kaksiaukkoinen palkki, Jännemitat = L + L     |                                                    |                                              |                                                        |                                               |                                                                       |
| q                                             | $\frac{qL}{2} \left( 1 - \frac{1}{4(1+k)} \right)$ | $qL \left( 1 + \frac{1}{4(1+k)} \right)$     | $\frac{qL^2}{8} \left( 1 - \frac{1}{4(1+k)} \right)^2$ | $-\frac{qL^2}{8} \cdot \frac{1}{1+k}$         | $\approx \frac{qL^4}{48B_s} \cdot \frac{0.26 + 2.625k + 2k^2}{1+k}$   |
| $(T_2 - T_1)$                                 | $-\frac{3\theta B_s}{2L} \cdot \frac{1}{1+k}$      | $\frac{3\theta B_s}{L} \cdot \frac{1}{1+k}$  | $-\frac{3\theta B_s}{4} \cdot \frac{1}{1+k}$           | $-\frac{3\theta B_s}{2} \cdot \frac{1}{1+k}$  | $\approx \frac{\theta L^2}{32} \cdot \frac{1.089 + 3.96k}{1+k}$       |
| Kolmeaukkoinen palkki, Jännemitat = L + L + L |                                                    |                                              |                                                        |                                               |                                                                       |
| q                                             | $\frac{qL}{2} \left( 1 - \frac{1}{5+2k} \right)$   | $qL \left( 1 + \frac{1}{2(5+2k)} \right)$    | $\frac{qL^2}{8} \left( 1 - \frac{1}{5+2k} \right)^2$   | $-\frac{qL^2}{10+4k}$                         | $\approx \frac{qL^4}{24B_s} \cdot \frac{0.826 + 5.625k + 2k^2}{5+2k}$ |
| $(T_2 - T_1)$                                 | $-\frac{6\theta B_s}{L} \cdot \frac{1}{5+2k}$      | $\frac{6\theta B_s}{L} \cdot \frac{1}{5+2k}$ | $-\frac{3\theta B_s}{5} \cdot \frac{1}{5+2k}$          | $-\frac{6\theta B_s}{5} \cdot \frac{1}{5+2k}$ | $\approx \frac{\theta L^2}{4} \cdot \frac{1.056 + k}{5+2k}$           |

$$w = w_0 (1 + 3,2k) \quad (6)$$

$$\text{missä } k = \frac{3B_s}{L^2 S} \quad (7)$$

ja jos ydinkerroksen leikkausviruminen otetaan huomioon,

$$k_\phi = (1 + \phi_i) \frac{3B_s}{L^2 S} \quad (8)$$

$$w_0 = \frac{5}{384} \frac{qL^4}{B_s} \quad (9)$$

Ydinkerroksen leikkausmuodonmuutos vaikuttaa staattisesti määräämättömien kuten jatkuvien sandwich-palkkien jännitysjakautumiin. Kaksiaukkoisen tasajänteisen ohutkuorisen sandwich-palkin taivutusmomentti ja leikkausvoima välituen kohdalla voidaan laskea lausekkeista (10) ja (11).

$$M_s = \frac{1}{1+k} M_0 \quad (10)$$

$$V_s = \left(1 + \frac{1}{4(1+k)}\right) V_0 \quad (11)$$

$$\text{missä } M_0 = -\frac{1}{8} qL^2 \quad \text{ja} \quad V_0 = \frac{1}{2} qL \quad (12, 13)$$

Sandwich-elementtien kiinnitykset ja myös kylmämuovatuista ohutlevyprofiileista ja puusoiroista muodostuvat tuet ovat joskus niin joustavia, että niiden siirtymät vaikuttavat sandwich-elementin taipumiin ja moniaukkoisten jatkuvien elementtien jännitysjakautumiin. Erityisesti tuulen imukuormien ja lämpötilakuormien vaikutusta arvioitaessa saattaa olla hyödyllistä ottaa kiinnitysten ja tukien joustavuus huomioon.

Kaksiaukkoisen tasajänteisen ohutkuorisen sandwich-palkin välituen tukireaktio saadaan lausekkeesta (14), kun palkkia kuormittaa tasaisesti jakautunut kuorma  $q$  ja lausekkeesta (15), kun sandwich-palkin pintakerrosten välillä on lämpötilaero ( $T_2 - T_1$ ) (kuva 3). Välituen tukireaktion perusteella voidaan edelleen ratkaista reunatukien tukireaktio  $F_1$  ja taivutusmomentti  $M_{s2}$  ja leikkausvoima  $V_{s2}$  välituen kohdalla (16–18).

$$F_{2q} = \frac{2qL \left[ \frac{L^3}{48B_s} (5+4k) + \frac{1}{2k_1} \right]}{\frac{L^3}{6B_s} (1+k) + \frac{1}{2k_1} + \frac{1}{k_2}} \quad (14)$$

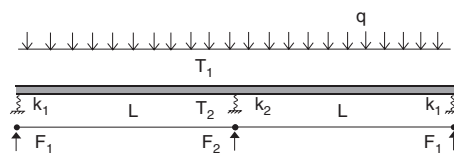
$$F_{2T} = \frac{4\theta L^2}{\frac{4L^3}{3B_s} (1+k) + \frac{1}{2k_1} + \frac{1}{k_2}} \quad (15)$$

missä  $k_1$  on reunatuen ja  $k_2$  välituen jäykkyyttä kuvaava jousivakio.

$$F_1 = qL - \frac{1}{2} (F_{2q} + F_{2T}) \quad (16)$$

$$M_{s2} = \frac{1}{2} qL^2 - \frac{L}{2} (F_{2q} + F_{2T}) \quad (17)$$

$$V_{s2} = \pm \frac{1}{2} (F_{2q} + F_{2T}) \quad (18)$$



Kuva 3. Joustavilla tuilla tuettu kaksiaukkoisen sandwich-palkki.

Sandwich-palkkien siirtymä- ja jännitystilän laskemiseen on kehitetty myös elementtimenettelmään perustuvia tehokkaita laskentamenetelmiä ja -ohjelmia. Sandwich-palkkien ja laattojen analysointiin voidaan käyttää myös yleisiä fem-ohjelmia, joissa monissa on olemassa erityisiä kerroslevyelementtejä ohut- ja paksukuorisia sandwich-rakenteita varten.

Taivutusmomentin ja leikkausvoiman arvon perusteella lasketaan pintakerrosten normaali-jännitysten ja ydinkerroksen leikkausjännityksen arvot ohutkuoriselle sandwich-palkille lausekkeista (kuvat 4 ja 5)

$$\sigma_{F1} = -\frac{N_{F1}}{A_{F1}} = -\frac{M_s}{e_c A_{F1}} \quad (19a, b)$$

$$\sigma_{F2} = -\frac{N_{F2}}{A_{F2}} = -\frac{M_s}{e_c A_{F2}}$$

$$\tau_c = \frac{V_s}{e_c B} \quad (20)$$

ja paksukuoriselle sandwich-palkille lausekeista (kuvat 6 ja 7)

$$\sigma_{F11} = \sigma_{F1} - \frac{M_{F1}}{I_{F1}} d_{11}, \quad (21a, b)$$

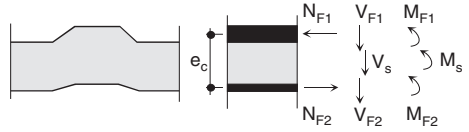
$$\sigma_{F12} = \sigma_{F1} + \frac{M_{F1}}{I_{F1}} d_{12}$$

$$\sigma_{F21} = \sigma_{F2} - \frac{M_{F2}}{I_{F2}} d_{21}, \quad (22a, b)$$

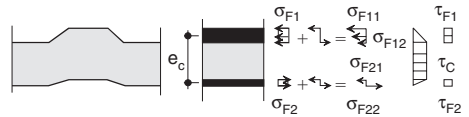
$$\sigma_{F22} = \sigma_{F2} + \frac{M_{F2}}{I_{F2}} d_{22}$$

$$\tau_{F1} = \frac{V_{F1}}{n_1 s_{w1} t_1}, \quad \tau_{F2} = \frac{V_{F2}}{n_2 s_{w2} t_2} \quad (23a, b)$$

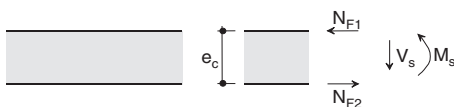
missä  $A_{F1}$  ja  $A_{F2}$  ovat pintakerrosten paksuuksia,  $I_{F1}$  ja  $I_{F2}$  pintakerrosten jäyhyysmomentteja oman painopisteakselin suhteen,  $s_{w1}$  ja  $s_{w2}$  profiloitin pintakerroksen profiilin uuman pituuksia ja  $n_1$  ja  $n_2$  uumaosien lukumääriä leveysyksikköä kohti.



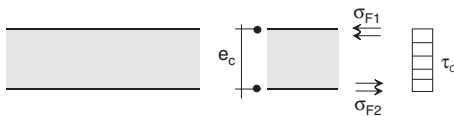
Kuva 6. Paksukuorisen sandwich-palkin poikkileikkauksen jännitysresultantit. Paksukuorisen sandwich-palkin pintakerrosten taivutusjäykkyys on mitoituslaskelmissa otettava huomioon ( $B_{F1} + B_{F2} \neq 0$ ). Poikkileikkauksen jännitysresultantit ovat  $M = M_S + M_{F1} + M_{F2}$  ja  $V = V_S + V_{F1} + V_{F2}$ .



Kuva 7. Pintakerrosten normaalijännitysten ja pinta- ja ydinkerrosten leikkausjännitysten jakautuminen paksukuorisen sandwich-palkin poikkileikkauksessa.



Kuva 4. Ohutkuorisen sandwich-palkin poikkileikkauksen jännitysresultantit. Ohutkuorisen sandwich-palkin pintakerrosten taivutusjäykkyys voidaan mitoituslaskelmissa jättää huomiotta ( $B_{F1} = B_{F2} = 0$ ). Poikkileikkauksen jännitysresultantit ovat  $M = M_S = e_c N_{F1} = e_c N_{F2}$  and  $V = V_S$ .

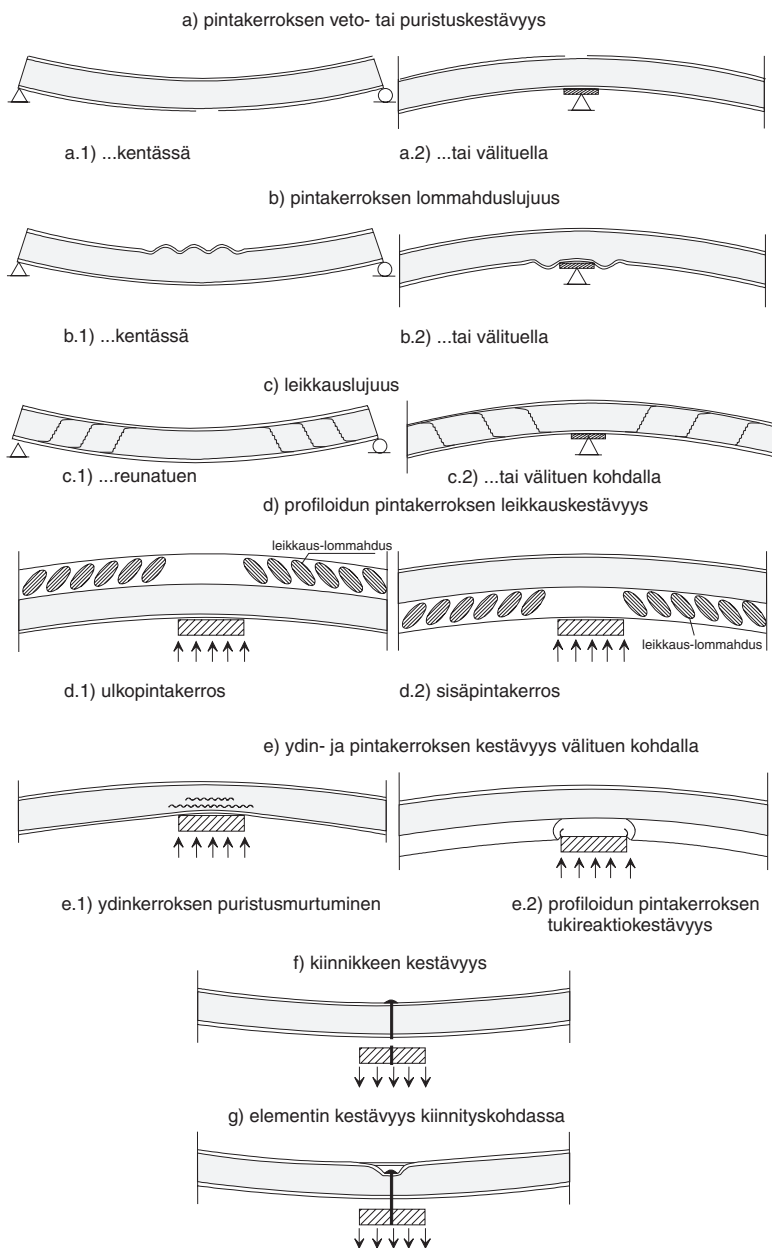


Kuva 5. Pintakerrosten normaalijännitysten ja ydinkerroksen leikkausjännityksen jakautuminen ohutkuorisen sandwich-palkin poikkileikkauksessa.

## 5 Murtumismekanismit

Sandwich-elementin kestävyys erilaisia murtumistapoja vastaan tutkitaan kyseisen murtumistavan kannalta määräävässä poikkileikkauksessa (kuva 8). Staattisesti määrätyn ohutkuorisen yksiaukkoisen sandwich-elementin tapauksessa on tarpeen tutkia poikkileikkauksen taivutuskestävyys tai pintakerroksen lommahduskestävyys jännemitan puolivälissä, leikkauskestävyys tuen reunan kohdalla, tukireaktiokestävyys positiivisia ja negatiivisia tukireaktioita vastaan tuilla sekä elementin suurin taipuma.

Staattisesti määräämättömissä jatkuissa rakenteissa on selvitetävä lisäksi poikkileikkauksen kestävyys välitukien alueella samanaikaisesti vaikuttavaa taivutusmomenttia ja tukireaktiota vastaan. Paksukuorisen jatkuvan sandwich-palkin laskentaan liittyy uusia, pintakerrosten leikkaus- ja tukireaktiokestävyyden määräämiä murtumismuotoja (kuva 8). Murtumismallien tyyppillinen laskennallinen analyysi selviää artikkelin lopussa olevista laskuesimerkeistä. Murtumismalleille käytetään taulukossa 8 annettuja aineosavarmuuslukuja /CIB 2000/. Kirjallisuusviitteessä /Lightweight sandwich construction 2001/ on kuvattu laskennallisia mahdollisuuksia eri murtumismekanismin tuottamien ominaislujuusarvojen arvioimiseksi. Tavallisesti ta-



Kuva 8. Sandwich-elementin murtumismuotoja.

Taulukko 8. Aineosavarmuusluvut sandwich-palkin kestävyyslaskentaa varten /CIB 2000/.

|                                                                                             | murtorajatilalla   | käyttöraajatilalla |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|
| pintakerroksen myötäminen                                                                   | 1.1                | 1.0                |
| pintakerroksen paikallinen lommahdus tukialueiden ulkopuolella                              | 1.25               | 1.0                |
| pintakerroksen paikallinen lommahdus välituen alueella (yhteisvaikutus tukireaktion kanssa) | 1.25 <sup>1)</sup> | 1.1                |
| ydinkerroksen leikkausmurtuminen                                                            | 1.25               | 1.0                |
| profiloidun pintakerroksen leikkausmurtuminen                                               | 1.1                | 1.0                |
| ydinkerroksen puristusmurtuminen                                                            | 1.25               | 1.0                |
| profiloidun pintakerroksen tukireaktiokestävyys                                             | 1.1                | 1.0                |
| kiinnikkeen murtuminen                                                                      | 1.33 <sup>2)</sup> | 1.0 <sup>2)</sup>  |
| sandwich-elementin murtuminen kiinnityskohdassa                                             | 1.33 <sup>2)</sup> | 1.0 <sup>2)</sup>  |

<sup>1)</sup> jos jatkuvan sandwich-palkin jännitysten laskenta murtorajatilassa perustuu kimmoteoriaan tai jos jännitysten laskenta perustuu plastisuusteoriaan, mutta välituen kohdalla hyödynnetään nollasta poikkeavaa jäännösmomenttikestävyyttä

<sup>2)</sup> jos kiinnikkeiden ominaiskestävyyden määrittäminen perustuu pieneen koetulosjoukkoon (< 5), on käytettävä suurempaa aineosavarmuuslukua

saisen pintakerroksen puristuslujuus, ydinkerroksen leikkauslujuus, tukireaktiokestävyys määräävä ydinkerroksen puristuslujuus ja kiinnikkeiden vetokestävyys määritetään kokeellisesti.

Sandwich-palkin murtumistapoja voidaan tarkastella toisistaan erillisinä ilmiöinä, joille kullekin määritetään raja-arvo mitoitusta varten. Aksiaalisesti kuormitetuissa elementeissä ja laattarakenteissa nämä murtumismuodot muodostavat vuorovaikutuksia, jolloin yksinkertainen insinööritekninen lähestymistapa ei tuota enää luotettavia tuloksia. Näiden rakenteiden numeerinen analyysi vaatii tarkempaa tietoa ydinkerroksen ja rajapintojen käyttäytymisestä murtorajatilassa.

## 6 Kuormat ja kuormitusyhdistelmät

Metalliohutlevypintaisten sandwich-elementtien suunnittelussa on tavanomaisten mekaanisten kuormien kuten omapaino, tuulen nopeuspaine ja lumikuorma, lisäksi otettava huomioon sisä- ja ulkopintakerrosten välillä syntyvän lämpötilaeron aiheuttamat taipumat ja rasitukset. Taulukossa 9 on annettu CIB 2000 -ohjeen mukaiset, laskennassa suositeltavat lämpötila-arvot pintakerroksille. Sisäpintakerroksen lämpötilaksi oletetaan kesäolosuhteissa 25°C ja talviolosuhteissa 20°C. Sandwich-elementin ulkopuolisen verhouksen vaikutus ulkopintakerroksen mitoituslämpötiloihin pitää selvittää erikseen. Tuulettuva, elementin ulkopintakerroksesta irti oleva lämpöä emittoiva verhouksen rakente voi vähentää mitoituslämpötilaa merkittävästi.

Mekaaniseen kuormaan ja lämpötilakuormaan verrattava rasitustekijä on erityisesti solumuovia olevilla ydinkerroksilla varustetuille elementeille ydinkerroksen leikkausviruminen pitkäaikaisen kuorman vaikutuksesta. Leikkausviruminen kasvattaa sandwich-elementin taipumia ja muuttaa jatkuvan ohutkuorisen ja kaikkien paksukuoristen sandwich-elementtien jännitysresultanttien jakautumia. Leikkausviruminen vuoksi pitkäaikaiskuormituksen alaisten elementtien rasitukset on tutkittava alkutilassa alkuliukukertoimen perusteella sekä oletetun kuormitusajan jälkeen tuota kuormitusjaksoa kuvaavan liukukertoimen perusteella (ks. lauseke 2). Virumistarkastelut koskevat tyypillisesti vain ulkopintana tai alakattoina olevia kattoelementtejä. Laskelmissa käytettävät ydinkerroksen liukukertoimet ja virumisluvut ovat tuotekohtaisia ja ne saadaan elementtien toimittajilta. Lähtöarvoina solumuoviytimisten (PU ja EPS) sandwich-elementtien virumisluvuille voidaan käyttää taulukossa 4 annettuja arvoja.

Sandwich-elementin kestävyys äärimmäistä kuormitustilannetta vastaan tarkistetaan murtorajatilassa lausekkeen (24) avulla. Elementin tekninen toiminnallinen kelpoisuus tarkistetaan käyttörajatilassa lausekkeiden (25) ja (26) avulla, joista lausekkeista ensimmäinen koskee jännitystilaa jatkuvan elementin välituen kohdalla ja toinen elementin taipumaa. Lausekkeisiin sisältyvät kuormien osavarmuusluvut  $\gamma$  ja yhdistelykertoimet  $\psi$  on annettu taulukossa 10 ja 11 /CIB 2000/.

$$S_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_G G_{kj} + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Qi} \psi_{0i} Q_{ki} \leq R_d = R_k / \gamma_M \quad (24)$$

Taulukko 9. Sandwich-elementtien metalliohutlevyä olevien pintakerrosten lämpötilat mitoituslaskelmia varten /CIB 2000/. RG tarkoittaa pintakerroksen heijastuskerrointa, jonka tarkempia, pintakerroksen väristä riippuvia arvoja saa ohutlevyn toimittajalta.

|          | alue           | ulkopintakerroksen väri | R <sub>G</sub> | T <sub>1</sub> (°C) |
|----------|----------------|-------------------------|----------------|---------------------|
| kesällä  |                | hyvin vaalea            | 75–90          | 55                  |
|          |                | vaalea                  | 40–74          | 65                  |
|          |                | tumma                   | 8–39           | 80                  |
| talvella | meri-ilma (UK) |                         |                | –10                 |
|          | keski-Eurooppa |                         |                | –20                 |
|          | Skandinavia    |                         |                | –30                 |

$$S_d = \sum_{j \geq 1} G_{kj} + Q_{k1} + \sum_{i > 1} \psi_{0i} Q_{ki} \leq R_d = R_k / \gamma_M \quad (25)$$

$$S_d = \sum_{j \geq 1} G_{kj} + \psi_{11} Q_{k1} + \sum_{i > 1} \psi_{0i} \psi_{1i} Q_{ki} \leq R_d = R_k / \gamma_M \quad (26)$$

Lausekkeissa  $S_d$  tarkoittaa kyseisen kuormayhdistelmän vaikutusta, esimerkiksi pintakerroksen puristusjännitystä tai ydinkerroksen leikkausjännitystä ja  $R_d$  vastaavaa kestävyuden suunnitteluarvoa, vastaavasti siis pintakerroksen lommahduslujuuutta tai ydinkerroksen leikkauslujuuutta.

Seinäelementtejä kuormittaa tavallisesti vain tuulen nopeuspaine ja pintakerrosten välinen lämpötilaero. Yksiaukkoiselle ohutkuoriselle seinä-elementille löydetään silloin yhteensä kaksi kuormitusyhdistelmää murtorajatilassa (lauseke 24)

- $\gamma_F \cdot$  tuulen painekuorma ja
- $\gamma_F \cdot$  tuulen imukuorma.

Samalle elementille löydetään lausekkeen (26) mukaan käyttörajatilassa yhteensä kuusi mahdollista määräävää kuormitusyhdistelmää

- tuulen painekuorma
- $\psi_1 \cdot$  tuulen painekuorma +  $\psi_0 \cdot$  positiivinen lämpötilaero (talvi),
- $\psi_1 \cdot \psi_0 \cdot$  tuulen painekuorma + positiivinen lämpötilaero (talvi),
- tuulen imukuorma
- $\psi_1 \cdot$  tuulen imukuorma +  $\psi_0 \cdot$  negatiivinen lämpötilaero (kesä) ja
- $\psi_1 \cdot \psi_0 \cdot$  tuulen imukuorma + negatiivinen lämpötilaero (kesä).

Moniaukkoisen paksukuorisen kattoelementtinä toimivan sandwich-palkin määräävää kuormitusyhdistelmää ei ole helppo etukäteen huomata, vaan silloin kaikki mahdolliset kuormitusyhdistelmät on tutkittava lausekkeiden (24)–(26) avulla. Esimerkkejä mahdollisista yhdistelmistä löytyy kirjallisuuslähteistä /CIB 2000 ja Lightweight sandwich construction 2001/.

Taulukko 10. Kuorman osavarmuusluvut /CIB 2000/.

|                                                    | murtorajatila | käyttörajatila |
|----------------------------------------------------|---------------|----------------|
| Pysyvä kuorma kuten omapaino                       | 1.35 (1.00*)  | 1.00           |
| Muuttuva kuorma kuten lumi, tuuli tai lämpötilaero | 1.50          | 1.00           |
| Ydinkerroksen leikkausvurminen                     | 1.00          | 1.00           |

\* pysyvä kuorma vähentää määräävän kuorman vaikutusta, esimerkiksi katon omapaino vastaan tuulen imu

Taulukko 11. Yhdistelykertoimet /CIB 2000/.

|          | lumikuorma                 | tuulikuorma                | lämpötilaero              |
|----------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| $\psi_0$ | 0.6                        | 0.6                        | $0.6 / 1.0$ <sup>1)</sup> |
| $\psi_1$ | $0.75 / 1.0$ <sup>2)</sup> | $0.75 / 1.0$ <sup>2)</sup> | 1.0                       |

<sup>1)</sup>  $\psi = 1.0$ , jos ulkopinnan lämpötilan  $T = 0^\circ\text{C}$  vaikutus yhdistetään lumikuorman vaikutuksen kanssa

<sup>2)</sup>  $\psi = 0.75$  lumi- ja tuulikuorman vaikutukselle, jos kyseiseen yhdistelmään kuuluu myös muita muuttuvia kuormia, kuten esimerkiksi lämpötilaeron vaikutus,  $\psi = 1.0$  lumi- ja tuulikuorman vaikutukselle, jos kyseiseen yhdistelmään kuuluu ainoastaan lumi- tai tuulikuorman vaikutus



## 7 Muut kuormitustilanteet

Rakenteiden liittymien ja saumojen suunnittelussa merkittävä seikka ovat sandwich-elementtien suuret, erityisesti pintakerrosten välisistä lämpötilaeroista aiheutuvat taipumat. Lämpötilaeron aiheuttamia taipumia voidaan vähentää minimoimalla osamääriä ( $L^2 / e_c$ ), missä  $L$  on yksiaukkoisen elementin jännemitta ja  $e_c$  pintakerrosten painopisteiden välinen etäisyys. Taipumia voidaan pienentää tekemällä elementeistä staattisesti jatkuvia moniaukkoisia rakenteita, joiden etuja on päittäissaumojen pienempi määrä. Tällä voi olla merkitystä kattoelementtien ja pakastamokäynnin seinäelementtien toiminnan ja luotettavuuden kannalta. Jatkuvien elementtien haittapuolia ovat lämpötilaeroista syntyvät lämpötilakuormat, joita puolestaan voidaan pienentää valitsemalla elementtien ulkopintakerroksen vaalea värisävy, kattamalla elementit tuulettamalla verhouksella tai kiinnittämällä elementit joustavilla kiinnikkeillä runkorakenteeseen.

Sandwich-elementteihin joudutaan tekemään aukkoja ikkunoiden, ovien ja muiden läpivientien vuoksi. Aukot pienentävät elementin poikkileikkauksen pinta-alaa ja siten elementin kestävyyttä ja taiputus- ja leikkausjäykkyyttä. Sandwich-elementtien leikkauskestävyys voidaan yleensä arvioida jäljellä olevan nettopoikkileikkauksen perusteella. Pintakerroksen puristuskestävyyttä heikentää pinta-alan vähenemisen lisäksi aukon reunaan tai nurkkaan syntynyt jännityshuippu. Aukollisen sandwich-elementin kuormaa voidaan osittain siirtää elementtien pitkittäisten ponttien avulla naapurielementeille. Ääritilanteissa aukon alue on vahvistettava tai aukollisen elementin kuormat siirrettävä runkorakenteelle apukehän avulla. Tarkempia ohjeita aukkojen vaikutuksen huomioonottamisesta suunnittelussa antavat elementtien toimittajat.

## 8 Laskentaesimerkkejä

### Laskuesimerkki 1 (yksiaukkoinen seinäelementti)

#### E.1.1 Poikkileikkaus (kuva E1)

Ulkopintakerros

$$E_{F1} = 210000 \text{ N/mm}^2,$$

$$\nu_{F1} = 0.3, \alpha_{F1} = 0.000012 \text{ 1/}^\circ\text{C},$$

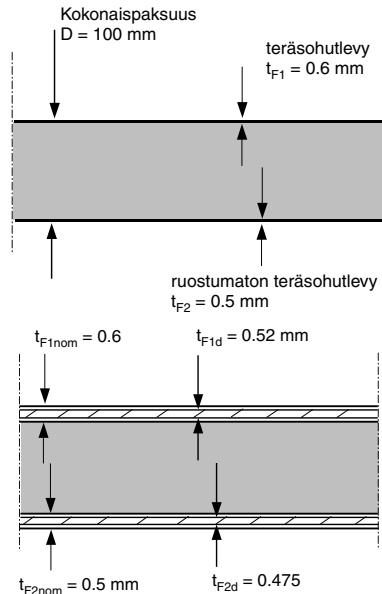
$$f_{y1} = 350 \text{ N/mm}^2$$

Sisäpintakerros

$$E_{F2} = 200000 \text{ N/mm}^2,$$

$$\nu_{F2} = 0.3, \alpha_{F2} = 0.000016 \text{ 1/}^\circ\text{C},$$

$$f_{y2} = 200 \text{ N/mm}^2$$



Kuva E1. a) Seinäelementin poikkileikkaus ja b) pintakerrosten nimelliset paksuudet ja laskentapaksuudet, jotka tässä esimerkissä on määritetty paksuuden normaalitoleranssiarvojen avulla.

Kokeellisesti määritetty pintakerroksen puristuslujuuden (lommahduslujuuden) ominaisarvo, tässä sama arvo molemmille pintakerroksille  $f_{Fc} = 120 \text{ N/mm}^2$

Ydinkerros

$$E_c = 5.0 \text{ N/mm}^2, G_c = 4.0 \text{ N/mm}^2 (T=20^\circ\text{C})$$

Kokeellisesti määritetty ydinkerroksen puristus- ja leikkauslujuuden ominaisarvo  $f_{Cc} = 0.12 \text{ N/mm}^2, f_{Cv} = 0.10 \text{ N/mm}^2$

Elementin läpi poratun kiinnikkeen vetokestävyyden ominaisarvo, määritetty kokeellisesti  $R_t = 2.5 \text{ kN/ruuvi}$

Elementin leveys  $B = 1200 \text{ mm}$

Poikkileikkauksarvot

$$e_c = 100 - (0.6 + 0.5)/2 = 99.45 \text{ mm}$$

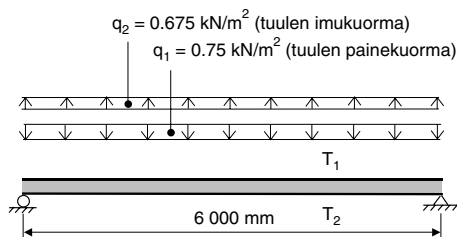
$$(I_{F1} \approx 0, I_{F2} \approx 0)$$

Poikkileikkauksen taiputus- ja leikkausjäykkyys

$$B_s = \frac{E_{F1} t_{F1} E_{F2} t_{F2}}{E_{F1} t_{F1} + E_{F2} t_{F2}} e_c^2 = 502.5 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2/\text{m}$$

$$S = G_c e_c = 397.8 \cdot 10^3 \text{ N/m}$$

### E.1.2 Staattinen rakenne, jännemitta, tukileveys ja kuormat (kuva E2 ja E3)

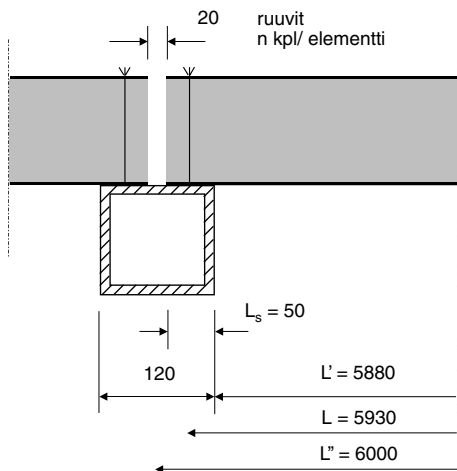


Kuva E2. Staattinen systeemi ja kuormat.

Seinäelementtiä kuormittaa tuulen nopeuspaine; positiivinen ja negatiivinen painekuorma. Pintakerrosten välinen lämpötilaero otetaan huomioon käyttörajatilatarkastelussa;

- kesällä  $T_1 = 65^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 25^\circ\text{C}$  (vaalea ulkopintakerros)
- talvella  $T_1 = -30^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 20^\circ\text{C}$  (suomalaiset olosuhteet)

Oletetaan, että elementtien valmistuslämpötila on  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ .



Kuva E3. Jännemitta ja tukileveys.

### E.1.3 Jännitysresultantit, jännitykset ja siirtymät

$$M_{q1} = q_1 L^2 / 8 = 0.75 \cdot 5.93^2 / 8 = 3.297 \text{ kNm/m}$$

$$\sigma_{F1} = M_{q1} / e_c t_{F1d} = 3.297 \cdot 10^3 / 99.45 \cdot 0.52 = 63.75 \text{ N/mm}^2$$

$$M_{q2} = q_2 L^2 / 8 = -0.675 \cdot 5.93^2 / 8 = -2.967 \text{ kNm/m}$$

$$\sigma_{F2} = |M_{q2}| / e_c t_{F2d} = 2.967 \cdot 10^3 / 99.45 \cdot 0.475 = 62.81 \text{ N/mm}^2$$

$$V_{q1} = q_1 L / 2 = 0.75 \cdot 5.88 / 2 = 2.205 \text{ kN/m}$$

$$\tau_c = V_{q1} / e_c = 2.205 / 99.45 = 0.0222 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{q1} = q_1 L / 2 = 0.75 \cdot 6.00 / 2 = 2.25 \text{ kN/m}$$

$$F_{q2} = q_2 L / 2 = -0.675 \cdot 6.00 / 2 = -2.025 \text{ kN/m}$$

$$w_{q1} = \frac{5}{384} \frac{q_1 L^4}{B_s} + \frac{1}{8} \frac{q_1 L^2}{S} = \frac{5}{384} \frac{0.75 \cdot 5.93^4 \cdot 10^{12}}{502.5 \cdot 10^9} + \frac{1}{8} \frac{0.75 \cdot 5.93^2 \cdot 10^6}{397.8 \cdot 10^3} = 32.32 \text{ mm}$$

$$w_{q2} = \frac{5}{384} \frac{q_2 L^4}{B_s} + \frac{1}{8} \frac{q_2 L^2}{S} = -\frac{5}{384} \frac{0.675 \cdot 5.93^4 \cdot 10^{12}}{502.5 \cdot 10^9} - \frac{1}{8} \frac{0.675 \cdot 5.93^2 \cdot 10^6}{397.8 \cdot 10^3} = -29.09 \text{ mm}$$

$$w_{T, \text{kesä}} = \frac{(\alpha_{F2}(T_2 - T_0) - \alpha_{F1}(T_1 - T_0))L^2}{8 \cdot e_c} = \frac{(0.000016 \cdot (25 - 20) - 0.000012 \cdot (65 - 20))5.93^2 \cdot 10^6}{8 \cdot 99.45} = -20.33 \text{ mm}$$

$$w_{T, \text{talvi}} = \frac{(\alpha_{F2}(T_2 - T_0) - \alpha_{F1}(T_1 - T_0))L^2}{8 \cdot e_c} = \frac{(0.000016 \cdot (20 - 20) - 0.000012 \cdot (-30 - 20))5.93^2 \cdot 10^6}{8 \cdot 99.45} = 26.52 \text{ mm}$$

## E.1.4 Käyttörajoitustarkastelu

$$w_{talvi} = \psi_1 w_{q1} + \psi_0 w_{T,talvi} =$$

$$0.75 \cdot 32.32 + 0.6 \cdot 26.52 =$$

$$40.15 \text{ mm} < L/100 = 59.3 \text{ mm}$$

$$w_{kesä} = \psi_1 w_{q2} + \psi_0 w_{T,kesä} =$$

$$|-0.75 \cdot 29.09 - 0.6 \cdot 20.33| =$$

$$34.02 \text{ mm} < L/100 = 59.3 \text{ mm}$$

## E.1.5 Murtorajatilatarkastelu

$$\sigma_{F1d} = \gamma_F \sigma_{F1} = 1.50 \cdot 63.75 =$$

$$95.6 \text{ N/mm}^2 \approx f_{Fc} / \gamma_M = 120 / 1.25 =$$

$$96 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{F2d} = \gamma_F \sigma_{F2} = 1.50 \cdot 62.81 =$$

$$94.2 \text{ N/mm}^2 < f_{Fc} / \gamma_M = 120 / 1.25 =$$

$$96 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{Cd} = \gamma_F \tau_C = 1.50 \cdot 0.0222 =$$

$$0.0333 \text{ N/mm}^2 < f_{Cv} / \gamma_M = 0.1 / 1.25 =$$

$$0.080 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{Ccd} = \gamma_F F_1 / (L_s + \min(e_c, 100 \text{ mm}) / 4) =$$

$$1.50 \cdot 2.25 / (50 + 99.45 / 4) =$$

$$0.0451 \text{ N/mm}^2 < f_{Cv} / \gamma_M =$$

$$0.12 / 1.25 = 0.096 \text{ N/mm}^2$$

$$n = \frac{|\gamma_F \cdot B \cdot F_{q2}|}{R_t / \gamma_{M,ruuvi}} = \frac{1.50 \cdot 1.2 \cdot 2.025}{2.5 / 1.33} = 1.94$$

kaksi ruuvia elementin päässä tarvitaan tuulen imukuormaa vastaan

Havaitaan, että laskuesimerkissä mitoitettavaksi jännitystilaksi muodostuu ulko- ja sisäpintakerroksen puristusjännitys murtorajatilassa. Puristusjännitysten suunnitteluarvot ovat likimain puristuslujuuden (lommahduslujuuden) suuruus.

## Laskuesimerkki 2

### E.2.1 Poikkileikkaus (kuva E4)

Ulkopintakerros, profiloitu

$$E_{F1} = E_F = 210000 \text{ N/mm}^2,$$

$$\nu_{F1} = \nu_F = 0.3,$$

$$\alpha_{F1} = \alpha_F = 0.000012 \text{ } 1/^{\circ}\text{C},$$

$$f_{y1} = 350 \text{ N/mm}^2$$

Sisäpintakerros, tasainen

$$E_{F2} = E_F = 210000 \text{ N/mm}^2,$$

$$\nu_{F2} = \nu_F = 0.3,$$

$$\alpha_{F2} = \alpha_F = 0.000012 \text{ } 1/^{\circ}\text{C},$$

$$f_{y2} = 220 \text{ N/mm}^2$$

Kokeellisesti määritetty pintakerroksen puristuslujuuden arvo alapintakerrokselle

$$f_{Fc} = 100 \text{ N/mm}^2$$

Ydinkerros

$$E_c = 4.0 \text{ N/mm}^2, G_c = 3.0 \text{ N/mm}^2 \text{ (T=20}^{\circ}\text{C)}$$

Virumisluvut lumikuormaa ja omapainoa vastaan;

$$\phi_{lumi} = 2.4, \phi_{oma} = 7$$

Kokeellisesti määritetty ydinkerroksen puristus- ja leikkauslujuuden ominaisarvo

$$f_{cc} = 0.12 \text{ N/mm}^2, f_{cv} = 0.10 \text{ N/mm}^2$$

Elementtien välsiin pituussaumoihin sijoitettujen kiinnikkeiden vetokestävyuden ominaisarvo, määritetty kokeellisesti

$$R_t = 3.0 \text{ kN/kiinnike}$$

Kattoelementin leveys B = 900 mm.

Poikkileikkausarvot

$$d = 125 - (0.5 + 0.6) / 2 = 124.45 \text{ mm}$$

$$d_1 = 45 \text{ mm}$$

$$s_w = (12.5^2 + d_1^2)^{0.5} = 46.7 \text{ mm}$$

$$d_{l1} = \frac{95 + s_w}{95 + 60 + 2 \cdot s_w} d_1 = 25.67 \text{ mm}$$

$$d_{l2} = d_1 - d_{l1} = 19.33 \text{ mm}$$

$$A_{F1} = t_{F1d} (60 + 95 + 2 \cdot s_w) / 0.18 = 731.42 \text{ mm}^2 / \text{m}$$

$$I_{F1} =$$

$$t_{F1d} (60 \cdot d_{l1}^2 + 95 \cdot d_{l2}^2 + 2s_w (d_1/2 - d_{l1})^2 + 2s_w d_1^2 / 12) / 0.18 =$$

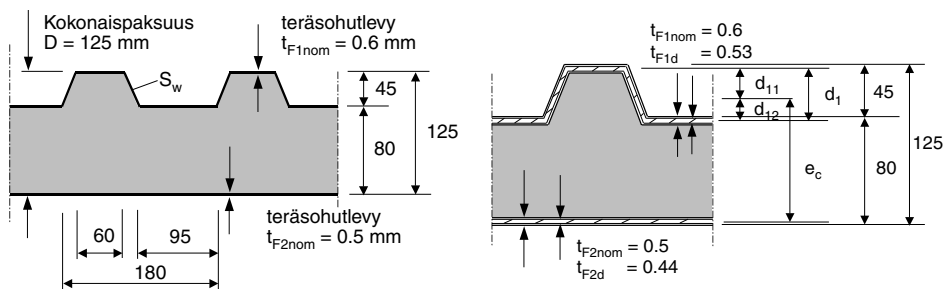
$$27.01 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 / \text{m}$$

$$B_{F1} = E_F I_{F1} = 5.672 \cdot 10^{10} \text{ Nmm}^2 / \text{m}$$

$$A_{F2} = t_{F2d} = 440 \text{ mm}^2 / \text{m}$$

$$I_{F2} \approx 0$$

$$e_c = d - d_{l1} = 98.78 \text{ mm}$$



Kuva E4. a) Kattoelementin poikkileikkaus ja b) pintakerrosten nimelliset paksuudet ja laskentapaksuudet, jotka tässä esimerkissä ovat ns. taattuja paksuuksia.

Poikkileikkauksen taivutus- ja leikkausjäykkyys

$$B_s = E_F \frac{A_{F1} A_{F2}}{A_{F1} + A_{F2}} e_c^2 = 56.29 \cdot 10^{10} \text{ Nmm}^2/\text{m}$$

$$S = G_c e_c = 296.3 \cdot 10^3 \text{ N/m}$$

## E.2.2 Poikkileikkauksen kestävyys

Yläpintakerroksen puristuslujuus (ks. CIB 2000)

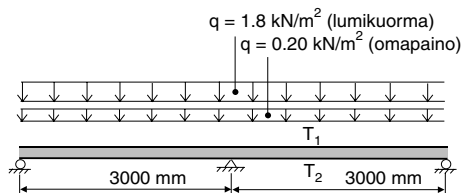
|                                                                                             | ylälaippa<br>$b_{11} = 60 \text{ mm}$ | alalaippa<br>$b_{12} = 95 \text{ mm}$ |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| $b/t_{F1d}$                                                                                 | 113.2                                 | 179.2                                 |
| $R_c = 0.35 \left( \frac{b}{t_{F1d}} \right)^3 \frac{(E_c G_c)^{0.5}}{E_F}$                 | 8.377                                 | 33.25                                 |
| $K_\sigma = (16 + 7R_c + 0.002R_c^2)^{0.5}$                                                 | 8.65                                  | 15.84                                 |
| $\sigma_{cr} = K_\sigma \frac{\pi^2 E_F}{12(1-\nu_F^2)} \left( \frac{t_{F1d}}{b} \right)^2$ | 128.06                                | 93.58                                 |
| $\bar{\lambda}_p = (f_{y1}/\sigma_{cr})^{0.5}$                                              | 1.653                                 | 1.934                                 |
| $f_{Fc} = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left( 1 - \frac{0.22}{\bar{\lambda}_p} \right) f_{y1}$ | 183.5                                 | 160.4                                 |

Yläpintakerroksen profiilin uuman leikkauskestävyys (ks. CIB 2000)

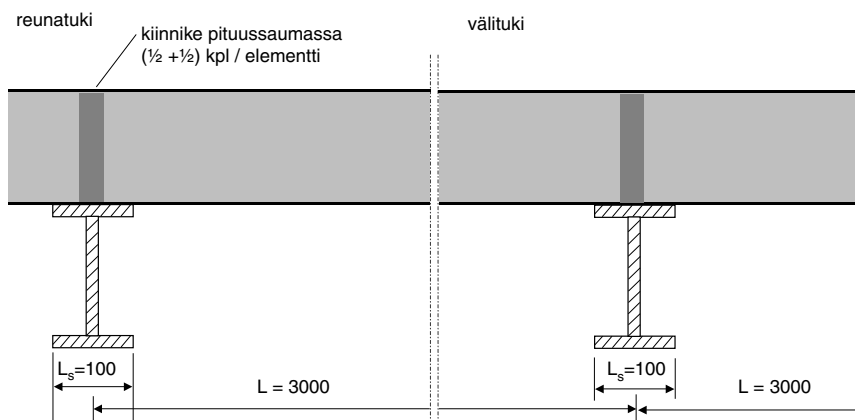
$$\bar{\lambda}_w = 0.346 \frac{s_w}{t_{F1d}} \left( \frac{f_{y1}}{E_F} \right)^2 = 1.245$$

$$f_{F1v} = \frac{0.48}{\bar{\lambda}_w} f_{y1} = 135.0 \text{ N/mm}^2$$

### E.2.3 Staattinen rakenne, jännemitat, tukilevydet ja kuormat (kuva E5)



Kuva E5. Staattinen systeemi ja kuormat.



Kuva E6. Jännemitat ja tukilevydet.

Kattoelementtiä kuormittaa omapaino ja lumi-kuorma sekä pintakerrosten välisestä lämpötila-erosta aiheutuvat rasitukset (kattoelementtiä kuormittava tuulikuorma on tässä esimerkin yksinkertaistamiseksi jätetty huomiotta).

Pintakerrosten lämpötilat käyttö- ja murtorajatilataarkasteluissa:

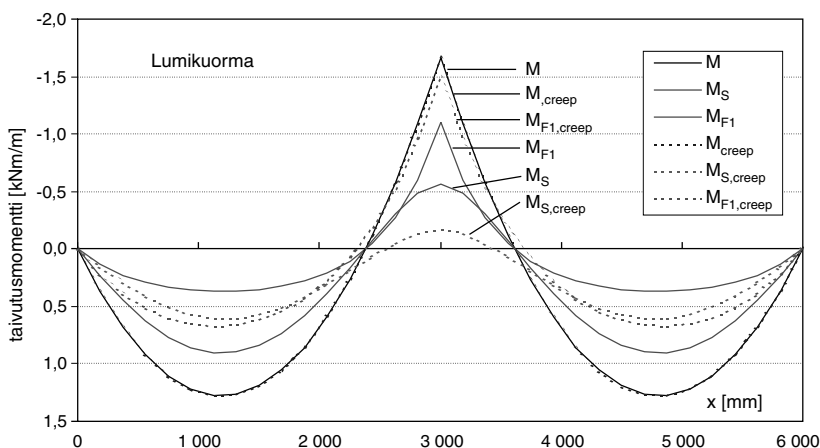
- kesällä  $T_1 = 80^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 25^\circ\text{C}$  (väriltään tumma ulkopintakerros)
- talvella  $T_1 = -30^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 20^\circ\text{C}$  (suomalaiset olosuhteet).

### E.2.4 Jännitysresultantit, jännitykset ja siirtymät

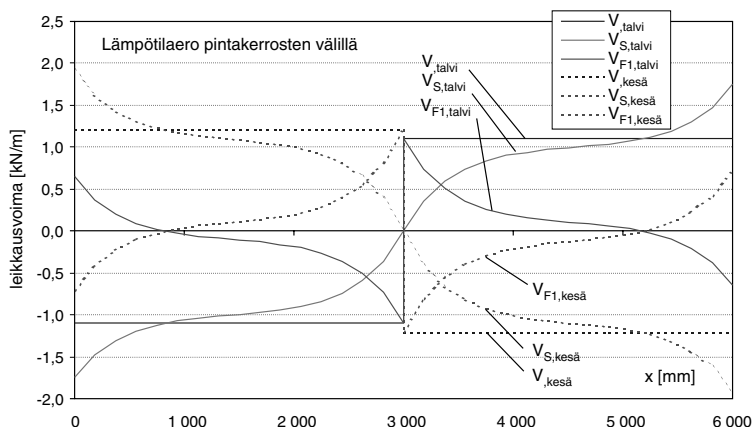
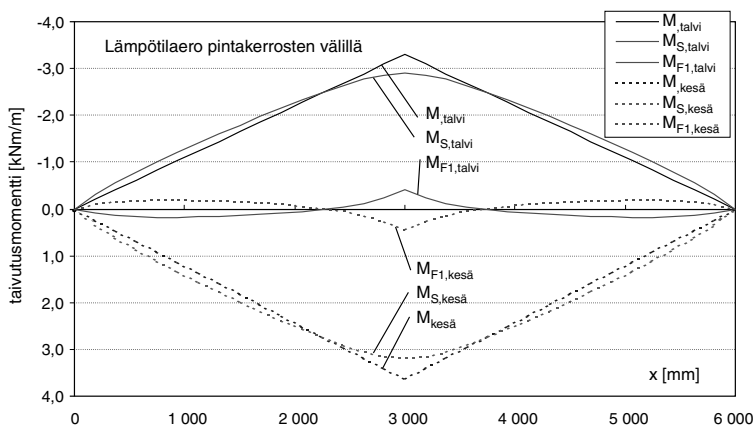
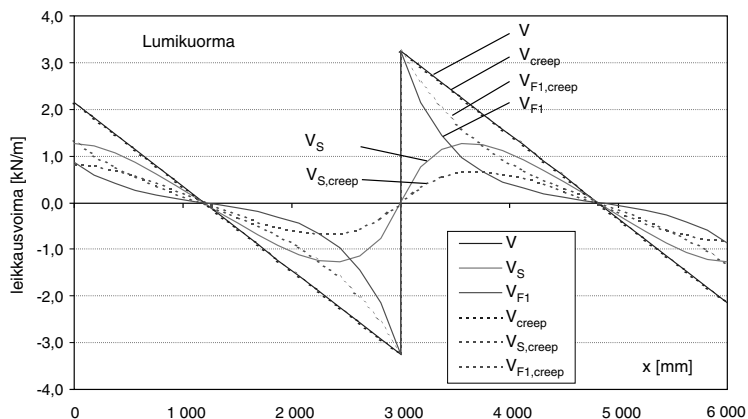
Paksukuorisen kattoelementin tukireaktiot, taiputusmomentit ja leikkausvoimat sekä pintakerroksen normaali- ja leikkausjännitykset on laskettu VTT:ssä kehitetyllä ns. tarkkaan elementtimenetelmään perustuvalla PASANO-ohjelmalla (Westerlund 1987) (kuva E7). Käyttörajoissa kattoelementtiä tarkastellaan kaksiaukkoisena jatkuvana sandwich-palkkina ja murtorajatilassa kahtena yksiaukkoisena vapaasti tuettuna sandwich-palkkina (taulukot E1 ja E2).

Taulukko E1. Kaksiaukkoisen kattoelementin määräävät jännitykset, tukireaktiot ja taipumat. Omasta painosta ja lumikuormasta aiheutuneet vaikutukset on laskettu alkutilassa liukukertoimen hetkellisen arvon perusteella. Lisäksi on laskettu ydinkerroksen leikkausvirumisesta näihin vaikutuksiin aiheutuvat muutokset. Lämpötilaeroista aiheutuneet vaikutukset on laskettu hetkellisen liukukertoimen arvon perusteella.

|                         | $\sigma_{F11}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_{F12}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_{F2}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $\tau_{F1}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $\tau_C$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $F_2$<br>(kN/m) | $w$<br>(mm) |
|-------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------|-------------|
| omapaino                | 12.62                                  | -7.77                                  | -1.45                                 | -1.32                               | 0.0014                           | 0.724           | 0.56        |
| omapaino<br>viruminen   | 5.88                                   | -5.70                                  | 1.32                                  | -0.01                               | -0.0009                          | 0.008           | 0.65        |
| lumikuorma              | 113.58                                 | -69.90                                 | -13.02                                | -11.83                              | 0.0129                           | 6.512           | 5.08        |
| lumikuorma<br>viruminen | 32.33                                  | -33.32                                 | 9.15                                  | 0.00                                | -0.0046                          | -0.003          | 3.56        |
| lämpötilaero<br>kesä    | -86.94                                 | -12.56                                 | 73.26                                 | 4.40                                | 0.0195                           | -2.420          | -2.48       |
| lämpötilaero<br>talvi   | 79.03                                  | 11.42                                  | -66.60                                | -4.00                               | -0.0177                          | 2.200           | 2.25        |



Kuva E7. Kaksiaukkoisen sandwich-palkin taivutusmomentti- ja leikkausvoimapintoja. (kuva jatkuu seuraavalla sivulla)



Kuva E7. (jatkoa edelliseltä sivulta)

Taulukko E2. Yksiaukkoisen kattoelementin määräävät jännitykset ja tukireaktiot.

|                         | $\sigma_{F11}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_{F12}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_{F2}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $\tau_{F1}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $\tau_C$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $F_1$<br>(kN/m) |
|-------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------|
| omapaino                | -7.26                                  | 1.14                                   | 4.02                                  | 0.37                                | 0.0020                           | 0.30            |
| omapaino<br>viruminen   | -7.52                                  | 7.72                                   | -2.11                                 | 0.39                                | -0.0011                          | 0.00            |
| lumikuorma              | -65.30                                 | 10.27                                  | 36.16                                 | 3.37                                | 0.0179                           | 2.70            |
| lumikuorma<br>viruminen | -35.18                                 | 36.14                                  | -9.85                                 | 1.91                                | -0.0053                          | 0.00            |
| lämpötilaero<br>kesä    | 26.75                                  | -27.48                                 | 7.49                                  | -3.00                               | 0.0084                           | 0.00            |
| lämpötilaero<br>talvi   | -24.32                                 | 24.98                                  | -6.81                                 | 2.73                                | -0.0076                          | 0.00            |

### E.2.5 Käyttörajatilata tarkastelu (kaksiaukkoisen jatkuva sandwich-palkki)

Tässä esitetään vain määrääviä kuormitustapauksia koskevat jännitys- ja siirtymätarkastelut.

Pintakerroksen puristusjännityksen ja tukireaktion yhteisvaikutus (saksalainen malli /CIB 2000/)

pintakerroksen puristusjännitys; omapaino + lämpötilaero talvella (-30°C, +20°C)

$$\sigma_{F2,g} + \sigma_{F2,Talvi} = |-1.45 - 66.60| = 68.05 \text{ N/mm}^2 < \frac{0.9 f_{Fc}}{\gamma_M} = \frac{0.9 \cdot 100}{1.1} = 81.8 \text{ N/mm}^2$$

ydinkerrokseen kohdistuva tukireaktio; omapaino + lumi + lämpötilaero talvella (0°C, +20°C)

$$\frac{F_{2,g} + F_{2,q} + F_{2,Talvi} + F_{2,g,creep}}{L_s} = \frac{0.724 + 6.512 + (20/50) \cdot 2.200 + 0.008}{100} = 0.0812 < \frac{0.71 \cdot f_{Cc}}{\gamma_M} = \frac{0.71 \cdot 0.120}{1.0} = 0.0852 \text{ N/mm}^2$$

Pintakerroksen puristusjännityksen ja tukireaktion yhteisvaikutus (suomalainen malli, /Martikainen & Hassinen 1996/)

kuormitusyhdistelmä; omapaino + lumi + lämpötilaero talvella (0°C, +20°C)

$$\left( \frac{F_2}{(F_{R2}/\gamma_M)} \right) - \sqrt{1 - \frac{\sigma_{F2}}{(f_{F2c}/\gamma_M)}} = \left( \frac{0.724 + 6.512 + (20/50) \cdot 2.20}{0.12 \cdot (100 + 0.5 \cdot 98.78)/1.1} \right) - \sqrt{1 - \frac{|-1.45 - 13.02 - (20/50) \cdot 66.60|}{(100/1.1)}} = -0.242 < 0$$

Kiinnikkeiden vetovoima välituella; omapaino + lämpötilaero kesällä

$$B(F_{2,g} + F_{2,T kesä}) = 0.9 \cdot |0.724 - 2.42| = 1.526 \text{ kN} < R_i/\gamma_M = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 3.0/1.0 = 3.0 \text{ kN}$$

Ydinkerroksen leikkausjännitys; omapaino + lämpötilaero kesällä

$$\tau_{C,g} + \tau_{C,T kesä} = 0.0014 + 0.0195 = 0.0209 \text{ N/mm}^2 < f_{Cv}/\gamma_M = 0.10/1.0 = 0.10 \text{ N/mm}^2$$



Taipuma; omapaino + viruminen + lumikuorma + viruminen + lämpötilaero talvella (0°C, +20°C)

$$w_g + w_{g,creep} + w_q + w_{q,creep} + w_{T,talvi} = \\ 0.56 + 0.65 + 5.08 + 3.56 + (20/50) \cdot 2.25 = \\ 10.8 \text{ mm} = L/279 < L/100$$

Käyttörajatilassa alapintakerroksen puristuslujuus ja ydinkerroksen määräämä tukireaktiokes-tävyys muodostuvat määrääviksi. Välituen alu-teen murtumisen jälkeen kaksiaukkoisen raken-ne muuttuu kahdeksi yksiaukkoiseksi palkiksi, joiden mallien perusteella suoritetaan murtora-jatilataarkastelut.

### E.2.6 Murtorajatilatarkastelu (yksiaukkoinen sandwich-palkki)

Yläpintakerroksen puristusjännitys jännemitan puolivälissä; omapaino + viruminen + lumi-kuorma + viruminen + lämpötilaero talvella (0°C, +20°C). Profiloitun pintakerroksen lai-pan puristuslujuuden suunnitteluvarvo määritet-täessä käytetään pintakerroksen myötäämiselle annettua aineosavarmuuslukua.

$$\gamma_G \sigma_{F11,g} + \gamma_Q (\sigma_{F11,lumi} + \psi_0 \sigma_{F11,talvi}) + \\ \gamma_{creep} (\sigma_{F11,g,creep} + \sigma_{F11,lumi,creep}) = \\ 1.35 \cdot 7.26 + 1.5 (65.3 + 1.0 (20/50) 24.32) + \\ 1.0 (7.52 + 35.18) = 165.0 \text{ N/mm}^2 \approx f_{F11c} / \gamma_M = \\ 183.5 / 1.1 = 166.8 \text{ N/mm}^2$$

Alapintakerroksen vetojännitys jännemitan puo-livälissä; omapaino + lumikuorma

$$\gamma_G \sigma_{F2,g} + \gamma_Q \sigma_{F2,lumi} = 1.35 \cdot 4.02 + 1.5 \cdot 36.16 = \\ 59.6 \text{ N/mm}^2 < f_{y2} / \gamma_M = 220 / 1.1 = 200 \text{ N/mm}^2$$

Ydinkerroksen leikkausjännitys tuella; omapai-no + lumikuorma

$$\gamma_G \tau_{C,g} + \gamma_Q \tau_{C,lumi} = 1.35 \cdot 0.0020 + 1.5 \cdot 0.0179 = \\ 0.0296 \text{ N/mm}^2 < f_{Cv} / \gamma_M = 0.10 / 1.25 = 0.08 \text{ N/mm}^2$$

Profiloitun pintakerroksen uuman leikkausjän-nitys tuella; omapaino + viruminen + lumikuor-ma + viruminen + lämpötilaero talvella (0°C, +20°C)

$$\gamma_G \tau_{F1,g} + \gamma_Q (\tau_{F1,lumi} + \psi_0 \tau_{F1,talvi}) + \\ \gamma_{creep} (\tau_{F1,g,creep} + \tau_{F1,lumi,creep}) = \\ 1.35 \cdot 0.37 + 1.5 (3.37 + 1.0 (20/50) 2.73) + \\ 1.0 (0.39 + 1.91) = 9.5 \text{ N/mm}^2 < f_{F1v} / \gamma_M = \\ 135 / 1.1 = 122.7 \text{ N/mm}^2$$

Ydinkerroksen puristusjännitys tuella; omapai-no + lumikuorma

$$\frac{\gamma_G F_{1,g} + \gamma_Q F_{1,lumi}}{L_s + 0.25 \cdot e_c} = \frac{1.35 \cdot 300 + 1.5 \cdot 2700}{100 + 0.25 \cdot 98.78} = \\ 0.0426 \text{ N/mm}^2 < f_{Cc} / \gamma_M = 0.12 / 1.25 = 0.096 \text{ N/mm}^2$$

Kiinnikkeiden vetokuorma; ei negatiivisia tuki-reaktioita murtorajatilassa.

Havaitaan, että laskuesimerkissä mitoittava jän-nitystila syntyy murtorajatilassa profiloitun yläpintakerroksen ylälaippaan, jossa puristus-jännityksen suunnitteluvarvo on suunnilleen pu-ristuslujuuden suuruinen. Kiinnikkeiden kestä-vyystarkastelussa on käytännössä otettava huo-mioon lisäksi kattotasoon vaikuttavan tuulen imukuorman aiheuttamat tukireaktiot, jossa tar-kastelussa käytetään lauseketta

$$B(\gamma_G F_{1,g} + \gamma_Q F_{1,lumi}) = \\ B(1.0 \cdot F_{1,g} + 1.5 \cdot F_{1,lumi}) \leq n \cdot R_t / \gamma_{M,kiinnike} = \\ n \cdot R_t / 1.33$$

## KIRJALLISUUSLUETTELO

European Recommendations for Sandwich Panels. CIB/ECCS Report Publication 257. 2000.

European Recommendations for Sandwich Panels. ECCS Publication No. 115, 2001.

Eurocode 1 1994. Basis of design and actions on structures. Part 1 Basis of Design, ENV 1991-1.

European Committee for Standardization, Self-supporting double skin metal faced insulating sandwich panels – factory made products – Specification. prEN-14509.

EOTA, Draft of ETA-Guidelines of Self-supporting Composite Lightweight panels, Part 1: General and Part 2: Specific aspects relating to Self-supporting Composite Lightweight Panels for use in roofs (Draft).

Lightweight sandwich construction (Ed. by J.M. Davies). Blackwell Science 2001.

Martikainen, L. & Hassinen, P., Load-bearing capacity of continuous sandwich panels. Helsinki University of Technology, Department of Structural Engineering. Report 135. Espoo 1996.

Rautaruukki Oy, Suunnittelijan opas 2000.

SFS-EN 485-2: 1994 Alumiini ja alumiiniseokset. Levyt ja nauhat. Osa 2: Mekaaniset ominaisuudet.

SFS-EN 485-4: 1993 Alumiini ja alumiiniseokset. Levyt ja nauhat. Osa 4: Kylmävalssattujen tuotteiden mitta- ja muototoleranssit.

SFS-EN 1172: 1996 Kupari ja kupariseokset. Levyt ja nauhat rakennuskäyttöön.

SFS-EN 10088: 1995 Ruostumattomat teräkset. Osa 2: Yleiseen käyttöön tarkoitettavat levyt ja nauhat. Tekniset toimitusehdot.

SFS-EN 10143: 1993 Jatkuvatöimimisellä kuumapötusmenetelmällä metallipinnoitetut ohutlevyteräkset. Mitta- ja muototoleranssit.

SFS-EN 10147: 1995 Kuumasinkityt ohutlevyteräkset. Tekniset toimitusehdot.

SFS-EN 10214: 1995 Jatkuvatöimimisellä kuumapötusmenetelmällä sinkki-alumiinipinnoitetut (ZA) ohutlevyteräkset. Tekniset toimitusehdot.

SFS-EN 10215: 1995 Jatkuvatöimimisellä kuumapötusmenetelmällä alumiini-sinkkipinnoitetut (AZ) ohutlevyteräkset. Tekniset toimitusehdot.

SFS-EN 10259: 1997 Kylmävalssatut ruostumattomat leveät teräsnauhat ja -levyt. Mitta- ja muototoleranssit.

Stamm K. & Witte H., Sandwichkonstruktionen. Springer-Verlag 1974.

Tolva, I. & Jumppanen, P., Solupolystyreeni-tyminen sandwich-rakenne. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedonanto no. 10. Espoo 1980.

Westerlund, A., Analysering av viskoelastisk sandwichbalk med finit elementmetod. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu 1987.

Zenkert, D., An introduction to sandwich construction. EMAS Ltd. 1995.