

TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta  
Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan laitos  
Talonrakennustekniikka

Markus Suutarinen

**Matalaenergiarakentamiseen soveltuvat  
betonijulkisivuelementit asuinrakennuksissa**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa  
1.12.2008

Työn valvoja: Professori Jari Puttonen

Työn ohjaaja: DI Arto Suikka

<b>Tekijä:</b>	Markus Suutarinen		
<b>Diplomityö:</b>	Matalaenergiarakentamiseen soveltuvat betonijulkisivuelementit asuinrakennuksissa		
<b>Päivämäärä:</b>	1.12.2008	<b>Sivumäärä:</b>	125+ 35
<b>Professori:</b>	Talonrakennustekniikka	<b>Koodi:</b>	Rak-43
<b>Valvoja:</b>	Professori Jari Puttonen		
<b>Ohjaaja:</b>	DI Arto Suikka		
<b>Avainsanat:</b>	betoniulkoseinäelementti, energiatehokkuus, lämmöneristys, matalaenergiarakentaminen, matalaenergiatalo, passiivitalo		
<p>Diplomityön lähtökohtana oli selvittää, miten betonisten ulkoseinäelementtien lämmöneristävyyttä voidaan parantaa. Nykyisiin betoniulkoseinäarakenteisiin perehdyttiin kirjallisuuden ja haastatteluiden sekä määräyksien ja ohjeiden avulla. Nykyisten lämmöneristeiden kehittymismahdollisuudet selvitettiin eristevalmistajille tehdyillä haastatteluilla ja ulkoseinäelementtien valmistamiseen tutustuttiin elementtitehtaalla.</p> <p>Tutkimuksen tarkastelussa olivat sandwich-, eriytetty- ja eristerapattu ulkoseinä rakenne. Ulkoseinäarakenteille laskettiin tarvittavat lämmöneristepaksuudet U-arvoille 0,16; 0,14 ja 0,10 käyttäen lämmöneristeiden uusia ennustettuja suunnittelulämmönjohtavuuksia. Lämmöneristepaksuuksien perusteella voitiin määrittää elementin toimintaan ja valmistukseen aiheutuvat muutokset. Lisäksi selvitettiin muovieristeiden käytön aiheuttamia valmistus- ja kustannusteknisiä muutoksia.</p> <p>Tutkimuksen perusteella seinäelementin lämmöneristävyyden parantaminen on mahdollista tehokkaampaa eristemateriaalia ja paksumpaa eristepaksuutta käyttäen, kylmäsiltoja vähentämällä sekä liitosten ilmatiiveyttä parantamalla. Eristepaksuus tulee olemaan seinän U-arvoon 0,16 pääsemiseksi keskimäärin 1,5-kertainen nykyiseen verrattuna. Vastaavasti eristepaksuus tulee olemaan U-arvoon 0,14 pääsemiseksi 1,75-kertainen ja U-arvoon 0,10 2,5-kertainen. Mineraalivillaa käyttäen tarvitaan selvästi suuremmat eristepaksuudet kuin muovipohjaisia eristeitä, varsinkin polyuretaania, käyttäen.</p> <p>Muovipohjaisien eristeiden käyttöä seinäarakenteessa rajaavat palomääräykset kerrosluvun sekä julkisivun ja tuuletusrakoon rajoittuvan materiaalin paloluokituksen mukaan. Lämmöneristävyyden parantaminen aiheuttaa muutoksia erityisesti seinäelementin kantokykyyn, kosteuskäyttäytymiseen, ääniominaisuuksiin, liitoksiin, kuorien välisiin kiinnikkeisiin ja nostojärjestelmiin sekä elementtien valmistukseen ja kuljetukseen. Elementin kylmäsiltojen vähentäminen on mahdollista kuorien välisien kiinnikkeiden jakoväliä tai kiinniketyyppejä sekä ikkuna- ja oviliitosta muuttamalla.</p> <p>Lämmöneristävyyden parantaminen lisää nopeasti elementin valmistuskustannuksia kasvavan eristemäärän ja siitä aiheutuvan muotti- ja kuljetuskustannusten nousun vuoksi. Tämän kustannusnousun merkitys on kuitenkin asuinrakennuksen rakennuskustannuksiin nähden suhteellisen vähäinen.</p>			

<b>Author:</b>	Markus Suutarinen		
<b>Thesis:</b>	The Precast concrete facing elements applying to low-energy housing		
<b>Date:</b>	December 1, 2008	<b>Number of pages:</b>	125+35
<b>Professorship:</b>	Structural Engineering	<b>Code:</b>	Rak-43
<b>Supervisor:</b>	Professor Jari Puttonen		
<b>Instructor:</b>	Arto Suikka M.Sc.(Tech)		
<b>Key Words:</b>	precast concrete facing element, energy efficiency, thermal insulation, low-energy construction, low-energy house, passive house		
<p>The purpose of this master's thesis was to examine, how thermal insulation could be made better by new precast concrete facing elements. The procedure of precast concrete facing elements was studied through literature, standards and general directions. The information was gathered by interviewing manufacturers and specialists. The possibilities of developing current insulation materials were studied by interviewing manufacturers. The manufacture of precast concrete facing elements was observed at an element factory.</p> <p>The structure types of this research were sandwich, differentiated and plaster facades. The calculated U-values 0,16; 0,14 and 0,10 for different insulating layers were based on predictable values of thermal conductivity. Calculating the thickness of insulation layers made it possible to determine any changes of the function and manufacture of elements. A study was also carried out on how the use of plastic insulation materials affects the technology of manufacture and costs.</p> <p>On the basis of the research it is possible to achieve better thermal insulation of precast concrete facing elements by using more efficient insulation materials or thicker insulating layers, by reducing the amount of cold bridges and by improving the joints. The insulating layer will be more than 1.5 times thicker compared to present structures, when the U-value of a wall is 0,16. Correspondingly, the U-value of 0,14 is achieved when the insulating layer is 1,75 times the thickness it is today and 0,10 when the insulating layer is 2,5 times thicker compared to present structures. When using mineral wool a clearly thicker insulating layer is needed. Plastic insulation materials, especially polyurethane, have better thermal insulation capacity than mineral wool, which is why less insulating material is needed.</p> <p>The use of plastic insulation materials in walls is restricted by fire regulations, according to which the building can have only eight floors. These regulations also control the use of facing materials of walls and surface materials in air gaps. Improving the thermal insulation will change the bearing capacity of wall elements, the procedure of building physics, joints of elements, connectors of panels, lifting systems of sandwich elements as well as the manufacture and transportation of elements. The amount of cold bridges can be reduced when the distribution of connections is bigger. Likewise, changing the connector and the structure of window and door joints will reduce the amount of cold bridges.</p> <p>Better thermal insulation will raise the production costs of elements due to the increased amount of insulation material, mould and transportation costs. On the other hand raising of costs is quite little compared to building costs of multi-storey residential house.</p>			

## **Alkusanat**

Tämä diplomityö on Betonikeskus ry:n toimeksiantona tehty selvitys betoniulkoseinäelementtien lämmöneristävyyden parantamiseksi ja sen vaikutuksien selvittämiseksi seinärakenteen toimintaan ja valmistukseen.

Kiitän työn valvojaa prof. Jari Puttosta Teknillisestä korkeakoulusta ja työn ohjaajaa dipl.ins. Arto Suikkaa Betonikeskus ry:stä hyvästä yhteistyöstä ja asiantuntevasta avusta työn aikana. Kiitän myös työn ohjausryhmän jäseniä Betonikeskus ry:n elementtijaoksesta sekä kaikkia muita henkilöitä, jotka ovat myötävaikuttaneet tämän työn syntyy.

Esitän kiitoksen SBK- säätiölle työn taloudellisesta tukemisesta.

Espoossa 1.12.2008

Markus Suutarinen

## Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
Käsitteet ja merkinnät	7
1. Johdanto	9
1.1 Tutkimuksen tavoite	10
1.2 Tutkimusmenetelmä	11
1.3 Rajaukset	11
2. Nykyiset betonijulkisivut	12
2.1 Betonisandwich- seinärakenne	13
2.1.1 Rakenteellinen toiminta	14
2.1.2 Rakennusfysikaalinen toiminta	23
2.2 Eriytetty betonijulkisivu	26
2.2.1 Rakenteellinen toiminta	27
2.2.2 Rakennusfysikaalinen toiminta	32
2.3 Eristerapattu julkisivu	33
2.3.1 Rakenteellinen ja rakennusfysikaalinen toiminta	36
2.4 Valmistus- ja työmaateknikka	38
3. Lämmöneristemateriaalit	40
3.1 Lämmöneristeiden valmistus ja käyttö betonisissa ulkoseinissä	42
3.2 Lämmöneristeiden ominaisuudet	45
3.3 Lämmöneristeiden kehitysmahdollisuudet	53
3.4 Tulevaisuuden lämmöneristeitä	55
4. Lämmöneristeiden paksuuden kasvaminen	58
4.1 U-arvon laskenta seinärakenteelle	58
4.2 Seinärakenteen lämmöneristeiden paksuudet eri U-arvoilla	63
4.3 Eristepaksuuden ja -materiaalin vaikutukset seinärakenteeseen	69
5. Kylmäsiltojen vähentäminen	86
5.1 Ulkokuoren kannattelevat kiinnikkeet	86
5.2 Ikkuna- ja oviliitos	97
5.3 Nostolenkit	99

6. Ilmatiiveys	103
7. Valmistustekniset muutokset	105
7.1 Sandwich- elementti	105
7.2 Eriytetty seinärakenne (sisäkuorielementti)	108
7.3 Eristerapattu seinärakenne (sisäkuorielementti)	109
7.4 Eristemateriaalien valmistustekniset erot	110
8. Kustannusvaikutus	111
9. Yhteenvedo	118
10. Lähdeluettelo	122

#### Liitteet

1. Lämmöneristepaksuudet sandwich- seinärakenteelle	1
2. Lämmöneristepaksuudet eriytetylle seinärakenteelle	4
3. Lämmöneristepaksuudet eristerapatulle seinärakenteelle	7
4. Sandwich- seinärakenteen lämpötilajakaumat eri eristepaksuudella	9
5. Diagonaaliinsaana käyttöaste eri jakoväleillä	11
6. Ansa- ja ankkurikiinnikkeiden ominaisuuksia	17
7. Asuinkerrostalon seinärakenteelle tulevat kuormat	18
8. Ikkunaliitosdetaljit	20
9. Lämmöneristyksen kustannusmuutos sandwich- elementti	31
10. Sandwich- elementin nostojärjestelmän kustannusmuutos	32
11. Lämmöneristyksen kustannusmuutos eriytetty seinärakenne	34
12. Lämmöneristyksen kustannusmuutos ohuteristerapattu elementti	35

## Käsitteet ja merkinnät

### Käsitteet

Diffuusio	=	ilmiö, jossa konsentraatioerot, pyrkivät tasoittumaan.
Konvektio	=	lämmön kuljettumistapa, joka aiheutuu lämpötilaeroista.
Normirakennus	=	Tavanomainen, nykyiset määräykset täyttävä rakennus
Matalaenergiarakentaminen	=	Tapa suunnitella ja rakentaa normitaloa vähemmän lämmitysenergiaa tarvitseva rakennus.
Matalaenergiarakennus	=	Rakennus, jonka vuotuinen lämmitysenergian tarve on 40...50 kWh/m <sup>2</sup> riippuen maantieteellisestä sijainnista. Lämmitysenergian kulutus matalaenergiarakennuksessa on noin puolet normirakennuksen kulutuksesta
Pakkovoima	=	Voima, joka voi syntyä rakenteen estetyistä muodonmuutoksista sisäisesti, tässä työssä liittyy lämpötilan ja kosteuden vaihteluun tai betonin kutistumaan
Passiivienergiarakennus	=	Rakennus, jonka vuotuinen lämmitysenergian tarve on 15...30 kWh/m <sup>2</sup> riippuen maantieteellisestä sijainnista
Sisäkuori	=	Elementin kuorirakenne, joka rajoittuu rakennuksen sisätilaan päin
Ulkokuori	=	Elementin kuorirakenne, joka rajoittuu rakennuksen ulkotilaan päin

### Käytetyt merkinnät

$\lambda$	=	lämmönjohtavuus [W/(mK)]
dB	=	äänenvoimakkuuden dimensioton yksikkö suhteessa referenssitason äänen painetasoon
Q	=	lämpövirta[W]
q	=	lämpövirran tiheys [W/m <sup>2</sup> ]

R =	lämmönvastus [(m <sup>2</sup> K)/W]
RH =	ilman suhteellinen kosteus
U =	lämmönläpäisykerroin [W/(m <sup>2</sup> K)]
v =	nopeus [m/s]
δ <sub>p</sub> =	vesihöyryn läpäisevyys (vesihöyryn osapaineen ollessa potentiaalina) [kg/msPa]



# 1. Johdanto

Energian hinnan ja ympäristöllisten arvojen korostuessa energian kulutusta on saatava vähennettyä. Suomen vuotuisesta energiankulutuksesta rakennukset kuluttavat noin 40 %, josta lämmittämisen osuus on noin 55 %. Loput rakennuksiin tarvittavasta energiasta kuuluu pääosin kodin sähkölaitteisiin ja käyttöveden lämmittämiseen. Kodin sähkölaitteiden energiankulutuksen osuus on yhä kasvamassa.

Rakennusten energiankulutusta on pystyttävä pienentämään erilaisilla rakenneratkaisuilla ja teknologisilla keinoilla. VTT:n tutkimusten perusteella on todettu, että lämmitysenergian kulutusta voidaan vähentää suunnittelemalla ja rakentamalla tiiviimpiä ja paremmin lämpöä eristäviä rakennuksia (Viinikainen S. et al. 2007). Tällöin puhutaan ns. matala- ja passiivienergiarakentamisesta, jossa rakennuksen vaippa on nykyistä normirakennusta paremmin lämmöneristetty ja tiiviimpi.

Suomessa on valtiovallan taholta esitetty lämmöneristysmääräysten tiukentamista asuinrakennuksissa 30...40 %:a vuoden 2010 alusta. Tämän jälkeen on alustavasti luvassa vuonna 2012 vielä lisää tiukennuksia, jolloin lämmöneristysmääräykset olisivat kiristyneet noin 60...70 % nykyisien määräyksien tasosta. Tämä kehitys tulee osaltaan aiheuttamaan sen, että nykyisiä rakenneratkaisuja joudutaan muuttamaan lähitulevaisuudessa.

Tämän työn tarkoituksena on selvittää, miten nykyisiä betonielementtiulkoseinärakenteita voidaan kehittää paremmin lämpöä eristäviksi siten, että ne voivat täyttää vuoden 2010 alusta voimaantulevat lämmöneristysmääräykset sekä mahdollisesti tämän jälkeen seuraavat lämmöneristysmääräykset. Tutkimuksen tarkastelussa ovat betonisandwich-, eriytetty- (sisäkuorirakenne), sekä eristerapattu ulkoseinärakenne.

Betonisandwich- seinärakenteella tarkoitetaan kerrosrakennetta, jossa lämmöneristeen kummallakin puolella on levynä betonikuori. Lämmöneristeen läpi tulevat mekaaniset kiinnittimet, joilla betonikuoret sidotaan yhteen ja siten lämmöneriste puristuu betonikuorien väliin.

Eriytetyllä betoniulkoseinärakenteella tarkoitetaan rakennetta, jossa betoninen ulkoseinä kootaan työmaalla kerroksittain esivalmistetuista osista siten, että vähintään sisä- ja ulko-

kuori rakennetaan eriaikaisesti. Betoninen ulkokuori voi olla mekaanisesti sisäkuoreen kiinnitetty tai se voi olla itsekantava rakenne. Eriytetyssä betonijulkisivurakenteessa sisä- ja ulkokuori eivät kuitenkaan toimi liittorakenteen tavoin.

Eristerapatulla betoniulkoseinärakenteella tarkoitetaan ulkoseinärakennetta, joka koostuu betonisesta kantavasta sisäkuoresta, joka on valmistettu elementeistä, eristekerroksesta ja rappauksesta. Eristerappaus voi olla joko kolmikerrosrappaus tai ohuteristerappaus.

## 1.1 Tutkimuksen tavoite

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, miten voidaan parantaa asuinrakennuksen julkisivuelementtien lämmöneristävyyttä sekä selvittää siitä aiheutuvat mahdolliset ongelmat betonisandwich- elementin, eriytetyn sekä eristerapatun julkisivurakenteen toimintaan ja valmistamiseen. Tutkimuksessa on tarkoitus selvittää lähitulevaisuuden käyttökelpoiset lämmöneristysmateriaalit, sekä verrata niiden ominaisuuksia keskenään. Lämmöneristeiden lämmönjohtavuuden perusteella määritetään tarvittavat eristepaksuudet. Rakenteiden kylmäsiltojen aiheuttamia lämpövuotoja tutkitaan ja niiden vähentämiseksi pyritään löytämään ratkaisuja. Tarvittavan lämmöneristyspaksuuden perusteella on tarkoitus määrittää mahdollisia seinäelementin rakenneratkaisuja sekä tarkastella lämmöneristeen paksuuden vaikutuksia seinärakenteen toimintaa. Tutkimuksen perusteella on tarkoitus luoda seinärakennerratkaisuja matalaenergiarakentamiseen soveltuvista betonielementtijulkisivuista sekä määrittää niiden vaatimat mahdolliset jatkokehitystarpeet. Kuvassa 1 on asuinrakennuksen ulkoseinärakenteena betonijulkisivuelementit.



**Kuva 1** Betonijulkisivuelementit asuinrakennuksen seinärakenteena

## **1.2 Tutkimusmenetelmä**

Tutkimus koostuu kirjallisesta ja soveltuvasta osasta. Kirjallisessa osassa perehdytään ensin ulkoseinärakenteena toimivien nykyisien betonijulkisivujen rakenneratkaisuihin sekä mahdollisiin lämmöneristemateriaaleihin. Tässä osassa tehdään myös materiaalivalmistajien haastatteluja. Soveltuvassa osassa määritetään laskennallisesti tarvittavat lämmöneristepaksuudet eri vaatimustasoille. Lisäksi tutkitaan rakenteiden kylmäsiltoja, sisä- ja ulkokuoren kiinnitysmahdollisuuksia sekä nostojärjestelmiä elementeille. Lisäksi pyritään selvittämään eri seinäelementtivaihtoehtojen valmistamisessa tapahtuvat muutokset sekä arvioimaan eristevaihtoehtojen valmistustekniset plussat ja miinukset. Tutkimuksen kirjallisen ja soveltuvan osan perusteella luodaan alustavia ratkaisuja, joilla voidaan toteuttaa matalaenergiarakentamiseen soveltuvia seinärakenteita sekä saadaan käsitys niiden kustannusrakenteesta ja jatkokehitystarpeista.

## **1.3 Rajaukset**

Tutkimus rajataan siten, että siinä tutkitaan nykyisten betoniulkoseinärakenteiden lämmöneristävyysparantamista. Umpinaisen ulkoseinärakenteen osalle tarvittavaa eristekerroksen paksuutta tarkastellaan laskennallisesti. Elementtien välisten liitosten lämmöneristävyttä ei käsitellä tässä työssä. Tutkimuksen lähtökohdaksi oletetaan tilanne, jossa betonikuorien paksuudet ovat nykykäytännön mukaiset ja lämmöneristekerroksen paksuus vaihtelee vaatimustason mukaisesti. Työssä ei tutkita ilmatiiveyden vaikutusta seinän energiatehokkuuteen, vaan pyritään toteamaan mitkä yksityiskohdat ovat tärkeitä itse seinäelementin ilmatiiveyden saavuttamisessa. Tutkimuksessa selvitetään seinän kosteusteknistä käyttäytymistä vain siinä laajuudessa kuin se vaikuttaa rakenteen periaateratkaisuun. Työhön ei kuulu betonielementtien kokonaisvaltainen mitoittaminen.

## 2. Nykyiset betonijulkisivut

Betonisen ulkoseinärakenteen energiatehokkuutta voidaan parantaa seinärakenteen lävitse tapahtuvia lämpövuotoja vähentämällä. Tällöin lämmöneristyksellä ja seinärakenteen ilmatiiveydellä tulee olemaan oleellinen merkitys. Seinärakenteen lämmöneristävyttä voidaan parantaa eristeen paksuutta ja eristävyttä kasvattamalla, kylmäsiltojen määrää vähentämällä, ilmatiiveyttä parantamalla sekä ikkunoiden ja ovien lämmöneristävyttä parantamalla. Lämmöneristekerroksen paksuuden kasvaessa kasvaa koko seinärakenteen paksuus, joka voi aiheuttaa muutoksia itse seinärakenteen toimintaan sekä sen valmistamiseen. Eristepaksuuden kasvaessa, muuttuu myös nykyinen vakiomittajärjestelmä. Eri-tyisesti seinärakenteen liitoksissa ja seinärakenteeseen liittyvissä rakenteissa voi tapahtua muutoksia. Jotta lämmöneristeen paksuutta ei välttämättä tarvitsisi kasvattaa, on tärkeää selvittää paremmin lämpöä eristävät eristemateriaalit sekä niiden ominaisuudet ja soveltuvuus betoniseinärakenteeseen. Tällöin tulee ensisijaisesti kyseeseen EPS- ja polyuretaanieristeet.

Seinärakenteen kylmäsiltoja vähentämällä voidaan rakenteen lävitse tapahtuvia lämpövuotoja saada osaltaan vähennettyä, jolloin lämmöneristävyys kasvaa. Kylmäsiltojen vähentäminen on kuitenkin vaikeaa, koska kylmäsiltoja aiheuttavat osat voivat muuten olla rakenteen toiminnan kannalta merkittäviä.

Seinärakenteen huono ilmatiiveys laskee vuotokohtaan kohdalla seinän lämmöneristävyttä ja siten sisäpinnan lämpötiloja, josta aiheutuu vedon tunnetta rakennuksen sisällä. Ilmavuotokohtiin on vaarana tiivistyä myös kosteutta, mikä voi vielä heikentää seinän lämmöneristävyttä. Seinärakenteen ilmatiiveydellä on laajempia vaikutuksia energiatehokkuuteen muun muassa ilmanvaihdon toiminnan kautta, joten, ilmatiiveys vaikuttaa seinärakenteen energiatehokkuuteen sekä välillisesti myös seinän lämmöneristävyteen. Tässä työssä ei arvioida ilmatiiveyden merkitystä ulkoseinien energiatehokkuuden parantamiseen, vaan pyritään enemmänkin arvioimaan kuinka ilmatiiveyttä voidaan parantaa ulkoseinäelementeissä lämmöneristävyden kannalta.

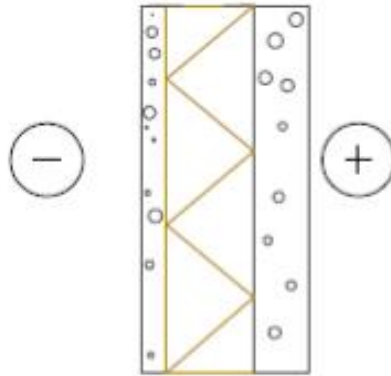
Ikkunat ja ovet ovat yleisesti seinärakenteen heikoimmin lämpöä eristävä osa, joten niiden lämmöneristävyttä tulisi periaatteessa parantaa voimakkaimmin. Ikkunoiden sijainti ja pinta-ala tulee kohdentaa rakennusten ulkoseinien ilmansuuntien mukaan siten, että au-

ringon säteilyenergiaa voidaan rakennuksen lämmityskaudella käyttää mahdollisimman paljon hyödyksi. Vastaavasti lämmityskauden ulkopuolella ikkunoiden ominaisuuksien ja sijainnin ilmansuuntiin nähden tulisi olla mahdollisimman paljon auringon säteilyä pois hylkivä, jotta rakennuksen lämpötila ei nousisi epämiellyttävän korkeaksi. Tässä työssä ei käsitellä itse ikkunan ja ovien lämmöneristävyyden parantamista, mutta niiden aiheuttamia liitoksia kylläkin.

Ulkoseinärakenteiden suunnittelua ja valmistamista ohjataan ja määrätään Suomen rakentamismääräyskokoelmassa. Ulkoseinien osalta energiatehokkuutta parannettaessa tulee kyseeseen erityisesti seinän lämpö-, kosteus-, ääni- ja palotekniikkaan sekä kantavien betonirakenteiden suunnitteluun ja valmistamiseen liittyvät kohdat. Seuraavassa esitellään nykyiset betonisandwich-, eriytetty ja eristerapatut ulkoseinärakenteet huomioiden niiden valmistamista lämmöneristävyyden kannalta rajaavat Suomen rakentamismääräyskokoelmassa esitetyt kohdat. Samalla tarkastellaan rakenteittain lämmöneristävyyden kasvusta aiheutuvia rakennemuutoksia, kylmäsillan vähentämismahdollisuuksia sekä yleisesti betonijulkisivuelementtien valmistus- ja työmaatekniikkaa.

## ***2.1 Betonisandwich- seinärakenne***

Betonisandwich- seinärakenteella tarkoitetaan esivalmistetuista betonisandwich elementistä koostuvaa seinärakennetta, jossa betonikuorien välissä on lämmöneriste. Seinärakenteessa ei ole lämmöneristeen ja betonisen ulkokuoren välissä yhtenäistä tuuletusrakoa, vaan seinän tuuletus hoidetaan tarvittaessa, lämmöneristysmateriaalista riippuen, eristeseen tehdyillä tuuletusurilla. Kuvassa 2 on poikkileikkaus betonisandwich- rakenteesta.



**Kuva 2 Betonisandwich- seinärakenteen pystyleikkaus**

Betonisandwich- elementeissä (myöhemmin sandwich- elementti) kummatkin betonikuoret sekä niiden välissä oleva lämmöneriste liitetään toisiinsa elementin valmistusvaiheessa elementtitehtaalla. Rakennustyömaalla tehtäväksi työkse jää vain elementtien asennus sekä liitoksien rakentaminen.

Sandwich- elementissä ulkokuoren paksuus on Suomessa tavallisesti 70...85 mm ja sisäkuoren paksuus 80...150 mm riippuen onko elementti ei-kantava tai kantava. Lämmöneristeinä on käytetty pääasiassa uritettua ja urasuojattua mineraalivillaa sen helpon asennettavuuden ja hyvän palonkestävyyden vuoksi. Muita lämmöneristeitä, kuten EPS ja polyuretaani (PUR), on käytetty vain yksittäisissä tapauksissa. EPS- ja polyuretaanieristeiden käyttö on ollut perusteltua etenkin maanvastaisissa seinissä tai sokkelielementissä suuremman puristuslujuuden ja vedenläpäisyvastuksen johdosta. EPS- ja polyuretaanieristeet ovat kuitenkin palavia eristeitä, joten niiden käyttö on määräyksiin rajoitettua.

### **2.1.1 Rakenteellinen toiminta**

Sandwich -elementissä kuormaa kantavana, puristettuna ja taivutettuna rakenneosana toimii yleensä aina elementin sisäkuori. Ulkokuori sidotaan mekaanisilla kiinnittimillä, sideraudoituksella eli ansailla sisäkuoren betoniin. Ansaidden ominaisuuksista riippuen kuorien välille voi muodostua joko eriasteista yhteistoimintaa tai ei lainkaan yhteistoimintaa (Olin.J, et.al, 1981). Ansaidden tehtävänä on ensisijaisesti ulkokuoren kannatus sekä tarvittaessa kuorien välille syntyvän yhteistoiminnan varmistaminen, siten että ulkokuorelle tulevat painekuormat (tuulen- ja maanpaine) pystyvät siirtymään sisäkuorelle ja

ulkokuori pysyy ryhdissään. Painekuormia voi käytännössä siirtää myös kuorien välissä oleva lämmöneristekerros. Lämmöneristekerroksen kyky siirtää painekuormia riippuu lähinnä eristeen puristuslujuudesta. Ansaiden tehtävänä on lisäksi estää ulkokuoren liiallinen kaareutuminen elementin keskikohdalla sekä elementin reunoilla. Ansaiden tiheällä jakovälillä voi ansastus muodostua niin jäykäksi, että vaaraksi voi tulla silloin suurien pakkovoimien syntyminen rakenteeseen kosteus- ja lämpötilaerojen seurauksena. Tämän vuoksi ansaiden jakoväli ei saa olla hirvittävän tiheä.

Ulkokuorelle tulee ulkoisia kuormituksia ja rasituksia lähinnä elementin omasta painosta, tuulesta ja elementin kuljetuksesta. Ulkokuoren oma paino aiheuttaa veto- ja puristusjännityksiä ansaisiin. Ansaita suositellaan laittamaan tasaisin jakovälein koko elementin alalla, jotta jännitykset ansaisiin, ulko- ja sisäkuoreen pysyvät suhteellisen pieninä ja jännityskeskittymiä ei pääse syntymään. Ulko- ja sisäkuoren rasitukset ovat riippuvaisia riipustuspisteiden määrästä ja sijainnista. Siksi on teknisesti järkevää käyttää kiinnikkeitä tasaisin välimatkoin. Tavallisesti asuinrakennuksessa ulkokuoren korkeus on noin 3000 mm ja nykyinen ansasväli 600 mm ulkokuoren paksuuden ollessa 70 mm. Tällöin ansaiden sisäkuoren betoniin aiheuttama jännitys on alle 5 % betonin vetolujuudesta, joten ulkokuoren halkeiluriskiä ei juuri ole (RTT, 1998, Uudet betonijulkisivurakenteet).

Sandwich- elementin tyypillinen pituus on 1...8 metriin ja korkeus 1...4 metriin. Sandwich- elementin pituuden kasvattaminen aiheuttaa käytönaikaisia ongelmia, koska ulkokuori kaareutuu pituussuunnassa lyhyempää elementtiä enemmän. Elementtien korkeuden suunnassa tapahtuu kaareutumista myös, mutta huomattavasti vähemmän, koska tavallisesti ansastus on pystysuunnassa jäykempi.

### ***Ulkoiset ja sisäiset rasitukset***

Tuuli aiheuttaa elementin ulkokuorelle painekuormia, jotka välittyvät ansaiden ja ulkokuoren taivutuskestävyyden välityksellä sisäkuorelle. Tuulen paine on tavallisesti 0,5...1 kN/m<sup>2</sup>, riippuen tarkastelukohdan korkeudesta ja rakennuksen sijainnista. Ansaiden suhteellisen tiheästä jakovälistä (k600) johtuen tuulen paineen aiheuttama taivutusmomentti on vain noin 5 % ulkokuoren halkeilumomentista. Ansaille kohdistuva puristusjännitys on alle 10 % niiden myötölujuudesta. Lämmöneriste pystyy lisäksi välittämään osan tuulen aiheuttamasta painekuormasta, mutta lämmöneristeen kantaman kuorman osuutta on vaikea käytännössä määrittää. Tuulen painekuormasta aiheutuvat rasitukset eivät ole siis

merkittäviä rakenteen kestävyys- ja halkeilun kannalta. (RTT, 1998, Uudet betonijulkisivurakenteet s. 78)

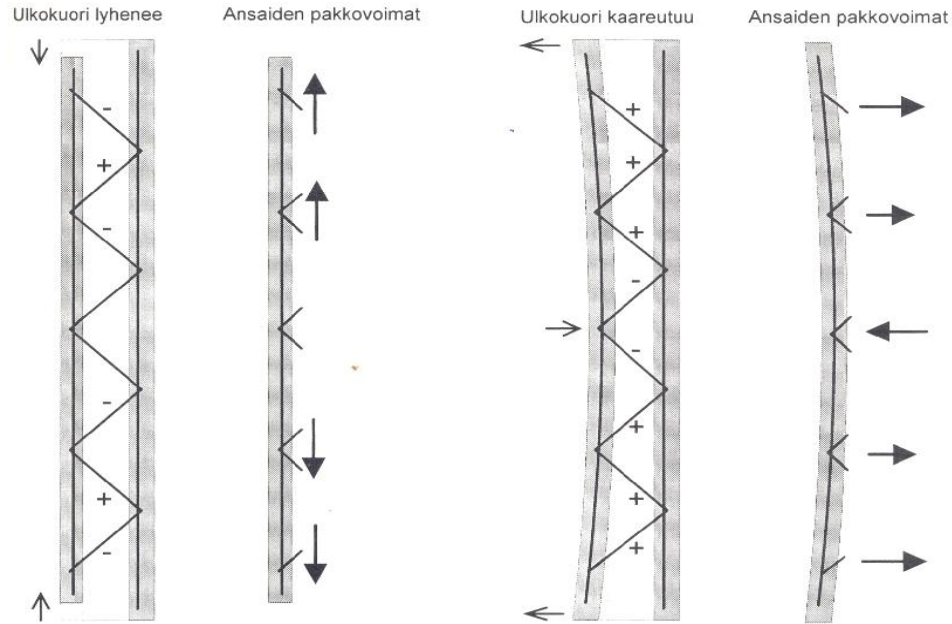
### ***Lämpötila- ja kosteusrasitukset sekä niistä aiheutuvat muodonmuutokset***

Ulkokuorelle tulee lisäksi sisäisiä rasituksia kosteuden ja lämpötilan vaihtelusta aiheutuvista muodonmuutoksista. Nämä usein jätetään perussuunnittelussa huomioimatta, mutta niillä voi olla yllättävän suurikin merkitys ulkokuoren rasitukseen. Kosteusrasitukset muodostuvat elementin valmistamisessa käytetyn betonin kutistumasta sekä ympäristön kosteuden vaihtelun aiheuttamista betonin muodonmuutoksista. Betonin kuivumiskutistuma tapahtuu vuosien kuluessa, ajan myötä hidastuen. Kutistuminen on suurimmillaan kovettumisen jälkeen ensimmäisen kuukauden aikana. Kutistuma aiheuttaa betoniin pysyvän lyhenemän. Kutistumaeroja esiintyy sisä- ja ulkokuorien välillä sekä ulkokuoren keskiosan ja reunojen välillä ja ne voivat olla paikoin suhteellisen suuriakin. Ympäristön kosteuden vaihteluista syntyvät betonin muodonmuutokset ovat luonteeltaan syklisiä ja vaihtelevat siten hyvin paljon.

Ympäristön lämpötilanvaihtelusta johtuen ulkokuorelle tulee muodonmuutoksia. Lämpötilan vaihteluista johtuvat rasitukset ovat ympäristön kosteusvaihteluiden tapaan myös syklisiä ja vaihtelevat paljon jo vuorokauden aikana. Varsinkin keväällä voi vuorokautinen lämpötilan vaihtelu olla luokkaa 20 °C. Vuoden aikana ulkokuoren lämpötila vaihtelee tavallisesti -30...+50 °C riippuen ulkokuoren väristä. Ulkokuoren värin ollessa tumma absorboi se enemmän auringon säteilyä ja ulkokuoren ulkopinta voi lämmetä kuumanä kesäpäivänä jopa lähelle +50 °C. Kuitenkin ulkokuoren sisäpinta on ulkopintaa kylmempi, mistä aiheutuu lämpötilaero. Lämpötilaero pintojen välillä voi olla -12...+5 °C siten, että miinusasteet tarkoittaa ulkokuoren sisäpinnan olevan ulkopintaa kylmempi. Tällöin muodostuu lämpötilaeroja rakenneosien välille, mikä aiheuttaa muodonmuutoksia rakenteeseen. Tutkimusten mukaan lämpötilaeroista syntyvät muodonmuutokset ovat kuitenkin betonin kutistumasta syntyviin muodonmuutoksiin nähden pieniä. Lämpötilan ja kosteuden vaihteluista johtuen ulkokuorelle ja ansaille tulevat rasitukset voivat olla normaaliolosuhteissa jo hyvin suuria. Tällöin rasitukset voivat aiheuttaa ulkokuoreen halkeilua sekä ansaille jännityksiä, jotka ylittävät materiaalin myötörajan (RTT 1998, Uudet betonijulkisivurakenteet).



Ulkokuoren tason suuntainen liike ja kaareutuminen aiheuttavat betonikuorien välissä oleville ansaille pakkovoimia, koska ansaat luonnollisesti pyrkivät estämään ulkokuoren muodonmuutoksia. Pakkovoimat ovat sitä suurempia, mitä jäykemmin rakenne vastustaa muodonmuutoksia. Sandwich- rakenteen jäykkyyteen vaikuttaa ansaiden lukumäärä ja niiden toimintatapa sekä onko betonirakenne halkeillut vai ei. Kuvassa 3. on esitetty ulkokuoren estetyistä muodonmuutoksista aiheutuvat pakkovoimat diagonaali-ansaille.



**Kuva 3 Betonisandwich-elementin ulkokuoren liikkeet ja ansaihin aiheutuvat pakkovoimat (RTT. 1998. Uudet betonijulkisivurakenteet)**

Sandwich- elementissä ulkokuoren pakkovoimat ovat määrääviä rakenteen halkeilun kannalta, koska rakenne mitoitetaan kestämään ulkoiset kuormat halkeilemattomana. Yleensä ulkokuoren tason suuntaisesta liikkeestä syntyvät rasitukset ovat pieniä, koska ansaat voivat joustavat niin paljon, että kuoreen ei pääse syntymään halkeaman aiheuttavia vetojännityksiä. Ulkokuoren kutistumasta aiheutuva kuorien kaareutuminen aiheuttaa merkittäviä pakkovoimia, koska ansaiden jäykkyys rajoittaa kaareutumista on melko suuri. Tällöin tästä aiheutuvat taivutusrasitukset ulkokuorelle ovat myös suuria (RTT 1998, Uudet betonijulkisivurakenteet).

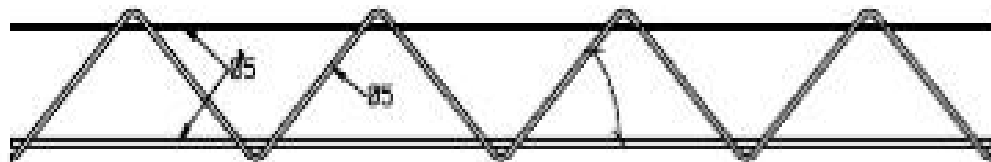
### ***Ansaat***

Ansaiden suuri jäykkyys tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa estää tehokkaasti ulkokuoren kaareutumista ja aiheuttaa sen vuoksi myös suuret pakkovoimat rakenteeseen.

Ansaiden jäykkyydellä ei ole tutkimusten mukaan merkitystä näkyvien halkeamien syntyyn ulkokuoressa. Jäykemmällä ansastuksella halkeamat leviävät vain laajemmalle alueelle. (RTT, 1998, Uudet betonijulkisivurakenteet)

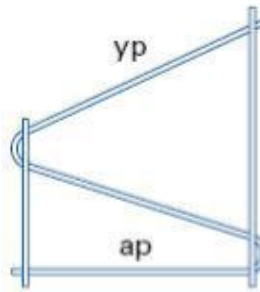
Sandwich- elementeissä käytetään pääasiassa diagonaaliansaita sekä vähäisessä määrin pistokkaita sitomaan betonikuoret yhteen. Kiinnikkeiden suunnittelussa on huomioitava, että elementtiä nostettaessa vaaditaan nostolenkeiltä nelinkertainen varmuus murtumista vastaan. (Ympäristöministeriö 2005, RakMK B4) Tällöin sama vaatimus koskee myös kuorien välisiä kiinnikkeitä, jotta ulkokuori ei pääse elementin nostojen aikana irtoamaan kiinnityksen murtuessa. Käytännön syistä johtuen (mm. ulkokuoren kaareutumisesta) ansaiden varmuus murtumista vastaan voi kuitenkin olla jopa lähes seitsemänkertainen ulkokuoren omaan painoon nähden. Ansaiden jakoväli ei saa olla liian harva, koska taivutusrasitukset kuoren leveyssuunnassa voivat kasvaa liian suuriksi. Tämän vuoksi ansaan jakoväli saa olla tavallisesti enintään 1200 mm (RTT, 1998, Uudet betonijulkisivurakenteet).

Diagonaaliansaita käytetään lähes koko elementin korkeudelta sitomaan betonikuoret yhteen. Diagonaaliansaita käytetään ensisijaisesti pintaan nähden pystysuorassa, mutta tarvittaessa myös vaakasuunnassa. Diagonaaliansaita käyttäen betonikuoret saadaan toimimaan yhdessä siten, että elementin puristuskapasiteettia voidaan kasvattaa, koska elementti voi toimia tällöin paksumpana rakenteena. Diagonaaliansas ottaa tartuntaa kummastakin betonikuoresta 20...30 mm:n syvyydeltä. Diagonaaliansasaiden jakoväli on 600 mm elementin keskellä, mutta elementin reunoilla enintään 300 mm:ä, jotta elementin reunakäyristyminen ei kasva liian suureksi. Kuvassa 4 on esitetty diagonaaliansas.



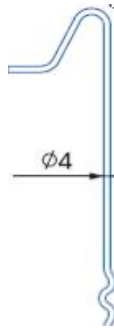
**Kuva 4 Diagonaaliansas (www.anstar.fi)**

Diagonaaliansasaiden johdannaisena on syntynyt ns. palkkiansas, jota käytetään matalammissa seinäelementin kohdissa, ikkuna- tai ovipalkeissa ikkunan ja oven yläpuolella, sitomaan betonikuoret yhteen. Kuvassa 5 on esitetty palkkiansas.



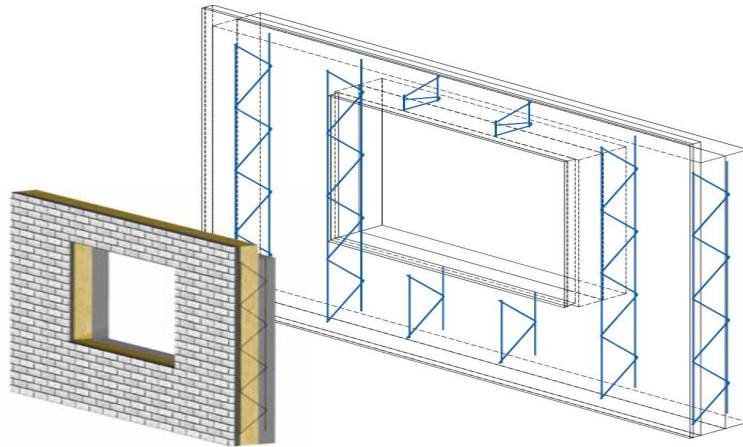
**Kuva 5 Palkkiansas (www.peikko.fi)**

Pistoansaita eli pistokkaita käytetään pääasiassa vain EPS ja polyuretaanieristeiden kanssa sitomaan betonikuoret yhteen. Pistokkaita erityisesti käytetään elementin ja ikkunaukon reunoilla estämään elementin reunakäyritymistä. Pistokkaat ottavat vastaan vain vetojännityksiä, eristeen ottaessa vastaan puristusjännityksiä. Pistokkaan muotoilulla ala- ja yläpäällä saadaan riittävä tartunta betonista. Kuvassa 6 on esitetty pistokas.



**Kuva 6 Pistokkaan ala- ja yläreunan teräksen muotoilulla osalla saadaan tartunta betonista (www.peikko.fi)**

Diagonaali- ja palkkiansaiden sekä pistokkaiden käytössä muodostuu pistemäinen kylmäsilta aina kiinnikkeen kohdalle. Kylmäsiltojen suuruus riippuu kiinnikkeen dimensioista, jakovälistä, eristeen muodonmuutoskyvystä painautua kiinnikkeeseen kiinni sekä asennustyön huolellisuudesta. Kuvassa 7 on esitetty miten diagonaaliinsaajat ovat seinäelementissä.



**Kuva 7 Diagonaali- ja palkkiansaat sandwich- elementissä. Ansaiden kohdalle muodostuu pistemäisiä kylmäsiltoja**

Lämmöneristeen paksuuden kasvaessa ulkokuori siirtyy kauemmaksi sisäkuoresta, jolloin ansaiden korkeus tulee kasvamaan. Ansaiden korkeuden kasvaminen aiheuttaa myös ansaille tulevien rasiutusten lisääntymisen. Elementtiin syntyy ansaiden kohdalle melko paljon kylmäsiltoja suhteellisen tiheän ansaiden jakovälin vuoksi. Kylmäsiltojen vähentäminen ansaiden kohdalla on kuitenkin vaikeaa, koska ansaita tarvitaan rakenteellisesti.

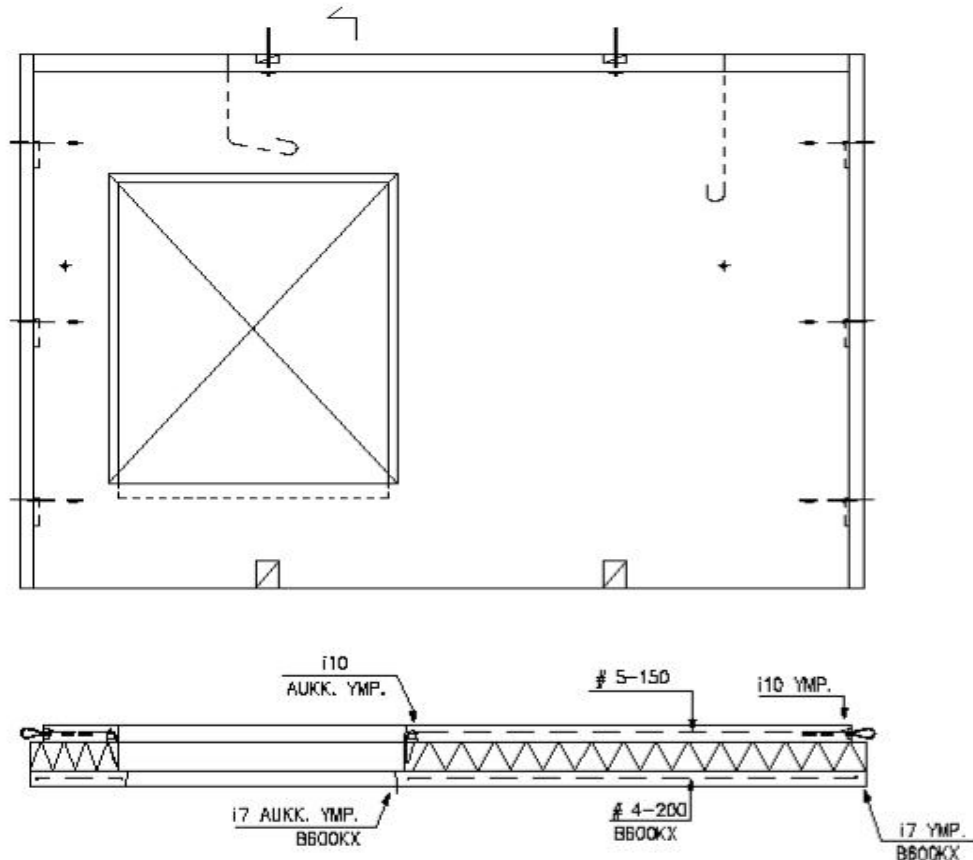
### ***Raudoitus***

Sandwich- elementissä betoniraudoitusta tarvitaan rakenteellisena raudoituksena, etenkin elementin sisäkuoressa, joka kantaa pysty- ja vaakakuormia ja osallistuu osaltaan rakennuksen jäykistämiseen. Ulkokuoren raudoituksen tehtävänä on sen sijaan riittävän varmuuden saaminen elementtien kuljetuksiin ja nostoihin (RTT, 1998, Uudet betonijulkisivurakenteet).

Sisäkuoren raudoitus muodostuu sille tulevien voimarasitusten perusteella. Raudoitteena käytetään pääasiallisesti tavallisia A500HW harjaterästankoja ja B500K teräsverkkoja. Asuinrakennuksien kantavissa ulkoseinärakenteissa ei käytetä tavallisesti verkkoraudoitusta kuin siinä tapauksessa, että seinä toimii rakennuksen jäykistävänä rakenteena. Eikantavan sandwich- elementin sisäkuoressa taas käytetään lähes aina verkkoraudoitusta.

Ulkokuoren tehtävänä on kantaa kuoren omapaino ja välittää tuulikuormat sisäkuorelle. Tällöin rakenteellisesti ulkokuoren raudoitustarve on vähäinen. Ulkokuorelle suurimmat rasitukset syntyvät lämpötilan ja kosteuden muutoksista. Rakenteellisesti ulkokuoreen ei

tarvittaisi raudoitusta ollenkaan, mutta kuljetusten ja onnettomuustilanteiden varalta siinä tulee olla reunateräkset sekä keskeinen verkkoraidoitus estämässä betonikappaleiden irtoamista ulkokuoresta.



**Kuva 8** Ei-kantavan sandwich- elementin raudoituspääruostus, vaakaleikkauksessa yläpuolinen betonikuori on elementin sisäkuori ([www.betoni.com](http://www.betoni.com))

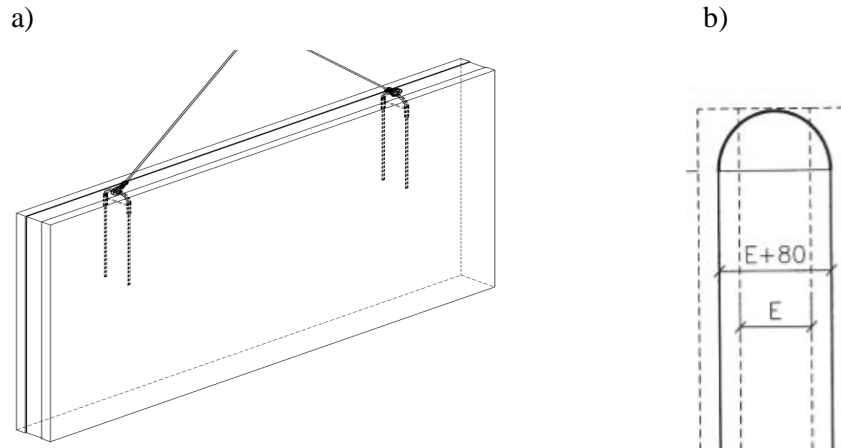
### *Nostolenkit*

Sandwich- elementtien nostolenkkeinä voidaan käyttää pyörötangosta valmistettua nostolenkkejä tai nostoankkureita. Nykyisin sandwich- elementtien nostoon käytetään:

- sandwich- nostolenkkejä
- sisäkuoresta nostavia pokattuja JB- tai PB- nostolenkkejä
- reikärauta-nostojärjestelmää

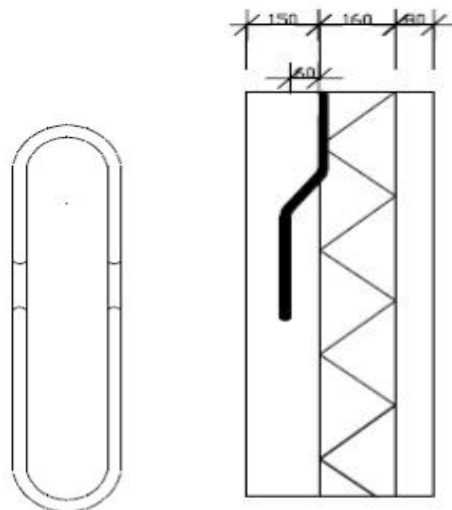
Suomessa käytetyin nostolenkkimalli on sandwich- nostolenkki, joka on kiinni sekä sisä- että ulkokuoressa. Ulkokuoren kiinnityksen ja lämmöneristekerroksen läpäisevyyden vuoksi lenkin materiaalin tulee olla usein ruostumatonta terästä. Sandwich- nostolenkillä saadaan nostopiste keskelle elementtiä ja elementti nousee suorassa. Sandwich- nosto-

lenkissä on kuorien välillä vaakasuora sauva, joka estää kuorien puristumisen nostotilanteessa. Kuorien välinen vaakasuora sauva nostolenkissä aiheuttaa kylmäsilan sandwich-rakenteeseen. Sandwich- nostolenkki on esitetty kuvassa 9.



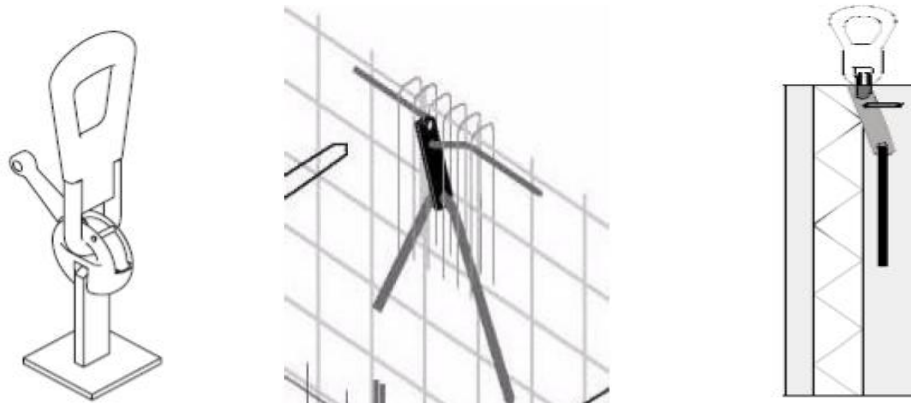
**Kuva 9 a) Sandwich- nostolenkit sandwich- elementissä b) poikkileikkaus sandwich- elementin nostolenkin kohdalta (www.peikko.fi, RTT, Nostolenkit ja ankkurit 2003)**

Pokatut JB- ja PB- nostolenkit ovat sandwich- elementin sisäkuoresta nostoon soveltuvia lenkkejä. Nostolenkit pokataan yläpäästään siten, että lenkin nostopiste asettuu hyvin lähelle sandwich- rakenteen painopistettä. Tällöin sandwich- elementti nousee suorassa. Pokattu nostolenkki voi olla tavallista hiiliterästä, koska se on elementin sisäkuoressa. Pokattu nostolenkki on esitetty kuvassa 10.



**Kuva 10 Sisäkuoresta nostava pokattu JB- tai PB- nostolenkki**

Reikärauta-nostojärjestelmässä nosto tapahtuu pokatun nostolenkin tavoin elementin sisäkuoresta. Reikärauta- nostojärjestelmässä elementin painopisteeseen on kiinnitetty reikärauta- kiinnike elementin sisäkuoresta. Reikärautaan kiinnitetään elementtiä nostettaessa sopiva nostoelin, jolloin elementin nostaminen on mahdollista. Reikärauta- nostojärjestelmä on kuvassa 11.

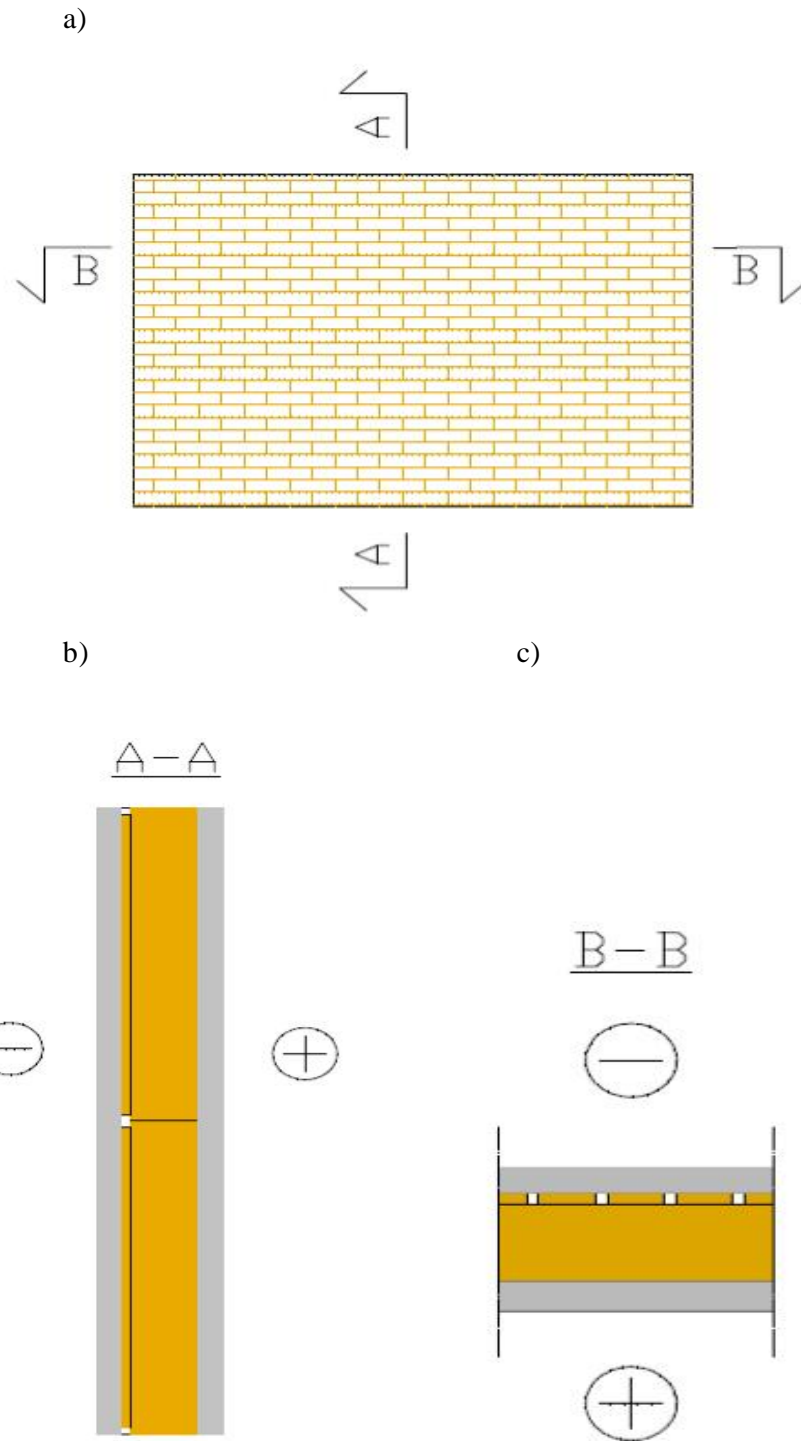


**Kuva 11 Reikärauta- nostojärjestelmä (www.peikko.fi, www.semtu.fi)**

### **2.1.2 Rakennusfysikaalinen toiminta**

Sandwich- seinärakenteeseen pääsee haitallista kosteutta juuri rakennusaikana, jolloin seinäelementit ovat ilman kunnollista lämmöneristeen sääsuojausta joko elementtitehtaan tai työmaan varastossa tai jo asennuspaikallaan. Rakennuksen käyttövaiheessa rakenteeseen muodostuu kosteutta vesihöyryn diffuusiolla ja kosteuskonvektiolla rakenteiden mahdollisista vuotoilmakohdista. Käytönaikainen kosteusrasitus on huomattavasti rakennusaikaista pienempi. Sandwich- rakenteen ulkokuoren taakse tiivistyy syksyllä ja talvella kosteutta, joka aina keväällä sekä kesällä kuivuu auringon säteilyn, ympäristön lämpötilan nousun ja suhteellisen kosteuden alenemisen myötä.

Sandwich- rakenteessa kosteuden kuivuminen tapahtuu mineraalivillaa lämmöneristeenä käytettäessä haihtumalla ulkokuoren lävitse sekä tuuletusurien kautta. Tuuletusurien koko mineraalivillaeristeessä on noin 25 mm x 33 mm ja uraväli 150...200 mm riippuen eristeen valmistajasta. Uria on julkisivun suuntaisesti pysty- ja vaakasuunnassa kuitenkin niin, että vaakauria on vain eristelevyjien päissä eli noin 1200 mm:n välein. Periaatekuva tuuletusurista mineraalieristeessä sandwich- rakenteessa on esitetty kuvassa 12.



**Kuva 12** Uritetulla mineraalivillalla lämmöneristetty sandwich- elementti a) julkisivukuva, b) pysty-  
poikkileikkaus A-A, jossa on kaksi mineraalivillalevyä päällekkäin, c ) pituuspoikkileikkaus B-B

Eristeessä olevan vaakaurituksen vuoksi, tuuletusilmavirran tarvitsee kuljettaa kosteutta mahdollisimman lyhyt matka. Tuuletusurista kostea ilma kulkeutuu tuuletusurien tulo- ja



poistoilma aukoille, joita on elementin ulkokuoren ala- ja yläreunan saumassa noin kolmen metrin välein. Tulo- ja poistoilma-aukkojen leveyden tulee olla vähintään 10 mm, jotta riittävä tuulettuminen on mahdollista (Lehtinen T. et al. 1997). Tulo- ja poistoilma-aukko elementtien välisessä liitoksessa on esitetty kuvassa 13.



**Kuva 13 Tuuletusurien tulo- ja poistoilma-aukko sandwich- elementtien liitoksessa**

Tuuletusurien toimivuuden kannalta on tärkeää, että elementtiä valmistettaessa urat ovat samalla kohdalla eristelevyjen jatkoskohdissa. Urat eivät saa myöskään täyttyä betonilla elementin sisäkuoren valussa. Seinän huonoon ja epätasaiseen tuulettavuuteen voi olla syynä uriin jääneet valmistusaikaiset tukokset. Tuuletuksen toimivuus heikkenee seinässä, jos tukkeutuneita tuuletusuria on paljon. Tuuletuksen paikoittainen toimimattomuus voi aiheuttaa satunnaisesti kohtiin seinärakennetta kosteuden tiivistymistä ja siten myös lämmöneristävyyden heikkenemisen.

### ***Lämpötekkinen toiminta***

Sandwich- seinärakenteen lämmöneristävyyteen vaikuttavat ensisijaisesti lämmöneristeen lämmönjohtavuus, eristekerroksen paksuus, eristeen urituksen suuruus, vesihöyryn läpäisevyys, kuorien välinen kiinnike ja kiinnikkeiden määrä sekä työsuorituksen laatu. Kovettunut betoni omaa lämmönjohtavuuden  $1,7 \text{ W/(mK)}$ , kun taas betonisandwich-elementeissä käytettyjen lämmöneristeiden lämmönjohtavuudet ovat luokkaa  $0,026 \dots 0,045 \text{ W/(mK)}$ . Käytännössä betoni ei eristä lämpöä ollenkaan lämmöneristeesen verrattuna. Lämmöneristeen lämmönjohtavuus ja paksuus määrää täysin rakenteen lämmöneristävyyden.

Sandwich- seinärakenteessa betonikuorien katsotaan olevan niin ilmatiiviitä, että eristävyyden kannalta haitallisia rakennevirtauksia ei pääse kuorien välille syntymään. Tämän

vuoksi sandwich- seinärakenteen lämmöneristekerrokseen ei ole tarvetta laittaa tuulen-  
suoja.

### ***Äänitekninen toiminta***

Sandwich- rakenteessa on aina betonikuorien välillä sideteräksiä, joten rakenne ei voi toimia ääniteknisesti täysin ideaalisen kaksinkertaisen rakenteen tavoin. Ideaalisessa kaksinkertaisessa rakenteessa on kaksi seinämää ja niiden välissä joustava kerros, joka tavallisesti on ilmatila. Fysikaalisesti rakenne on siis kahden massan ja niiden välissä olevan jousen järjestelmä. Rakenteen ilmaääneneristävyys paranee lisättäessä seinäpuoliskojen painoa. Parannusta on nähtävissä myös, kun välissä oleva materiaali on joustavaa tai seinäpuoliskot ovat kauempana toisistaan.

Mineraalivillan eristepaksuutta kasvattaessa sandwich- rakenteen ilmaääneneristävyys kasvaa. Jos kuitenkin eristemateriaalina käytetään tehokkaammin lämpöä eristävää EPS tai polyuretaanieristeitä, jotka eivät ole läheskään yhtä joustavia kuin mineraalivilla, voi rakenteen ääneneristävyys vähentyä. Ääneneristävyyttä voi heikentää tällöin lisäksi se, että eristepaksuus voi olla mineraalivillaa ohuempi.

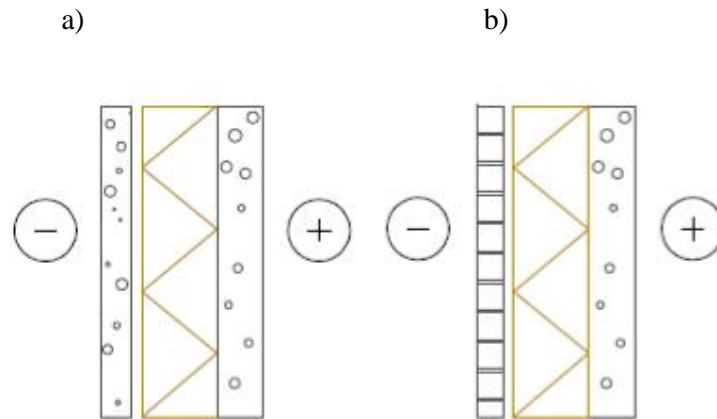
### ***Palotekninen toiminta***

Sandwich- rakenne katsotaan paloteknisesti riittävän tiiviiksi rakenteeksi, jossa julkisivun tiiveys on riittävä estämään julkisivun kautta etenevän palon. Tällöin sandwich- elementin lämmöneristeenä voidaan käyttää palavaakin lämmöneristettä rajoituksin. Asuinrakennuksessa rajoituksena ovat lähinnä sallittu kerrosluku sekä aukkojen että välipohjan kohdalle tehtävät palokatkot palamattomasta materiaalista. Palokatkoilla voidaan rajoittaa rakennuksen sisältä alkavaa paloa, jotta se ei pääse leviämään aukkojen kautta koko ulkoseinärakenteeseen.

## ***2.2 Eriytetty betonijulkisivu***

Eriytetyllä betonijulkisivulla tarkoitetaan seinärakennetta, jossa seinän sisäkuori ja ulko-  
kuori rakennetaan eriaikaisesti. Seinäelementtirakenteella sisäkuoren ja ulko-  
kuoren valmistus ja asennus tapahtuvat tällöin eriaikaisesti, omana työvaiheena. Eriytetyssä seinä-  
rakenteessa lämmöneristeet voidaan asentaa joko elementtitehtaalla tai työmaalla, riippu-

en ulkokuoren rakenteesta sekä työmaan olosuhteista ja vuoden ajasta. Elementtien saumojen kohdalle tarvitsee lämmöneristys tehdä vain työmaalla, jos lämmöneristeet ovat asennettu elementteihin jo tehtaalla. Eriytetyssä seinärakenteesta on yhtenäinen tuuletusrako. Eriytetty seinärakenne mahdollistaa tarvittaessa betonin sijasta esim. puun tai teräksen käytön julkisivurakenteena, mutta tässä työssä keskitytään vain betoni- tai tiilimuuri-julkisivuun, jotka ovat esitetty kuvassa 14.



**Kuva 14 Eriytetyn seinärakenteen poikkileikkaus a) betoninen ulkokuorielementti b) tiilimuuri- julkisivu**

## 2.2.1 Rakenteellinen toiminta

Eriytetyssä betonijulkisivurakenteesta sisäkuori ja ulkokuori eivät toimi liittorakenteen tavoin, kuten sandwich- rakenne voi toimia. Ulkokuorirakenne on tavallisesti ripustettu sisäkuorirakenteesta asuinrakennuksissa, mutta ulkokuori voi olla myös itsekantava rakenne.

Sisäkuorielementit jaetaan kantaviin ja ei-kantaviin seiniin. Kantavien seinien minimipaksuus on 120 mm, ja sitä ohuempia ovat ei-kantavia seiniä. Käytännössä kantavan sisäkuorielementin paksuus on yleensä 150 mm. Ei-kantavia sisäkuorielementtien paksuus on 80...120 mm. Nykyisin kuitenkin suositellaan kaikkien sisäkuorielementtien paksuudeksi ääniteknisistä syistä vähintään 120 mm.

Ulkokuoren rakenne voi koostua pienistä betonilevyelementeistä, betonikuorielementeistä tai jäykistetyistä suurkuorielementeistä. Nämä voidaan jakaa vielä rakenteellisen toi-

minnan mukaan kevyisiin (pienet levyelementit), kantavaan rakenteeseen kiinnitettäviin sekä itsekantaviin rakenteisiin (RTT, 1998, Uudet julkisivurakenteet).

Tässä työssä keskitytään eriytetyn rakenteen osalta pääasiassa kantavaan rakenteeseen kiinnitettäviin betonikuorielementteihin ja paikalla muurattavaan itsekantavaan tiilimuurijulkisivuun, koska nämä ovat valtajärjestelmiä Suomen uudisasuinrakennustuotannossa.

Ulkokuorelle tulee taivutusrasitus tuulikuormasta ulkokuoren kiinnikkeiden jakovälin mukaan. Mitä pienempi on kiinnikkeiden jakoväli, sitä pienempi on ulkokuorelle tuleva taivutusrasitus. Tarvittaessa itsensä kantavana rakenteena toimiva ulkokuori voi kantaa pystykuormaa omasta painosta johtuen, mutta kuitenkin itsekantavassa rakenteessa tulee olla vaakavoimien siirtämistä vastaan vaakasiteet tai vastaavat. Ulkokuori siirtää kiinnittimien avulla tuulen aiheuttamat vaakavoimat puristusjännityksinä sisäkuorelle. Jos ulkokuori ei ole itsekantava rakenne, aiheuttaa ulkokuoren paino kiinnittimiin puristus-, veto- tai taivutusjännityksiä kiinnikkeen toimintatavasta riippuen.

Eriytetyssä seinärakenteessa sisä- ja ulkokuoren toimiessa rakenteellisesti erillisinä rakenteina, ei sisäkuorelle pääse syntymään pakkovoimia ulkokuoren muodonmuutoksista kuten betonisandwich- rakenteessa (Ratvio J. 1998).

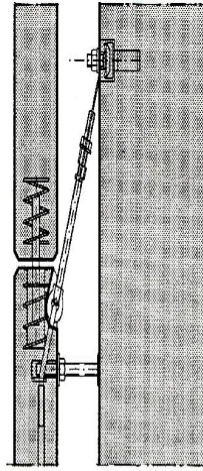
Eriytetyssä seinärakenteessa on yhtenäisen tuuletusraon vuoksi ulkokuoren ulko- ja sisäpinnassa lämpötila lähes sama. Maksimissaan lämpötilaero ulkokuoren pintojen välillä voi olla noin 10 °C (RTT, 1998, Uudet betonirakenteet). Tämän vuoksi suurimmat muodonmuutokset ulkokuorelle syntyvät vain betonin kosteudenvaihtelun seurauksena. Betonin kosteudenvaihtelu aiheuttaa betoniin kutistumaeroja, jolloin ulkokuori kaareutuu.

### ***Julkisivun kiinnitystavat***

Eriytetyn julkisivun kiinnitystapaan vaikuttaa ensisijaisesti ulkokuoren materiaali, koko ja kantavuus. Betonisen ulkokuorielementin koko on tavallisesti sandwich- elementin kanssa samaa suuruusluokkaa. Kiinnitystapoja ovat:

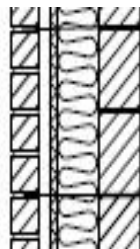
- ripustuskiinnitys
- rankakiinnitys
- ulokekiinnitys
- kannakekiinnitys

Ripustuskiinnitys on suositeltavin kiinnitystapa ulkokuorielementin (paksuus  $\geq 80$  mm) kiinnittämiseen. Muut kiinnitystavat ovat enemmän suositeltavia kevyemmän ulkokuoren kanssa käytettäväksi. Ripustuskiinnityksen periaate on esitetty kuvassa 15.



**Kuva 15** Ulkokuorielementin ripustuskiinnitys sisäkuorielementistä, jossa ulkokuorielementti on ripustettu yläreunastaan. Alareunasta elementti on kiinni vaarnatapeilla alemmasta elementistä (RTT, 1998)

Muuratuissa itsekantavissa tiilijulkisivuissa käytetään tiilimuurin sitomiseen tavallisesti tiilisiteitä eli ramloja. Tiilisiteillä tiilimuurin sidotaan julkisivurakenteeseen siten, että tiilisiteet jäykistävät tiilimuurirakennetta ja siirtävät tuulikuormat sisäkuorelle. Tiilisiteinä käytetään korroosion kestävästä materiaalista, ruostumatonta terästä, jonka halkaisija on yleensä 4-5 mm:ä. Tiilisiteiden vähimmäismäärä on  $4 \text{ kpl/m}^2$  ja epäjatkuvuus kohdissa niiden määrää tulee lisätä. Tiilisiteet voidaan asentaa sisäkuorielementteihin valmiiksi jo tehtaalla tai työmaalla ennen lämmöneristeiden asentamista. Tiilisiteet voivat toimia samalla myös lämmöneristeen kiinnikkeinä (Karvinen S.2005). Muuratussa tiilijulkisivussa olevat tiilisiteet ovat esitetty seinärakenteessa kuvassa 16.



**Kuva 16** Itsekantava tiilijulkisivu vaakasuuntaisilla tiilisiteillä kiinni seinän sisäkuoresta ([www.wienerberger.fi](http://www.wienerberger.fi))

Eristepaksuuden kasvaessa ripustuskiinnikkeen ja tiilisteiden pituus tulee kasvamaan, mikä voi osaltaan kasvattaa niihin kohdistuvaa rasiitusta. Kiinnikkeiden kylmäsiirtavaikutus on suhteellisen vähäinen, koska kiinnikkeitä on suhteellisen harvassa tai niiden dimensio on hyvin pieni.

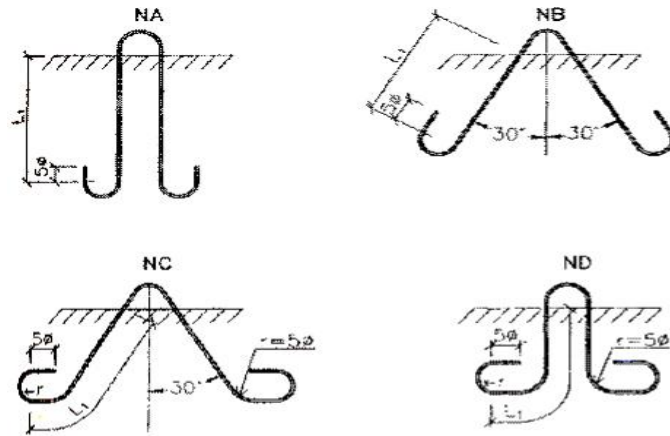
### ***Raudoitus***

Suomessa on asuinrakennuksissa tavallisesti kantava sisäkuori, kun julkisivu on betonista kuorielementeistä. Muuraamalla tehdyissä itsekantavissa tiilijulkisivuissa sisäkuori voi olla kantava tai ei-kantava riippuen välipohjan rakenteesta. Kantavan sisäkuorielementin raudoitus valitaan kuormitusten mukaan. Kantavan sisäkuorielementin ja sen aukkojen ympäröivät harjateräkset, jotka ovat kummassakin pinnassa elementtiä rajoittamassa reunoille syntyviä kutistumisjännityksiä. Jos elementille tulevat voimat ovat suuria, käytetään elementin kummassakin pinnassa betoniverkkoa. Asuinrakennuksen kantavassa sisäkuoressa ei tavallisesti käytetä verkkoraudoitusta. Ei-kantavissa sisäkuorielementeissä elementin ja sen aukkojen ympäröivät harjateräkset joko keskeisesti tai molemmissa pinnoissa elementtiä. Lisäksi käytetään keskeistä verkkoraudoitusta (Karvinen S. 2005).

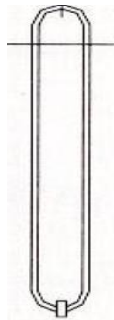
Ulkokuorielementin raudoituksena käytetään pääasiassa ruostumatonta terästä, kun elementin paksuus on 100 mm tai alle sen. Kuoren paksuuden ollessa enemmän voi raudoituksena käyttää myös tavallista harjaterästä. Tavallisesti ulkokuori kantaa vain omanpainon, joten raudoituksen tarve on vähäinen. Raudoituksena asuinrakennuksen ulkokuorielementeissä käytetään elementin ympäri kiertäviä reunateräksiä ja verkkoraudoista.

### ***Nostolenkit***

Sisäkuorielementtien nostoeliminä käytetään pyörötanko- tai jännepunoslenkkejä. Lisäksi käytetään nostoankkureita, joihin kiinnitetään elementtiä nostettaessa nostoelin. Pyörötangosta taivutettuja nostolenkkejä on erilaisia. Nostolenkin taivutusmuodon perusteella määräytyy niiden ankkurointipituus. Pyörötankolenkkejä käytettäessä on huomioitava lenkin ankkurointikoukun aiheuttama halkaisuvoima kuorissa, jonka seurauksena ankkurointikapasiteetti alenee (Betonikeskus, 2003). JB- ja PB- nostolenkkejä suositellaan tämän vuoksi käyttämään vähintään 120 mm paksuissa elementeissä. Nostolenkkien erilaisia taivutusmalleja on esitetty kuvassa 17 ja 18.



Kuva 17 Pyörötankonostolenkkien suositeltavat taivutusmuodot (Betonikeskus, 2003)



Kuva 18 JB- tai PB- nostolenkki, keskinäisenä erona lenkeillä on lenkin liitos (Betonikeskus, Betonielementtien nostolenkit ja -ankkurit, 2003)

Jännepunos-nostolenkit soveltuvat runsaasti raudoitettuihin elementteihin, jossa tavallisten nostolenkkien asentaminen on vaikeaa. Jännepunos-nostolenkin käyttö on aiheellista, jos elementissä on esimerkiksi suuri ikkuna-aukko elementin yläosassa siten, että pyörötanko nostolenkille jää vähän ankkurointi pinta-alaa.

Nostoankkureina käytetään rd- kierteisiä sisäkierrankkureita, jotka ovat joko käyrä tai hylsyankkureita. Nostoankkureihin kierretään nostoelin, johon voidaan kiinnittää nosto- ketju. Nostoankkureita sekä yksi nostoelin on esitetty kuvassa 19.



**Kuva 19 a) käyräankkuri, b) hylsyankkuri, jonka kanssa on aina käytettävä riittävää vetoraudoitusta, c) käyrä- ja hylsyankkurin sisään kierrettävä vaijeri nostolenkki**

## 2.2.2 Rakennusfysikaalinen toiminta

Eriytetty seinärakennetta voidaan pitää tuulettavana rakenteena, kun siinä on yhtenäinen tuuletusrako. Seinärakenteen hyvän tuulettavuuden vuoksi rakenne toimii kosteusteknisesti oikein. Tällöin seinärakenteeseen ei pääse kertymään lämmöneristävyttä heikentävää kosteutta.

Eriytetyssä seinärakenteessa kosteusrasitusta tulee sisältä päin diffuusiolla siirtyvästä kosteudesta sekä ulkoa viistosateesta. Eriytettyyn seinärakenteeseen ei tavallisesti pääse kosteutta tiivistymään, koska kosteus pääsee kuivumaan hyvin nopeasti tuuletusraon suhteellisen suurien ilmavirtauksien avulla. Tuuletusraolisessa seinärakenteessa kosteus voikin kuivua ympäri vuoden. Kosteusrasitusta vähentää sekin, että ulkokuoren pintojen välillä ei ole ilmanpaine-eroa, joten viistosateen tunkeutuminen saumojen läpi on vähäistä. Betonisandwich- rakenteen tuuletusurituksella tapahtuvaan tuuletukseen verrattuna tuuletusraollisen seinärakenteen tuulettavuus voi olla jopa 15...20- kertainen (Lehtinen T, et al, 1997). Kosteuden kuivuminen tuuletusraossa vähentää oleellisesti ulkokuorelle tulevaa kosteusrasitusta, ja vähentää siten myös ulkokuoren muodonmuutoksia.

Eriytetyn seinärakenteen lämmöneristävytyteen vaikuttavat lämmöneristemateriaalikerroksen rakenne ja lämmöneristeen ilman läpäisevyys. Tuulettavassa seinärakenteessa tuuletusraon ilmavirtaukset heikentävät ilmaa läpäisevien lämmöneristeiden lämmöneristävyttä. Asentamalla tuulensuojaeriste lämmöneristekerroksen ulkopintaan, tuuletusraoon päin, voidaan lämmöneristävytyden kannalta haitalliset rakennevirtaukset estää.

Eriytetty rakenne on yksittäisistä levyistä koottu rakenne, joten ääniteknisesti se toimii yksinkertaisen rakenteen tavoin. Yksinkertaisen rakenteen ilmaääneneristävyys perustuu



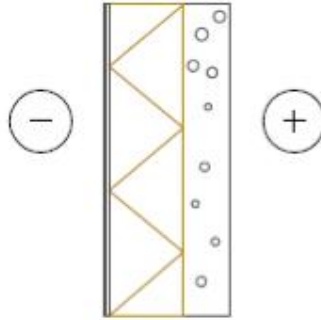
rakenteen massaan ja taivutusjäykkyyteen. Siten betonikuoren paksuutta kasvattamalla voidaan muun muassa vaikuttaa rakenteen ilmaääneneristävyyteen. Eristepaksuuden kasvattamisella tai eristemateriaalilla ei tällöin ole niin suurta merkitystä ilmaääneneristävyyteen kuin sandwich- rakenteessa.

Eriytetyn rakenteen tuuletusvälin vuoksi rakenteen eriste- ja julkisivumateriaaleille on asetettu paloluokkavaatimukset Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa E1. Lämmöneristeenä voidaan käyttää paloluokkaa B huonompaa lämmöneristettä, jos tuuletusväliin rajoittuvan pinnan materiaalin (tuulensuojan ja julkisivun) tulee täyttää vähintään B-s1,d0 -luokan vaatimukset. Tällöin materiaalin osallistuminen paloon on hyvin rajoitettua ja savuntuotto on erittäin vähäistä. Lisäksi materiaali ei saa aiheuttaa palossa palavia pisaroita (Ympäristöministeriö RakMK E1 2002). Tämä vaatimus rajoittaa EPS ja polyuretaanieristeiden käyttöä tuulensuojaeristeenä.

Eriytetyssä rakenteessa käytettäessä paloluokkaa B huonompia lämmöneristeitä tulee lisäksi tehdä aukkojen ympärille sekä kerrosluvun kasvaessa välipohjien kohdalle palokatkoja palamattomasta materiaalista. Tällöin voidaan rakennuksen sisältä päin alkavaa paloa rajoittaa, ettei se leviä rakennuksen julkisivulle.

### **2.3 Eristerapattu julkisivu**

Eriaterapatulla julkisivulla tarkoitetaan seinärakennetta, jossa ulkokuorena toimii eristerakroksen ulkopuolelle tehty rappaus. Seinärakenteen kantavana osana toimii sisäkuorielementti, jonka pintaan asennetaan lämmöneriste ja sen päälle pohjarappaus, joko elementtitehtaalla tai työmaalla, riippuen rappausratkaisusta. Lopullinen pintarappauseros tehdään aina työmaalla koko julkisivun alalle siten, että julkisivusta saadaan saumaton. Eristerapatun ulkoseinän poikkileikkaus on esitetty kuvassa 20.

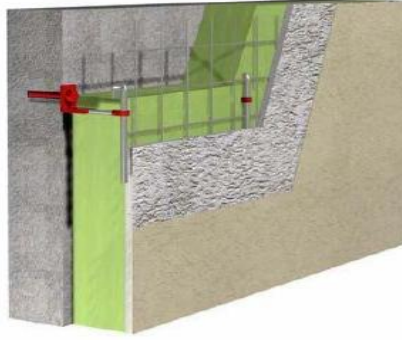


**Kuva 20 Eristerapatun seinärakenteen poikkileikkaus**

Eristerapattuja julkisivuja tehdään yleensä kahdella eri rappausratkaisulla. Perinteinen eristerappausratkaisu on kolmikerrosrappaus, jossa rappaus muodostuu kolmesta eri rappauserroksesta lämmöneristeen päälle. Toinen vaihtoehto on ohuteristerappaus, jossa lämmöneristeen päälle tehdään kaksi rappauserrosta.

Kolmikerrosrappauksessa lämmöneriste asennetaan tavallisesti työmaalla betoniseen sisäkuoreen metallisilla kiinnittimillä kiinni. Elementtien saumat saadaan tällöin eristettyä yhdellä kertaa, ja syntyy kauttaaltaan eristetty seinärakenne. Lämmöneristeenä käytetään sandwich- rakenteeseen soveltuvaa mineraalivillaa. Lämmöneristeen pintaan tietylle etäisyydelle kiinnitetään hyvin ohut teräsverkko lämmöneristeen kanssa samoihin kiinnikkeisiin. Tämän jälkeen tehdään lämmöneristekerroksen päälle tartunta- ja täyttörappauserros erillisinä työvaiheina, jolla peitetään teräsverkko ja pinta saadaan tasaiseksi pintarappausta varten. Pintarappaus suoritetaan suoralle, tasaiselle pinnalle hyvin ohuena kerroksena. Pintarappauksella saadaan seinärakenteelle sen lopulliset näkyvät ominaisuudet.

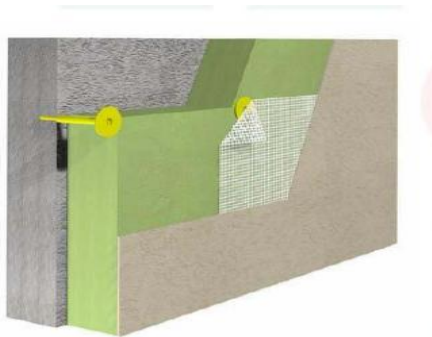
Kolmikerrosrappauksen paksuus on noin 25 mm ja sen paino on noin 60 kg/m<sup>2</sup>. Rappauserroksena käytetään kalkkisementtipohjaisia laasteja. Lämmöneristeenä käytetään vastaavia mineraalivilloja kuin sandwich- rakenteessa, mutta niissä ei ole tuuletusuria. Kolmikerrosrappaukseen joudutaan tekemään liikuntasauvoja, jotta lämpöliikkeistä ja laastin kutistumisesta aiheutuvia halkeamia ei pääse rappauserroksen pintaan syntymään. Kuvassa 21 on esitetty kolmikerrosrappausrakenne, jossa on betoninen sisäkuori.



**Kuva 21 Kolmikerroseristeraappaus (www.julkisivuyhdistys.fi)**

Ohuteristerappauksessa lämmöneristeenä voidaan käyttää mineraalivillaa tai EPS- eristettä palomääräykset huomioiden. Nykyisin ohuteristerapatuissa seinissä, lämmöneristeen asennus tehdään yleensä jo elementtitehtaalla, jossa voidaan suorittaa samalla pohjarappaus. Pohjarappaus voi toimia sääsuojana seinärakenteelle, jotta seinärakenteen lämmöneristeet eivät pääse ulkoilmassa kastumaan. Pohjarappauksen alla käytetään muovipinnoitettua lasikuituverkkoa. Työmaalla elementtien saumat tilkitään lämmöneristeen kohdalta ja saumojen päälle tehdään lisäverkotus lasikuituverkosta, jonka ylitse tehdään laastilla ylitasoitus. Tämän jälkeen koko pohjarappauskerroksen päälle tehdään pintarappaus.

Ohuteristerappauksen paksuus on noin 10 mm ja sen paino noin  $25 \text{ kg/m}^2$ . Lämmöneriste on kiinnitetty sisäkuoreen eristeen ja betonin välisellä tartunnalla tai lisäksi muovisilla kiinnittimillä. Koska ulkokuoren rappauskerroksen painon kantaa täysin eristekerros, on eristeen oltava riittävän jäykkää ja tartunta betoniin tulee olla mahdollisimman hyvä. Mineraalivillaa lämmöneristeenä käytettäessä on käytettävä ns. lamellivillaa, joka on tavallista villaa jäykempää. Villa on käännetty siten, että villan kuidut ovat lähes vaakasuorassa, jotta villan jäykkyyttä on saatu lisättyä. Villan veto- ja leikkauslujuus on siten suurempi, jotta se voi kantaa rappauksen aiheuttaman kuorman. Lämmöneristeen tulee olla alkalinkestävää, koska se on jatkuvassa kosketuksessa laastin kanssa. Rappauslaasteina käytetään sementtipohjaisia laasteja, jotka sisältävät synteettisiä hartseja ja muovipohjaisia kuituja. Ohuteristerapattuihin seinärakenteisiin ei tavallisesti tehdä liikuntasauvoja. Ohuteristerappausrakente, jossa on betoninen sisäkuori, on esitetty kuvassa 22.



Kuva 22 Ohuteristerappaus ([www.julkisivuyhdistys.fi](http://www.julkisivuyhdistys.fi))

### 2.3.1 Rakenteellinen ja rakennusfysikaalinen toiminta

Rakenteellisesti esivalmistetut rapatut julkisivut toimivat eriytetyn seinärakenteen tavoin, jossa sisäkuori kantaa kaiken kuormituksen. Ohuteristerapatuissa seinissä lämmöneriste toimii myös kantavana rakenteena, kantaen ja siirtäen rappauksen aiheuttaman kuormituksen sisäkuorelle, koska rakenteessa ei yleensä ole lainkaan mekaanisia kiinnittimiä.

Rakennusfysikaalisesti rapatut julkisivut eroavat eriytetystä seinärakenteesta sillä, että eristerapatuissa julkisivuissa ei ole olleenkaan tuuletusväliä tai – uritusta. Kolmikerrosrappaus- rakenteessa voi kosteusteknisesti tiivistyä kosteutta rappauksen taakse. Rakenne kestää kosteutta, ja rappauskerroksen taakse tiivistynyt kosteus haihtuu ulos raappauskerroksen lävitse. Ohuteristerapatut julkisivut eivät kestä suuria kosteuspitoisuuksia eristeen ja rappauksen välillä. Täten eristeen ja rappauksen väliin ei saisi tiivistyä kosteutta suuria määriä, koska se voi heikentää erityisesti juuri eristeen ja raappauksen välistä tartuntaa sekä seinän lämmöneristävyttä. Ohuteristerappausrakenne ei voi käytännössä varastoida kosteutta ja siksi rappauslaastin tulisi olla mahdollisimman hyvin vesihöyryä läpäisevä, mutta toisaalta ulkopuolelta tulevaa viistosadetta hylkivä. Rappauslaastin tulee ollakin tästä syystä aina orgaaninen, sementtipohjainen laasti, jossa on synteettisiä hartseja. Tällöin rappauskerros voi lämpö- ja kosteusteknisesti toimia oikein. Koska ohuteristerappaus ei voi varastoida suuria määriä kosteutta, on rakennusvaiheessa jo tärkeää suojata kosteuden pääsy lämmöneristekerrokseen.

Lämpötekniisesti ajatellen kolmikerrosrappauksessa syntyy lämmöneristeen ja teräsverkon kiinnikkeistä kylmäsiltoja. Kiinnikkeiden kohdille on tällöin mahdollista syntyä kosteuskertymiä, jotka heikentävät kiinnikkeiden ja rappauslaastin välistä tartuntaa. Ohut-

eristerappaus on lämpöteknisesti parempi ratkaisu, koska siinä ei ole ollenkaan tai on vain vähän mekaanisia kiinnikkeitä lämmöneristekerroksen lävitse.

Eristepaksuuden kasvaessa kolmikerrosrappauksen kiinnikkeiden pituus kasvaa, mikä lisää niihin kohdistuvaa rasiitusta. Kuitenkin rappauserroksen painosta ja muodonmuutoksista tulevat rasitukset ovat rappauksen oman painon takia hyvin vähäisiä. Kiinnikkeiden aiheuttama kylmäsilta on suhteellisen pieni, koska kiinnikkeiden dimensio on 2...4 mm ja kiinnikkeiden jakoväli on 2...4 kpl/m<sup>2</sup>.

Ohuteristerappauksessa eristepaksuuden kasvaessa eristeen leikkauslujuusominaisuudet korostuvat, koska eriste ja rappaus ovat suurelta osin tai kokonaan vain tartunnalla kiinnisäkuoresta., Tällöin eristeen tulee siirtää rappauserrokseen kohdistuvat rasitukset sisäkuorelle.

Ääniteknisesti eristerappausrakenteen voisi toimia lähes kaksinkertaisen rakenteen tavoin. Kuitenkin rappauserroksen massa on niin pieni, että sen kyky eristää ääntä on hyvin pieni. Tämän vuoksi eristerapattu rakenne on käytännössä ääniteknisesti enemmän yksinkertainen rakenne. Tällöin eristepaksuudella tai eristemateriaalilla ei sinänsä ole silloin suurta vaikutusta rakenteen ilmaääneneristävyyteen.

Paloteknisesti eristerappausrakenteessa voidaan käyttää paloluokkaa B-huonompaa lämmöneristettä, kun aukkojen ja kerrosluvun kasvaessa välipohjien kohdalle tehdään palokatkoja palamattomasta materiaalista. Lisäksi rappauserroksen tulee olla riittävän tiivis toimiakseen palosuojauksena seinälle.

Rappauserrosta ei välttämättä katsota kuitenkaan riittävän tiiviiksi, jotta se voisi estää rakennuksen ulkopuolelta syntyneen palon leviämisen lämmöneristeisiin. Kolmikerrosrappausrakenteessa palovaatimukset eivät lämmöneristeen kannalta ole ongelma, koska niissä käytetään vain mineraalivillaa. Ohuteristerappausrakenteessa, jossa käytetään myös EPS- eristeitä, on tulkinnanvaraista, onko ohutrappauskerros riittävän tiivis hoitamaan julkisivun palosuojauksen. Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa E1 on ohjeellisesti esitetty, että rappauserros ei ole riittävän tiivis palosuojaukseksi. Koska asia on esitetty ohjeellisena, on paikallisen rakennusvalvontaviranomaisen päätettävissä,

katsotaanko rappaus palosuojaukseksi vai ei. Jos rappauserrosta ei katsota riittäväksi palosuojaukseksi, tarvitsee palomääräysten mukaan EPS- eristeitä käytettäessä tehdä palosuojaus lämmöneristeen ja rappauksen väliin yli 2-kerroksisissa rakennuksissa.

## **2.4 Valmistus- ja työmaatekniikka**

Betonisia julkisivuelementtejä valmistetaan vaakatasossa olevilla muottipöydillä. Muottipöydät ovat teräs- tai vaneripintaisia tasoja, jotka voidaan kääntää pystyasentoon valmista elementtiä pöydästä nostettaessa. Muottipöydässä on tavallisesti kiinteitä ja liikuteltavia muotin laitoja. Liikuteltavia muottilaitoja siirtämällä saadaan aina kunkin elementin kokoinen muotti. Teräspintaisilla muottipöydillä liikuteltavat laidat kiinnitetään magneeteilla pöydän pintaan kiinni, kun taas vaneripintaisilla muottipöydillä kiinnitys tapahtuu tukipuilla. Muotin laidat ovat yleensä vaneripintaisia, jossa on joko puusta, teräksestä tai alumiinista valmistettu tukikehikko jäykistämässä laita, jotta laita ei anna betonin aiheuttaman valupaineen alla myöten. Julkisivuelementtien valmistamiseen soveltuva muottipöytä on kuvassa 23.



**Kuva 23** Julkisivuelementtien valmistamiseen soveltuva muottipöytä

Betonijulkisivuelementin valmistaminen muodostuu pääpiirteittäin seitsemästä työvaiheesta;

- muotin kokoamisesta
- raudoituksesta
- betonoinnista ja lämmöneristeen asentamisesta

- pinnan viimeistelystä
- muotin purkamista
- elementin viimeistelystä (koteloiden aukaisu, pesu, hionta, pakkaus)

Valmiit elementit siirretään viimeistelytyövaiheen jälkeen tilaan, jossa betoni voi saavuttaa riittävän loppulujuuden mahdollisimman nopeasti, jotta elementit voidaan siirtää tehtaan varastoon. Tehtaan varastosta elementit kuljetetaan työmaalle tavallisesti maantiekuljetuksena rekoilla, jotka ovat varusteltu elementtien kuljetukseen sopivaksi. Seinäelementtejä kuljetetaan joko rekan lavalle kiinnitetyssä A-pukissa tai ns. allasvaunussa pystyasennossa.

Työmaalla elementit nostetaan joko suoraan paikalleen kuljetuskaluston lavalta tai väli-varastoidaan työmaan varastoon. Elementtien varastoinnissa tärkeää on, että varaston alusta on tarpeeksi suora, jotta elementit eivät pääse kaatumaan tai käyristymään varastossa.

Seinäelementit asennetaan työmaalla suunnitelmien osoittamaan paikkaan ja tuetaan tuilla. Elementtitukija tulee olla vähintään 2 kpl/elementti ja elementin alareunassa tulee olla vähintään yksi sidontapistekolo, jotta riittävä varmuus kaatumista vastaan aikaan saadaan. Seinäelementtien riittävä tukileveys on asennuksessa aina huomioitava, jotta rakennuksen sortumaa ei pääse syntymään.

### 3. Lämmöneristemateriaalit

Lämmöneristysvaatimuksien kasvaessa on tärkeää selvittää nykyisten lämmöneristeiden ominaisuudet sekä niiden kehitysmahdollisuudet. Lisäksi tulee tärkeäksi tutkia ns. supereristeiden mahdollisuudet ja ongelmakohdat seinärakenteeseen käytettäessä.

Lämmöneristemateriaalia rakennuksen seinärakenteeseen valittaessa tulee huomioida eristemateriaalin mekaaninen kestävyys, lämmöneristävyys sekä kosteus-, palo-, ja äänitekninen käyttäytyminen rakenteessa. Mekaanisen kestävyuden osalta tärkeimpiä ominaisuuksia ovat erityisesti riittävä puristus-, veto- ja leikkauslujuus sekä toistuva muodonmuutoskestävyys.

Lämmöneristemateriaaleina betonisissa ulkoseinäelementtirakenteissa käytetään nykyisin:

- mineraalivilloja
  - o vuorivilla
  - o lasivilla
- polystyreenieristeitä
  - o paisutettu (EPS) (styrox)
  - o suulakepuristettu (XPS)
- polyuretaanieristeitä (PUR)

Mineraalivilloja voidaan valmistustavan perusteella nimittää pehmeiksi kuitupohjaisiksi eristeiksi. Polystyreeni- ja polyuretaanieristeitä voidaan vastaavasti nimittää suhteellisen suuren puristuslujuuden ja valmistustavan vuoksi koviksi muovipohjaisiksi eristeiksi.

Suomessa on betoniseinissä käytetty lämmöneristeenä pääasiassa mineraalivillaa. Mineraalivillan käyttöä on puoltanut ensisijaisesti niiden tekniset ominaisuudet, suhteellisen edullinen hinta sekä helppo asennettavuus.

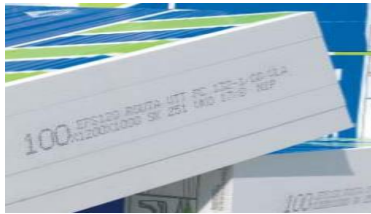




**Kuva 24** Mineraalivillalevyjä ([www.paroc.com](http://www.paroc.com))

Solupolystyreenieristeet voidaan jakaa valmistustavan mukaan joko paisutettavaan tai suulakepuristettuun polystyreeniin. Paisutettavasta polystyreenistä (EPS) puhuttaessa, puhutaan usein kansanomaisesti styroxista. Tavallisesti polystyreenieristeitä on käytetty betonisissa sokkelielementeissä ja maanpaineseinissä johtuen polystyreenin villaa paremmasta vesihöyryn läpäisyvastuksesta. Polystyreenieristeiden, varsinkin EPS:n käyttö betoniseinissä on yleistä Keski-Euroopassa. XPS-eristeitä on Suomessa käytetty betoniseinissä vain yksittäisissä maata vasten tulevissa esim. kellarinseinissä suuren vesihöyryn läpäisyvastuksen vuoksi. Kuvassa 25 on esitetty polystyreenistä valmistetut eristeet.

a)



b)



**Kuva 25** a) EPS- eriste ([www.thermisol.fi](http://www.thermisol.fi)) ja b) XPS-eriste ([www.finnfoam.fi](http://www.finnfoam.fi))

Polyuretaanieristeitä (PUR) voi olla levyinä ja vaahtona. Polyuretaanituotteet voidaan jakaa pehmeisiin, puolikoviin ja koviin eristeisiin. Rakennusteknisesti tärkeimmät tuotteet ovat kovat, umpisoluiset polyuretaanituotteet. Polyuretaanin teknisenä etuna muihin lämmöneristeisiin nähden on pienempi lämmönjohtavuus. Polyuretaanieristeitä käytetäänkin betoniseinärakenteissa, kun halutaan tavallista ohuempia rakennekerroksia. Polyuretaania käytetään lisäksi vaahtona saumojen tiivistämiseen esim. elementtien, ovien ja ikkunoiden liitoksissa. Polyuretaanin laajempaa käyttöä on Suomessa rajoittanut sen korkeampi hankintahinta mineraalivillaan ja EPS- eristeeseen nähden. Kuvassa 26 on polyuretaanieriste.



Kuva 26 Polyuretaanieriste muovipaperipinnoitteella (www.spu.fi)

### **3.1. Lämmöneristeiden valmistus ja käyttö betonisissa ulkoseinissä**

Mineraalivilla on kuitumainen lämmöneriste. Villan kiinteä aineosa koostuu ohuista kuiduista, jotka ovat sidottu yhteen sideaineella. Kuidut on käsitelty öljyllä, jotta ne hylkivät vettä ja sitovat pölyn. Mineraalivilla-eristeessä kuitujen väliin jäävän ilmatilan osuus on yli 95 % kokonaistilavuudesta. Mineraalivillan lämmöneristävyys perustuu seisovaan ilmaan huokoisessa villakerroksessa.

Mineraalivillaa valmistetaan lujuuden puolesta eri käyttötarkoituksiin soveltuvana. Vuorivillan tiheys on tavallisesti  $80 \text{ kg/m}^3$  ja lasivillan  $50 \text{ kg/m}^3$ . Mineraalivillan vakiokoko betoniseiniin soveltuvana on  $600 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$ . Mineraalivillalevyn valmistuksessa valmistuskoneet rajoittavat levyn maksimipaksuudeksi  $200 \dots 250 \text{ mm}$  valmistajasta riippuen.

Betonisandwich- elementeissä käytetään uritettua mineraalivillaa, jossa urien päällä on ohut yhtenäinen lasikuituhuopa. Eriytetyssä seinärakenteessa käytetään villaa, joka ei ole tuuletusuritettua. Villa voi olla myös sandwich- rakenteessa käytettävää villaa pehmeämpää. Pehmeämmällä villalla saadaan eristävyyttä osaltaan parannettua. Villakerroksen ulkopuolelle tulee aina tuulensuojaeriste. Sandwich- rakenteessa villan urissa vaikuttava ilmavirtaus heikentää hieman villan lämmöneristävyttä urittamattomaan villaan nähden. Eristerapattuissa seinissä käytettävän villan laatu riippuu rappaustavasta. Perinteinen kolmikerrosrappaus voidaan tehdä vastaavalla villalla kuin sandwich- rakenteessa, mutta tällöin siinä ei ole tuuletusuria. Ohuteristerappaus voidaan tehdä vain ns. lamellivillaa käyttäen. Kuvassa 27 on esitetty sandwich- elementissä käytettävä uritettu mineraalivilla.



**Kuva 27 Betonisandwich-elementeissä käytetty uritettu mineraalivillalevy. Urien jakoväli on 150...200 mm ([www.isover.fi](http://www.isover.fi)).**

Eriytetyssä seinärakenteessa käytettävä tuulensuojaeriste on tiheämpää ja siten jäykempää villaa. Tiheämpi villa, jossa on esim. lasikuituhuopapinnoite vähentää tuuletusilmavirtausten haittavaikutuksia rakenteen lämmöneristävyyteen.

Polystyreeni on kestopuovi, jota voidaan sulattaa ja käyttää raaka-aineena monia käyttökertoja. Polystyreeni on EPS- ja XPS- eristeiden pääraaka-aine. Lisäksi raaka-aineena käytetään eri kaasuja. EPS- ja XPS- eristeet ovat normaaliolosuhteissa hajuttomia ja myrkyttömiä eristeitä.

EPS on paisutettua polystyreenia, jossa polystyreenihelmiin liuotetaan pentaanikaasua. Polystyreenihelmet saadaan höyryn avulla paisutettua noin 50-kertaisiksi. EPS:n lopullinen rakenne koostuu polystyreenistä ja suljetuissa soluissa olevasta pentaanikaasusta. Pentaanikaasu korvautuu soluissa noin kahden kuukauden sisällä eristelevyjen valmistuksesta ilmalla. Suljetuissa soluissa oleva ilma antaa materiaalille sen lämpöä eristävän ominaisuuden. Polystyreenin osuus on noin 2 % ja ilman 98 % EPS-eristeessä. EPS on solurakenteeltaan tiivis, mutta se ei ole täysin yhtenäinen. EPS- eristeiden tiheys on betoniseinissä tavallisesti 17...20 kg/m<sup>3</sup>. EPS- eristeiden lämmöneristävyyttä voidaan kasvattaa lisäaineita käyttämällä, lähinnä Neopor- raetta lisäämällä valmistusseokseen.

Seinärakenteessa käytettävät EPS- eristeet ovat tavallisesti S-luokan laatua, jolloin ne ovat vaikeammin syttyviä kuin tavallinen EPS- eriste. S-luokan laatua voidaan valmistaa käyttämällä eristeiden valmistuksessa bromiyhdisteitä. EPS- eristeiden valmistusprosessi ei

asetta rajoitteita eristepaksuudelle. EPS- eristeiden koko voi vaihdella tarpeen mukaan, vakiokoon ollessa levyille 1000 mm x 1200 mm.

XPS on suulakepuristettua polystyreenia, jossa sula polystyreeni reagoi hiilidioksi- kaasun avulla. Suomessa käytetään ns. ekstruusiomenetelmää, jossa kovalla paineella sulaa polystyreeniä puristaen saadaan syntyään yhtenäinen suljettu solurakenne, jossa on hiilidioksiditäytteiset solut. Soluissa oleva hiilidioksidi korvautuu diffuusion vaikutuksesta noin kahden kuukauden sisällä eristeen valmistuksesta ilmalla. Solurakenne on hyvin tiivis ja yhtenäinen ja siten se eroaa EPS- eristeen solurakenteesta. Tiivis ja yhtenäinen solurakenne antaa XPS- eristeelle sen hyvät mekaaniset ominaisuudet.

XPS- eristelevyjen koostumuksesta 96...98 paino % on polystyreenia ja ilmaa ja loput erilaisia lisäaineita, joilla voidaan vaikuttaa mm. solujen muotoon ja kokoon, jotta lopputuote on haluttua. XPS- eristeiden lämmöneristävyys perustuu myös suljetussa solurakenteessa olevaan liikkumattomaan ilmaan. EPS- ja XPS levyillä ei voida siten päästä ilman lämmönjohtavuutta pienempään arvoon, mikä vaihtelee lämpötilan mukaan. XPS- eristeiden lämmönjohtavuutta saadaan pienennettyä, jos kasvatetaan eristeen tiheyttä. Tällöin kasvaa myös eristeen tiiveys. Tavallisesti XPS- eristeiden tiheys on seinärakenteissa 30...40 kg/m<sup>3</sup>. Lämmöneristävyteen vaikuttaa lisäksi solurakenteessa solujen muoto ja koko. XPS- eristeiden valmistuksessa tuotantokoneisto asettaa tällä hetkellä levyn maksimipaksuudeksi 210 mm. Levyjen vakiokoko on 600 mm x 2500 mm.

Polyuretaanieristeet ovat kestumuoveja, joissa raaka-aineena ovat polyoli ja isosyaniitti sekä ponneaineena pentaani. Suomessa polyuretaanilevyjä valmistetaan jatkuvatoimisella laminaattoritekniikalla, jossa polyuretaanimassa syötetään pinnoitemateriaalin väliin ja puristetaan levyksi kovan paineen alaisena. Tämän jälkeen levy leikataan määrämittaen. Eristelevy kovettuu noin 1...2 päivää, kunnes se saavuttaa lopulliset ominaisuudet. Polyuretaanilevyjen lämmöneristävyys perustuu umpisolurakenteeseen, jossa solujen sisällä on vain kolmasosan ilman lämmönjohtavuudesta omaava kaasu.

Polyuretaanimassan erilaisilla koostumuksilla voidaan vaikuttaa eristeen lopullisiin ominaisuuksiin. Tällöin voidaan vaikuttaa mm. solurakenteen solujen kokoon ja muotoon sekä asentoon valmiissa eristelevyssä. Polyuretaanieristeiden lämmöneristävyteen vaikuttaa erityisesti solujen koko, muoto, valmistus lämpötila, puristusaine ja käytettävät lisä-

aineet sekä eristeen pinnassa oleva pinnoite. Solujen koon ollessa mahdollisimman pieni voidaan saada parempi lämmöneristävyys. Solujen muoto tulisi olla myös mahdollisimman pyöreä, jotta lämmöneristävyys olisi mahdollisimman suuri (Pullola Jaana). Käytännössä solut ovat kuitenkin hieman soikeita, mikä aiheuttaa eristeeseen eri suunnissa erilaiset muodonmuutosomaisuudet. Eristeen pintamateriaalin tulee olla mahdollisimman tiivis, jotta solujen sisällä oleva kaasu ei pääse korvautumaan ilmalla. Betonisissa ulkoseinissä pintamateriaalina käytetään tavallisesti muovipaperipintaista pintamateriaalia,

Betonisiin ulkoseiniin käytettävien polyuretaanieristeiden tiheys on noin  $40 \text{ kg/m}^3$ . Polyuretaanieristeiden valmistuskoneisto rajoittaa levyn maksimipaksuudeksi 190 mm. Eristelevyjen vakiokoko on 1200 mm x 2400 mm. Eristelevyjen reunat voidaan tehdä joko suoraksi tai puoliponttimuotoon.

Sandwich- seinärakenteessa eivät muovipohjaiset eristeet ole yleensä uritettuja, koska rakennus ei muutoin voi aina kuulua paloluokkaan P1. Eristeen uritus vaikeuttaisi myös palosuojausta aukkojen kohdalla. Tuuleturituksen käytölle ei ole kosteusteknisessä mielessä myöskään tarvetta, koska muovipohjaiset eristeet ovat villaeristeitä tiiviimpiä. Siten sandwich- seinärakenne toimii kosteusteknisesti eritavoin muovipohjaisia eristeitä käytettäessä kuin mineraalivillalla (Aho H. et al. 2006).

### **3.2 Lämmöneristeiden ominaisuudet**

Lämmöneristeiden tekniset ominaisuudet vaihtelevat hyvin paljon, joten on tärkeää selvittää niiden välisiä eroja. Lämmöneristeiden teknisiä ominaisuuksia, kuten lämmöneristävyttä, lujuus-, kosteus-, ääni-, palo ja tiiveysominaisuuksia tarkastellaan mineraalivillalle, EPS-, XPS- ja PUR- eristeille.

#### ***Lämmöneristävyys***

Mineraalivillan lämmöneristävyys on riippuvainen seinärakenteen kosteusolosuhteista, rakenteessa olevien ilmavirtausten suuruudesta ja eristeen koostumuksesta. Eristeen koostumuksella voidaan käytännössä vaikuttaa eristävyteen vain kuitujen suunnalla ja eristeen tiheydellä. Rakenteessa olevat ilmavirtaukset heikentävät aina mineraalivillan eristävyttä.

EPS- eristeillä parhain lämmöneristävyys saadaan, kun eristeen tiheys on noin  $20 \text{ kg/m}^3$ . Eristeen lämmöneristävyttä voidaan parantaa lisäämällä eristeeseen lisäaineita. EPS- eristeiden lämmöneristävyys heikkenee kosteissa olosuhteissa, tosin hitaasti.

XPS- eristeiden lämmöneristävyttä voidaan parantaa, kun eristeen tiheyttä kasvatetaan. Tällöin kasvaa myös eristeen tiiveys. XPS- eristeet säilyttävät käyttökänsä ajan lämmöneristävyuden lähes samanlaisena, vaikka eriste olisi kosteissa olosuhteissa. Tämä perustuu siihen, että XPS- eristeet ovat solurakenteeltaan yhtenäisiä ja hyvin tiiviitä, jolloin kosteutta ei juuri pääse eristeeseen.

Polyuretaanieristeiden lämmönjohtavuus riippuu eristeen tiheydestä, valmistustavasta sekä eristelevyn pinnassa olevasta pinnoitteesta. Eristeen pinnassa olevalla pinnoitteella pyritään ensisijaisesti estämään soluissa olevan eristävän kaasun korvautuminen ilmalla diffuusion vaikutuksesta. Pinnoitemateriaalia ja eristeen solurakennetta kehittämällä saadaan polyuretaanin lämmönjohtavuutta edelleen pienennettyä. Polyuretaanin suunnittelu- lämmönjohtavuutta määritettäessä otetaan huomioon eristävän solukaasun korvautuminen ilmalla. Kaasun korvautumisen vaikutus eristeen lämmönjohtavuuteen arvioidaan eristeelle tehtävällä vanhenemiskokeella. Eristevalmistajan tulee suorittaa koe, jotta hän saa tuoda markkinoille polyuretaanista valmistetun lämmöneristystuotteen. Vanhenemiskokeessa polyuretaanin lämmönjohtavuus kasvaa keskimäärin 3-4 mW/mK (Kurikka Jussi). Polyuretaanieristettä käytettäessä on huomioitava, että kaikkia sivuja ei voida pinnoittaa, joten niistä kohdista solukaasu pääsee korvautumaan ilmalla muita osia enemmän. Polyuretaani on solurakenteeltaan myös hyvin tiivis, joten sen lämmöneristävyys ei heikkene kosteissa olosuhteissa. Lämmöneristeiden mitattavia ominaisuuksia on tarkemmin esitetty lukuarvoina taulukossa 1.

**Taulukko 1. Lämmöneristeiden mitattavia ominaisuuksia**

Eriste	Suunnittelu lämmönjohtavuus	Puristuslujuus	Vesihöyryn läpäisevyys	Paloluokka	Max. lämpötila
	$\lambda_{Design}$ , W/mK	kPa	$\times 10^{-12}$ kg/msPa		°C
Vuorivilla	0,036...0,041	5...30 *	150	A1	-
Lasivilla	0,037...0,039	10...30 *	150	A1 tai A2-s1 d0	-
EPS	0,036...0,039	60...100 *	3...7	D tai E	80...110
XPS	0,035...0,037	150...250	1,5	E	70...100
PUR	0,026...0,027	100...250	0,1...1,2	D tai E	100...250
		* = puristuslujuus mitattu 10 %:n deformaatiolla			

Taulukosta 1. nähdään, että tällä hetkellä polyuretaanilla on selvästi pienin lämmönjohtavuus. Muilla eristeillä lämmönjohtavuus on noin 1,5-kertainen ja niiden keskinäiset erot ovat pieniä, koska lämmöneristävyys perustuu liikkumattoman ilman lämmönjohtavuuteen.

### ***Lujuusominaisuudet***

Lämmöneristeiden lujuusominaisuudet määräytyvät suurelta osin niiden tiheyden mukaan. Mineraalivillan lujuusominaisuudet riippuvat lisäksi kuitujen suunnasta, piteudesta ja paksuudesta sekä villan sideaineen määrästä. Mineraalivillan puristuslujuus on selvästi muovipohjaisia eristeitä heikompi, koska materiaali on kuitupohjaisena kimmoisaa. Mineraalivillan kimmainen käyttäytyminen ja siitä aiheutuva kokoonpuristuminen tulee ottaa huomioon villan paksuutta valittaessa. Muut lämmöneristemateriaalit ovat huomattavasti kimmottomampia. EPS puristuu kokoon kuormituksessa, mutta ei palaudu takaisin alkuperäiseen asentoonsa kuormituksen laskiessa. XPS ja PUR -eristeet ovat jo suhteellisen kovia eristeitä, jotka eivät puristu kokoon tavanomaisilla kuormituksilla. Villoilla vetolujuus on tavallisesti myös alhainen ja usein sitä lisätään lamellirakenteella. Lamellirakenne heikentää kuitenkin aina villan lämmöneristyskykyä. XPS ja PUR -eristeillä voi taivutuslujuus olla lähes 1000 kN/m<sup>2</sup> ja vetolujuus yli 200 kN/m<sup>2</sup>.

Mineraalivilloilla ei esiinny käyttötilassa lujuuden heikkenemistä, kun sen lämpötila nousee. EPS- ja XPS- eristeet alkavat menettää lujuutta hyvin nopeasti, kun niiden lämpötila

ylittää 80 °C. Lämpötilan ollessa yli 100 °C ne menettävät lähes täysin lujuutensa. PUR-eristeet kestävät lyhytaikaisesti hyvinkin korkeita lämpötiloja, mutta pitkäaikaisessa kuormituksessa ne kestävät noin 100 °C lämpötiloja.

### ***Kosteusominaisuudet***

Mineraalivillan vesihöyrynläpäisevyys on lähes sama kuin ilmalla, ollen noin 100-kertainen XPS ja PUR-eristeisiin nähden. Vesihöyryn suuri läpäisevyys mineraalivillalla johtuu sen kuitumaisesta rakenteesta. Muiden lämmöneristeiden suljettu solurakenne estää tehokkaasti vesihöyryn kulkeutumisen eristeen lävitse. Suurin vesihöyrynvastus on taulukon 1 mukaan PUR-eristeillä. Taulukon 1 arvoissa ei ole otettu huomioon PUR-eristeen osalta pinnoitteen vaikutusta vesihöyryn läpäisevyyteen. Muovipohjaisten eristeiden vesihöyryn läpäisevyys riippuu myös eristeen tiheydestä. Mitä suurempi on eristeen tiheys, sitä pienempi on eristeen vesihöyryn läpäisevyys.

Muovipohjaisilla eristeillä vedenimeytyminen on hyvin vähäistä. XPS- ja PUR-eristeet eivät käytännöllisesti katsoen ime lainkaan vettä. Tämän vuoksi muovipohjaisilla eristeillä ei lämmöneristävyys heikkene juuri ollenkaan kosteissa olosuhteissa.

### ***Ilmatiheys***

Mineraalivilla kuitumaisena lämmöneristeenä ei ole ilmatiivis materiaali. Tämän vuoksi mineraalivillaa lämmöneristeenä käytettäessä esiintyy rakenteessa aina ilmavirtauksia, jotka heikentävät villan lämmöneristävyttä. Muovipohjaiset eristeet ovat suljetun solurakenteensa vuoksi ilmatiiviä. Niissä ei esiinny siten ilmavirtauksia, jotka heikentäisivät niiden lämmöneristävyttä.

### ***Palo-ominaisuudet***

Lämmöneristeistä parhaimmat palo-ominaisuudet ovat vuori- ja lasivillalla, jotka kuuluvat pääasiassa paloluokkaan A1 tai A2-s1 d0. Paloluokka A1, tarkoittaa, että materiaali ei osallistu paloon lainkaan ja paloluokka A2-s1 d0 tarkoittaa, että materiaalin osallistuminen paloon on erittäin rajoitettua, savuntuotto vähäistä ja palavia pisaroita ei palossa esiinny.

EPS-, XPS- ja PUR-eristeet luokitellaan yleisesti palavaksi materiaaliksi. Seinärakenteisiin käytettävän S-luokan EPS-eristeen paloluokka on D tai E. D-luokan rakennusmate-



riaalit osallistuvat paloon rajoitetusti ja E-luokan materiaalien käyttäytyminen palossa on hyväksyttävissä.

XPS- eristeiden paloluokka on aina E, koska eristeen valmistuksessa siihen ei lisätä mitään lisäaineita. Palosuojaus tulee XPS- eristeitä käytettäessä tehdä aina rakenteellisesti. Polyuretaanin palo-ominaisuuksia voidaan parantaa polyuretaanimassan koostumusta muuttamalla ja lisäaineilla. Isosyaniitin määrää polyuretaanimassassa kasvattamalla saadaan polyuretaanin palokestävyyttä parannettua. Tämä kuitenkin pienentää polyuretaanin lämmöneristävyyttä. Polyuretaanin paloluokka on D tai E, riippuen eristelaadusta. Polyuretaani ei ylläpidä paloa, eikä se sula palossa. Polyuretaanin palaessa ei synny myöskään palavia pisaroita, jotka levittäisivät paloa ([www.spu.fi](http://www.spu.fi)).

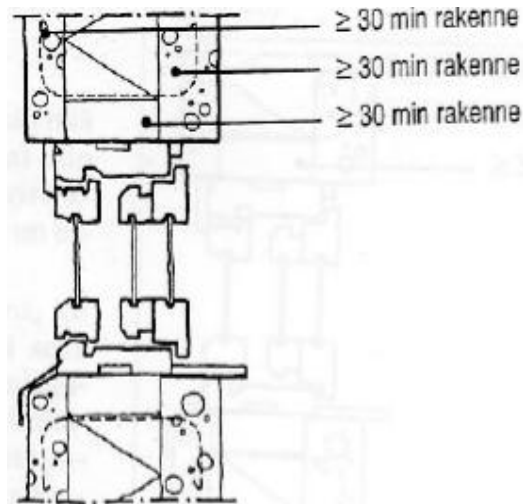
EPS- ja XPS- eristeiden palaessa syntyy pääasiassa häkää, hiilidioksidia ja styreeniä sekä EPS:llä vetybromidia. Epätäydellisessä palossa syntyy hyvin mustaa savua. Polyuretaanin palaessa syntyy häkää, hiilidioksidia ja typen yhdisteitä sekä hyvin korkeissa lämpötiloissa syaanivetyä. Tutkimusten mukaan syaanivety voi pieninäkin määrinä olla häkää myrkyllisempää. On kuitenkin huomattava, että syaanivetyä syntyy vasta, kun palotilan lämpötila ylittää 600 °C.

### ***Muovipohjaisia eristeitä käyttäen tarvittavat palosuojaukset***

Muovipohjaisten eristeiden käyttöä rakennuksissa rajoittavat palomääräykset, joissa on rajoitettu rakennuksen kerroslukua, kantavan rungon materiaalia sekä ulkokuoren ja tuuletusväliin jääviä pintamateriaaleja. Palomääräysten mukaan muovipohjaisilla eristeillä voidaan tehdä enintään 8-kerroksisia P1-paloluokan asuinrakennuksia, kun kantavien rakenteiden palonkestovaatimus on 60 minuuttia. Rajoitukseksi tulee 8-kerroksinen asuinrakennus, koska sitä korkeammat rakennukset vaativat kantavilta rakenteilta 120 minuutin kantavuuden ja tällöin palavan eristeen käyttö rakenteessa muodostuu vaikeaksi. Muovipohjaisia eristeitä käytettäessä 8-kerroksisten asuinrakennusten kantavat rakenteet tulee olla tehty vähintään A2-s1 d0 – luokan rakennusmateriaaleista. Betoni itsessään täyttää nämä vaatimukset.

Muovipohjaiset lämmöneristeet tulee sijoittaa ja suojata rakenteessa siten, että palon leviäminen eristeeseen sekä palo-osastosta ja rakennuksesta toiseen on estetty. Palosuojauksista voidaan pitää riittävänä, jos sisäverhous, palokatko aukkojen ympärillä sekä ulko-

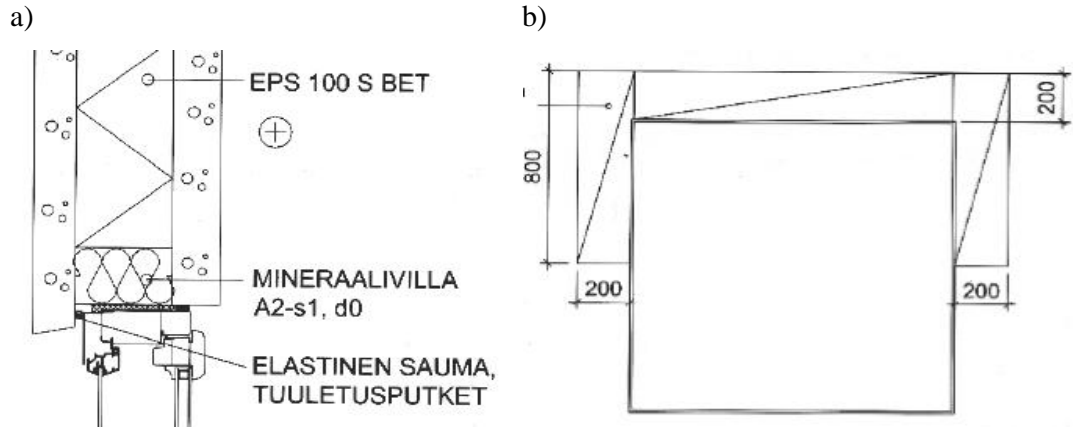
verhous täyttävät puolet kyseisessä tapauksessa osastoivalta rakenteelta vaaditusta palonkestävyysajasta. Kuvassa 28. on esitetty rakenne osilta vaadittavat palonkestoajat, kun seinärakenteen osastoivuusvaatimus on 60 minuuttia.



**Kuva 28 Palavan lämmöneristeen suojaaminen enintään 8-kerroksisessa asuinrakennuksessa, kun osastoivuusvaatimus on EI 60 (Ympäristöministeriö, Ympäristöopas 39, 2003)**

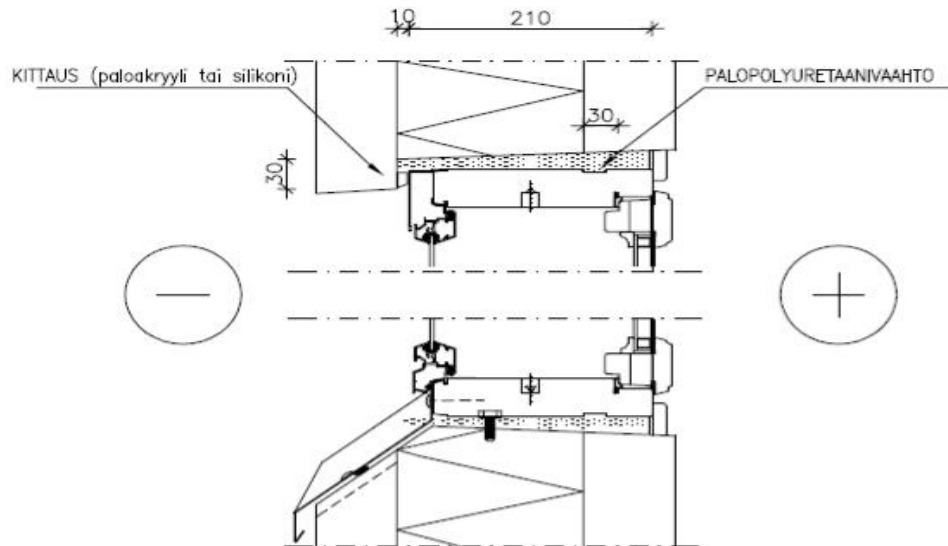
Eriytetyssä seinärakenteessa on rajoitettu tuuletusväliin jäävien ja ulkokuoren pintojen materiaalia, jotta ne eivät edistä paloa. Muovipohjaisia eristeitä voi tällöin käyttää maksimissaan kaksi kerroksisissa P3-luokan asuinrakennuksissa ilman tuuletusraon pintaan tehtävää palosuojakerrosta. Palosuojakerroksena voi olla esim. vuorivilla tai rakennuslevy, joka täyttää vähintään B-s1,d0- luokan vaatimukset. Sama vaatimus koskee eristerapattuja seinärakenteita, jos rappauserroksen ei katsota olevan riittävän tiivis, estääkseen paloa (Ympäristöministeriö, RakMK E1 2002).

EPS- ja XPS- eristeitä, sekä osittain PUR- eristeitä (eriytetty rakenne), seinärakenteessa käytettäessä on aukkojen yläosan ympärille, sekä välipohjan liitokseen tehtävä palokatko palamattomasta eristeestä. Tällöin voidaan estää esimerkiksi asunnon sisäpuolelta ikkunan kautta tapahtuva lieskahdus, jotta se ei pääse sytyttämään ulkoseinän eristeitä (Aho H. et al. 2006). Kuvassa 29 on esitetty sandwich- elementin aukkojen yläosaan vaadittavasta palokatkosta EPS- ja XPS- eristeitä käyttäen.



**Kuva 29 a) Sandwich- rakenteessa EPS- ja XPS-eristeitä käytettäessä tehtävä palokatko ikkuna- tai oviaukon yläosaan palamattomasta materiaalista, b) suojattava ala ikkunan edestä kuvattuna (Aho H. et al. 2006)**

Polyuretaanieristeille on olemassa tyyppihyväksyntä 8-kerroksiin rakennuksiin, kun kantavien rakenteiden palonkesto on 60 minuuttia. Polyuretaania betonisissa ulkoseinäelementeissä käytettäessä, ei kerrosten välille, eikä aukkojen yläosaan tarvitse tehdä palokatkoja, jos ikkunan karmi on vähintään 30 mm sisäkuorielementin päällä ja ulkokuori tulee ikkunakarmin yläreunan eteen vähintään 30 mm. Tällöin kuitenkin on liitoksissa käytettävä palopolyuretaania. Aukon rakenne on esitetty kuvassa 30. Muussa tapauksessa ikkuna-aukon yläosaan tulee tehdä palokatko vähintään A2-s1 d0 – luokan materiaalista, jonka minimipaksuus on 20...30 mm. Eriytetyssä seinärakenteessa on palokatkon tekeminen aina välttämätöntä.



**Kuva 30 Sandwich- rakenteen aukon pystyleikkaus PUR- eristettä käyttäen, jolloin ei tarvita erillisiä palokatkoja (SPU-Systems Oy)**

### ***Ääniominaisuudet***

Ulkoseinärakenteiden ääniominaisuuksia erilaisilla lämmöneristeillä on tutkittu Suomessa varsin vähän. Lähinnä on tutkittu mineraalivillalla ja EPS- eristeillä lämmöneristettyjä seiniä. XPS- ja polyuretaanieristeillä eristettyjä rakenteita on Suomessa tutkittu hyvin vähän, johtuen vielä niiden vähäisestä käytöstä.

Yleisesti ajatellen mineraalivilla kimmoisena ja joustavana materiaalina eristää ääntä paremmin. Sandwich- rakenteessa mineraalivilla eristää ääntä kovaa muovipohjaista eristettä paremmin, koska se ei ole betonikuorissa jäykästi kiinni. Muovipohjainen eriste taas on yleensä tiukasti betonikuorien välissä, jolloin seinärakenne voi lähteä kokonaisuudessaan värähtelemään, jolloin rakenne eristää mineraalivillalla eristettyä rakennetta huominn ääntä. Jos muovipohjaisia eristeitä käytettäessä ääneneristävyys tulee ongelmaksi, varsinkin ohuilla eristepaksuuksilla, on järkevintä lisätä betonikuorien paksuutta. Mitä raskaammat betonikuoret ovat sitä jäykemmän kiinnityksen ne vaativat kuorien välille, jolloin lämmöneristeellä tulee olemaan yhä vähemmän vaikutusta ääneneristävyyteen (Olin J. et al. 1981).

### ***Muodonmuutokset***

Lämmöneristeiden muodonmuutoksilla on rakenteesta riippuen vaikutuksia rakenteen lopulliseen toimintaan. Muovipohjaisien eristeiden käytössä tulee huomioida eristelevyjen pituuden muodonmuutokset. Tavallisesti sandwich- rakenteessa lämmöneristeiden pituusmuodonmuutokset pakotetaan betonin muodonmuutoksien suuruiseksi. Eriytetyssä rakenteessa lämmöneristeiden tasossa tapahtuvilla muodonmuutoksilla ei ole suurta käytännön merkitystä, kunhan eristelevyjen väliin ei pääse syntymään rakoja, jotka heikentävät rakenteen lämmöneristävyttä ja ilmatiiveyttä. Eristerapatusta seinärakenteessa lämmöneristeelle ei sallita suuria muodonmuutoksia, koska vaarana on rappauksen halkeilu.

Mineraalivilla kokoonpuristuu villaa kuormitettaessa. Kokoonpuristuminen on suurempaa villan kuituja vastaan kohtisuorassa. Kokoonpuristumisen vaikutus tulee ottaa huomioon villan paksuutta valittaessa, kun tiedetään elementin valmistustekniikka. Villan kokoonpuristuminen kasvaa eristepaksuuden lisääntyessä, jos villan puristuslujuus pysyy samana. Villalla lämpötilan muutoksista johtuvia muodonmuutoksia ei esiinny käyttöympäristön lämpötiloissa.

EPS- eriste muovipohjaisena materiaalina kutistuu, kun pentaani ja vesihöyry poistuvat solurakenteesta ja korvautuvat ilmalla. Kutistuminen rajoittuu pääosin kahteen kuukautteen valmistuksesta. Eristeen valmistaja huomioi eristeen kutistumisen valmistuksessa ja käytännössä varastoi eristeitä noin kaksi kuukautta ennen niiden käyttöä. EPS- eristeiden pituuden lämpötilakerroin on  $5 \dots 7 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ . Vastaavasti XPS- eristeillä pituuden lämpötilakerroin on  $7 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  ja PUR- eristeillä  $5 \dots 8 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ . PUR- eristeiden lämpölaajeneminen on suurinta pituussuunnassa, solurakenteesta johtuen. EPS-, XPS-, ja PUR- eristeiden lämpölaajeneminen on keskimäärin noin seitsemän kertaa suurempi kuin betonilla. Betonin pienempi pituuden lämpölaajenemiskerroin aiheuttaa jännityksiä lämmöneristeen ja betonikuoren liitoskohtaan. Lämmöneristeen pintojen välillä olevat lämpötilaerot aiheuttavat lisäksi muovipohjaiseen eristeisiin sisäisiä jännityksiä.

### ***Kemiallinen kestävyys***

Betonisen ulkoseinärakenteen lämmöneristeen tulee kemiallisesti olla hyvin kestäviä, koska se on alttiina jatkuvasti emäksiselle betonille ja rakennekosteudelle. Mineraalivillat ja muovipohjaiset eristeet kestävät kemiallisia rasituksia erityisen hyvin. Kaikkien näiden lämmöneristeiden alkalinen kestävyys on tavallisesti riittävä betoniseen ulkoseinärakenteeseen. Muovipohjaiset eristeet eivät yleisesti kestä orgaanisia liuottimia ja auringon UV-säteilyä. Muovipohjaiset eristeet eivät tavallisesti homehdu tai pilaannu käyttöikänsä aikana.

### ***3.3 Lämmöneristeiden kehitysmahdollisuudet***

Lämmöneristeiden kehitysmahdollisuuksia erityisesti lämmöneristävyiden osalta selvitetiin eristemateriaalivalmistajille tehdyillä haastatteluilla. Nykyisten lämmöneristeiden lämmönjohtavuuden vähentäminen on mahdollista lähinnä vain kaikilla muovipohjaisilla eristeillä. Mineraalivillan lämmönjohtavuuden vähentäminen nykyisestä tasosta on vaikeaa.

Sandwich- rakenteeseen soveltuvina lämmöneristeinä voidaan käyttää mineraalivillaa, EPS-, XPS- ja PUR- eristeitä. Eriytetyn rakenteen osalta eristevaihtoehtoina ovat mineraalivillat sekä muovipohjaiset eristeet palosuojauksen kanssa. Mineraalivillan kanssa tuulensuojaksi on valittu erillinen lasikuituhuovalla pinnoitettu tuulensuojavilla.

EPS- eristeen kanssa käytettäisiin lasikuitukangasta palokatkona tuuletusväliin rajoittuvassa pinnassa. Lasikuitukangas täyttää vaatimuksen vähintään B-s1,d0- paloluokan materiaalista. XPS- ja PUR- eristeillä voidaan käyttää tuulensuojakipsilevyä, joka toimii palokatkona tuuletusväliin rajoittuvassa pinnassa. Eristerapatun rakenteen lämmöneristeenä käytetään mineraalivillaa, EPS- ja PUR- eristeitä.

Taulukossa 2. esitetään eri rakennevaihtoehtoihin soveltuvien lämmöneristeiden valmistajien arvioidut eristeiden suunnittelulämmönjohtavuudet vuoden 2010 alussa.

**Taulukko 2 Lämmöneristeiden suunnittelulämmönjohtavuudet eri rakenteissa nykyisin ja vuoden 2010 alussa**

Eriste	Valmistaja	Betonisandwich		Eriytetty rakenne		Eristerappaus	
		Nykyinen $\lambda_D$	UUSI $\lambda_{D,uusi}$	Nykyinen $\lambda_D$	UUSI $\lambda_{D,uusi}$	Nykyinen $\lambda_D$	UUSI $\lambda_{D,uusi}$
		W/mK	W/mK	W/mK	W/mK	W/mK	W/mK
Vuorivil- la	Paroc	0,036	0,036	0,036/0,034	0,036/0,034	0,036, 0,041**	0,036, 0,041**
Lasivilla	Saint-Gobain Rak.tuotteet	0,037	0,034..35	0,035/0,031	0,033/0,031	0,037, -	0,034..35
EPS	Thermisol	0,036	0,03	0,036/0,24*	0,030/0,24*	0,036	0,03
XPS	Finnfoam	0,035	0,030..32	0,035/0,24*	0,032/0,24*	-	-
PUR	SPU- Systems	0,026	0,024	0,026/0,24*	0,024/0,24*	0,026	0,024

\*= Tuulensuojakipsilevyn/tai vastaavan  $\lambda_D$

\*\*=Lamellivillan  $\lambda_D$

Taulukosta 2. nähdään, että PUR- eristeiden lämmönjohtavuus tulee olemaan tulevaisuudessaakin selvästi muita alhaisempi. PUR- eristeen lämmönjohtavuutta saadaan vähennettyä 2 mW/mK, kun eristeen pintamateriaalina käytetään 7-kerroksista alumiinilamellia, joka on käsitelty siten, että alumiini ja betoni eivät reagoi keskenään valutilanteessa.

EPS- eristeen lämmönjohtavuutta voidaan parantaa keskimäärin noin 5...6 mW/mK, kun eristeen valmistamisessa käytetään lisäaineena grafiittimaista Neopor- raetta, jolla on hyvä eristävyys ominaisuus. Tällöin EPS- eristeiden väri muuttuu valkoisesta harmaaksi.

XPS- eristeiden lämmönjohtavuutta saadaan vähennettyä 3...5 mW/mK, lähinnä eristeen tiheyttä kasvattamalla. Mineraalivillojen lämmönjohtavuus voi parantua 0...3 mW/mK.

Lämmöneristeiden, joiden eristävyys perustuu liikkumattomaan ilmaan, lämmönjohtavuuden minimirajaksi tulee ilman lämmönjohtavuus. Valmistuksessa syntyä lämmönjoh-

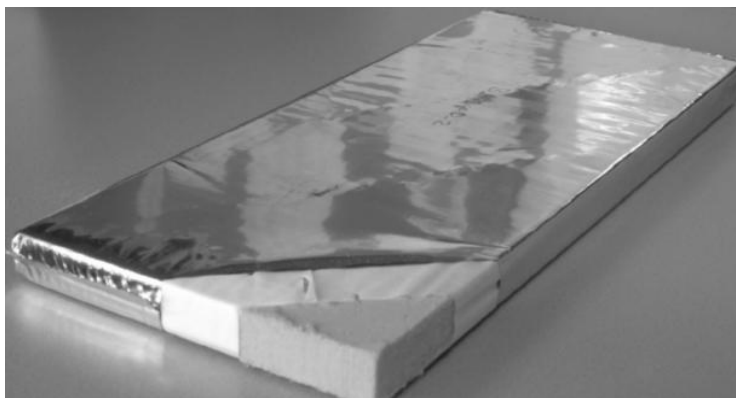
tavuuden hajonta, suunnitelmien mukainen kosteuspitoisuus sekä lämmönjohtavuuden palautumaton heikkeneminen huomioidaan suunnittelulämmönjohtavuuden määrittämisessä (Ympäristäministeriö RakMK C4, 2002). Tästä johtuen laskennallista lämmönjohtavuutta (laboratorio arvo), jossa on huomioitu eristeen palautumaton heikkeneminen, korotetaan kaikilla lämmöneristeillä aina noin 0,001...0,003 W/mK materiaalista riippuen, jotta päästään suunnittelulämmönjohtavuuteen. Käytännössä liikkumattomaan ilmaan perustuvien lämmöneristeiden suunnittelulämmönjohtavuus ei voi olla silloin alle 0,030 W/mK.

### **3.4 Tulevaisuuden lämmöneristeitä**

Rakenteita on pyritty vuosisatojen ajan hoikentamaan kehittämällä uutta rakenne- ja materiaalitekniikkaa. Seinärakenteen lämmöneristekerrosta paksuntamalla mennään vastaavirtaan pitkän ajan jatkunutta suuntausta ajatellen. Tämä suuntaus voi olla kuitenkin vain siirtymävaihe ennen paremmin lämpöä eristävien ns. supereristeiden käyttöönottoa rakennuksissa.

Tulevaisuuden lämmöneristeitä voivat olla tyhjiö- eli vakuumeristeet. Vakuumeristeitä on käytetty lähinnä prosessiteollisuuden eristeinä, joilta on vaadittu hyvin suurta eristävyttä ohuella eristepaksuudella. Tässä esitellään lyhyesti vakuumeristeiden etuja sekä niiden käyttöä vielä rajoittavia ongelmia.

Vakuumeristeet ovat lämmöneristeitä, jotka omaavat hyvin pienen lämmönjohtavuuden. Ne ovat mikrohuokoisista materiaaleista valmistettuja eristelevyjä, joissa ovat tiiviit, tavallisesti alumiinilaminaatista tehdyt, pintakerrokset. Eristemateriaaliin luodaan tyhjiö 1...5 mbar alipaineella, jolloin voidaan parhaimmillaan päästä eristeen lämmönjohtavuuteen 0,004 W/mK. Tämä on perinteistä villaa noin 10-kertaa pienempi lämmönjohtavuus. Tyhjiön pysyvyys ja alipaineen suuruus määrää pääosin eristeelle saatavan lämmönjohtavuuden. Käyttöolosuhteilla, kuten esimerkiksi kosteuspitoisuudella, on myös merkitystä eristeen toimivuuteen ([www.vacuuminsulation.co.uk](http://www.vacuuminsulation.co.uk), [akseli.tekes.fi](http://akseli.tekes.fi), 04.09 2008). Ilman tyhjiötä eristeen eristävyys on valmistajasta riippuen noin 0,021 W/mK eli hieman parempi kuin polyuretaanieristeillä.



**Kuva 31 Vakuumeriste, joka on pinnoitettu alumiinilaminaatilla ([www.emeraldinsight.com](http://www.emeraldinsight.com))**

Vakuumeristeisiin kohdistuu kokoonpuristava voima, kun eristeeseen muodostetaan alipaine. Tällöin eristeen rakenteen tulee olla riittävän vahva, jotta eriste ei puristu kokoon tai kuoriosat eivät paikallisesti lommahda. Eristeen ja sen saumojen tulee erityisesti olla ilmatiiviitä, koska muuten alipaine ei kestä eristeessä. Vakuumeristeiden alumiinilaminaatti- päällysteellä eristelevy saadaan ilmanpitäväksi. Eristeen saumat ovat ilmatiiviyden kannalta juuri ongelmallisia ja ongelmana on myös eristeen kiinnittäminen seinän kantavaan osaan. Vakuumeristeitä on saatavilla normaalin eristelevyn kokoisena ja niiden paksuudet vaihtelevat 6...20 mm ([www.microthermgroup.com](http://www.microthermgroup.com)). Vakuumeristeiden työstäminen on vaikeaa nykyisiin lämmöneristeisiin verrattuna, jotta vakuumia ei tuhota työstettäessä. Tämä asettaa oman vaikeutensa eristeen käytölle ([www.glacierbay.com](http://www.glacierbay.com), [akseli.tekes.fi](mailto:akseli.tekes.fi), 04.09.2008)

Vakuumeristeen ylivoimaisen lämmönjohtavuuden vuoksi sitä käyttäen voidaan päästä selvästi nykyisiä lämmöneristeitä ohuempiin eristepaksuuksiin. Tällöin rakenteista voidaan saada nykyisiä ohuempia, vaikka niiden lämmöneristävyys on suhteellisesti paljon parempi. Vakuumeristeiden käyttöönottoa rajoittaa kuitenkin teknisten ongelmien lisäksi eristeiden hinta. Vakuumeristeen kuutiohintaa on keskimäärin 20-kertainen mineraalivillan nähden. Vakuumeristeen neliöhinta tulee vastaavasti tällöin yli 2-kertaa mineraalivillaa kalliimmaksi, kun seinän U-arvo on 0,10. Vakuumeristeiden neliöhinta suhteessa polyuretaanieristeisiin on tällöin noin 25...30 % kalliimpi. Vakuumeristeiden ylivoimainen lämmöneristävyys tasaa eristeiden välisiä hintaeroja. Vakuumeristeillä on saatava kuitenkin merkittävää taloudellista etua ennen kuin niiden käyttäminen lisääntyy, koska tyhjiön pysyvyys asettaa riskin eristeen käytölle. Itävallassa, Saksassa ja Sveitsissä vakuumeristeitä on jo käytetty matala- ja passiivienergia talojen rakentamiseen uudis- ja



korjausrakennuskohteissa. Korjausrakentamiskohteessa vakuumieristeen reilusti ohueman eristekerroksen etu voi tulla jo kannattavaksi, koska 50 mm:n eristepaksuudella saadaan passiivenergiatalon seinälle vaadittava U-arvo.

## 4. Lämmöneristeiden paksuuden kasvaminen

Jotta seinärakenteen lämmöneristävyyttä saadaan parannettua riittävästi, on nykyisten lämmöneristeiden paksuutta kasvatettava. Lämmöneristeen paksuuden kasvattaminen tulee kasvattamaan koko rakenteen paksuutta, kun oletetaan sisä- ja ulkokuoren paksuuden pysyvän entisellään. Tämä tulee aiheuttamaan sen, että rakenteiden vakiomittajärjestelmä tulee muuttumaan ja kantavalle seinärakennosalle tulevat kuormitukset kasvaa. Lisäksi ulkokuoren kannattelevien kiinnikkeiden pituus ja niihin kohdistuva rasitus kasvaa. Seuraavassa lasketaan tarvittavat lämmöneristeen paksuudet eri seinärakenteissa seinän eri U-arvoille, sekä tutkitaan eristepaksuuden kasvamisesta aiheutuvia muutoksia seinärakenteeseen.

### 4.1 U-arvon laskenta seinärakenteelle

Betonisen ulkoseinärakenteen U-arvon laskenta esitetään 1 ja 2-ulotteisesti seuraavassa betonisandwich-, eriytetylle ja eristerapatulle seinärakenteelle.

#### 1-ulotteinen tarkastelu

U-arvo eli rakenteen lämmönläpäisykerroin lasketaan RakMK:n osan C4 mukaan kaavalla

$$U = 1 / R_T, \quad (1)$$

missä

$R_T$  on rakennusosan kokonaislämmönvastus sisältä ulos [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ].

Kun seinärakenteen ainekerrokset ovat tasapaksuja ja tasa-aineisia ja lämmön oletetaan siirtyvän ainekerrokseen nähden kohtisuoraan, lasketaan rakennusosan kokonaislämmönvastus kaavalla

$$R_T = R_{si} + R_i + R_{se}, \quad (2)$$

missä  $R_i = \frac{d}{\lambda_i}, i = 1 \dots m$

$d$  = ainekerroksen  $i$  paksuus [mm]

$\lambda_i$  = ainekerroksen  $i$  lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvo [ $\text{W/mK}$ ]

$R_{si} + R_{se}$  = sisä- ja ulkopuolisen lämmönvastuksen summa [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ].

Seinärakenteen sisäpuolinen pintavastus  $R_{si}$  on vaakasuoraan  $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$  ja ulkopuolinen pintavastus  $R_{se}$   $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Tuulettuvan rakenteen tuuletusvälin ja sen ulkopuolisen rakenteen lämmönvastusta ei saa ottaa huomioon rakenteen kokonaislämmönvastusta laskettaessa. Tuuletusraon sisäpuolisen rakenteen ilmakerrokseen rajoittuvan pinnan pintavastuksena voidaan käyttää sisäpuolisen pintavastuksen arvoja (Ympäristöministeriö RakMK C4 2002).

Epätasa-aineisen kerroksen, jossa on pintojen suuntaisia ainekerroksia, joiden lämmönvastus rinnakkaisissa osa-alueissa eroaa, lasketaan epätasa-aineisen ainekerroksen  $j$  lämmönvastus kaavalla

$$\frac{1}{R_j} = \frac{f_a}{R_{aj}} + \frac{f_b}{R_{bj}} + \dots + \frac{f_n}{R_{nj}}, \quad (3)$$

missä  $f_a, f_b, \dots, f_n$  = epätasa-aineisessa ainekerroksessa  $j$  olevan tasa-aineisen osa-alueen  $a, b, \dots, n$  suhteellinen osuus ainekerroksen kokonaispinta-alasta

$R_{aj}, R_{bj}, \dots, R_{nj}$  = epätasa-aineisessa kerroksessa  $j$  olevan tasa-aineisen osa-alueen  $a, b, \dots, n$  lämmönvastus, jossa  $R_{aj} = d_j / \lambda_{aj}$  jne. [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ].

$\lambda_{aj}, \lambda_{bj}, \dots, \lambda_{nj}$  = ainekerroksen  $j$  osa-alueen  $a, b, \dots, n$  lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvo [ $\text{W/mK}$ ].

Kuitenkin jos epätasa-aineisessa ainekerroksessa vierekkäisten aineiden lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvot poikkeavat toisistaan enemmän kuin viisikertaisesti ei edellä esitetty kaava sovellu käyttöön (Ympäristöministeriö RakMK C4, 2002)

Epätasa-aineisia ainekerroksia sisältävän rakenteen kokonaislämmönvastus  $R_T$  lasketaan kaavalla

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}, \quad (4)$$

missä  $R_1, R_2, \dots, R_n$  = on epätasa-aineisen ainekerroksen lämmönvastus

laskettuna kaavalla 3. [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ]

$R_{si} + R_{se} =$  sisä- ja ulkopuolisen lämmönvastuksen summa [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ].

U-arvo saadaan laskettua tämän jälkeen kaavalla 1.

Rakenteessa olevat ja sille ominaiset säännöllisesti toistuvat kylmäsillat otetaan huomioon lisäämällä U-arvovaatimusta kylmäsilloista aiheutuvien vaikutuksien verran, kun laskelmilla osoitetaan U-arvon vaatimuksenmukaisuus. Tämä koskee mm. siteitä, kannaksia sekä tuki- ja runkorakenteita, jotka ovat rakenteelle tyypillisiä koko sen vaipan alueella. Yksittäisiä kylmäsiltoja, joita ei tavallisesti ole rakenteessa, ei tarvitse huomioida U-arvon laskennassa (Ympäristöministeriö RakMK C4, 2002).

Yhdistämällä kaavat 1 ja 2 sekä lisäämällä kylmäsillan vaikutus vaadittuun U-arvoon saadaan

$$U_{\text{lisätty}} = \frac{1}{R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}}, \quad (5)$$

missä  $R_1 + R_2 + \dots + R_n =$  eri ainekerrosten lämmönvastuksien summa. Ainekerroksen lämmönvastus on saatu kaavalla

$$R_i = \frac{d}{\lambda_i}, i = 1 \dots m \quad (6)$$

tasa-aineiselle ainekerrokselle ja kaavaa 3 soveltaen epätasa-aineiselle ainekerrokselle.

Kaavaa 5 ja 6 soveltaen saadaan määritettyä tarvittava eristepaksuus, kun tiedetään seinälle vaadittava U-arvo ja kylmäsiltojen vaikutus U-arvoon. Tällöin saadaan kaava

$$d_{\text{eriste}} = \lambda_{\text{eriste}} \left( \frac{1}{U_{\text{lisätty}}} - \left( R_{si} + R_{se} + \frac{d_{UKbetoni}}{\lambda_{betoni}} + \frac{d_{SKbetoni}}{\lambda_{betoni}} + \frac{d_{tuulensuoja}}{\lambda_{tuulensuoja}} \right) \right), \quad (7)$$

Betonisandwich- seinärakennetta voidaan pitää epätasa-aineisena rakenteena, kun lämmöneristeenä on mineraalivilla, jossa on tuuletusurat. Tällöin rakenne on lievästi tuuletettava ja tuuletusurassa ilman lämmönvastukseksi voidaan ottaa puolet tuulettamattoman ilmvälin vastuksesta eli  $0,085 \text{ m}^2\text{K/W}$  (Salonvaara M. et al 2003). Muovipohjaisia eristeitä käytettäessä rakenne on tasa-aineinen, kun eristeissä ei ole tuuletusuria.

VTT:n tutkimusten mukaan diagonaaliansaan diagonaalin ja paarteen liitoskohta aiheuttaa nykyisillä eristepaksuuksilla lisäyksen konduktanssiin, joka on 0,002 W/K. Liitoskohtia on yhden neliömetrin alueella diagonaaliansastuksella  $k_{600} = 1/(0,3\text{m} \times 0,6\text{m}) = 5,556 \text{ kpl/m}^2$ , joten kylmäsillan vaikutus U-arvoa kasvattaen on  $0,0111 \text{ W/m}^2\text{K}$  (Salonvaara M. et al. 2003).

Eriytetty ja eristerapattu seinärakenne ovat tasa-aineisia rakenteita, joissa on tavallisesti  $0 \dots 4 \text{ kpl/m}^2$  teräsiteitä, joiden läpimitta vaihtelee  $4 \dots 16 \text{ mm}$ . Rakentamismääräyskoelman osan C4 mukaan, rakennusosan U-arvon voidaan olettaa kasvavan  $0,006 \text{ W/m}^2\text{K}$ , kun rakenteen läpi menee läpimitaltaan  $4\text{-}5 \text{ mm}$ :n ruostumattomia teräsiteitä  $4 \text{ kpl/m}^2$  (RakMK C4, 2002).

### **2-ulotteinen tarkastelu**

Seinän U-arvo voidaan määrittää hieman 1-ulotteista laskentaa tarkemmin 2-ulotteisesti seinärakenteen pituusleikkauksen läpi kulkeutuvan lämpövirran tiheyden mukaan.. Tarkasteluhetkellä rakennuksen sisälämpötila on  $+21 \text{ }^\circ\text{C}$  ja ulkolämpötila  $-15 \text{ }^\circ\text{C}$  ja seinän päätyreunoilla lämpövirran suuruus on nolla eli lämpöä siirtyy vain seinän sisä- ja ulkopinnan läpi. Keskimääräisen lämpövirran tiheyden  $q$  perusteella saadaan laskettua rakenteen U-arvo, kun tiedetään lämpötilaero rakenteen yli, kaavalla

$$U = \frac{q}{\Delta T}, \quad (8)$$

missä  $q$  = keskimääräinen lämpövirran tiheys [ $\text{W/m}^2$ ]  
 $\Delta T$  = lämpötilaero rakenteen yli [ $^\circ\text{C}$ ].

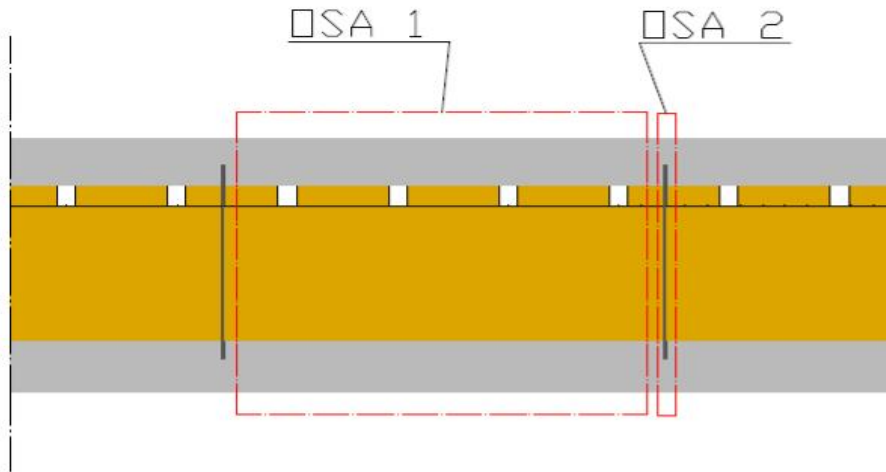
Rakenteen toistuvat kylmäsillat huomioidaan lämpövirran tiheyden suuruudessa, siten että lasketaan keskimääräinen lämpövirran tiheys, joka saadaan eri pystyleikkauksien kohdilla olevien leikkauksien painotetuilla pinta-aloilla kerrottujen lämpövirtojen tiheyksien summana. Tällöin keskimääräisen lämpövirran tiheyden suuruus on

$$q = \sum_i^n q_i \cdot f_i, \quad (9)$$

missä  $q_i$  = lämpövirran tiheys leikkauksessa  $i$

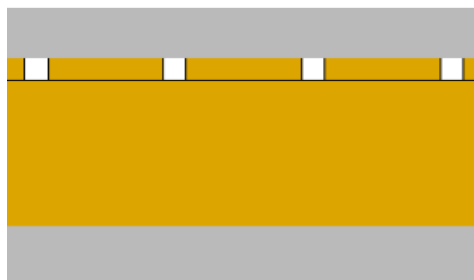
$f_i$  = painotettu pinta-ala leikkauksessa i.

Laskennassa lämpövirran tiheys määritetään seinän pituusleikkauksessa, seinän kahden pystyleikkauksen kohdalla; rakenteessa jossa ei ole kylmäsiltaa aiheuttavia ansaita ja ansaan kohdalla. Keskimääräinen lämpövirran tiheys saadaan kaavalla 9. Kuvassa 32 on esitetty seinärakenteen pituusleikkaus, jonka läpi kulkeutuvan lämpövirran tiheyden keskimääräistä suuruutta tarkastellaan, sekä tarkasteltavat leikkausosat 1 ja 2



**Kuva 32 Sandwich- seinärakenteen pituuspoikkileikkaus, jossa esitetään tarkasteltavat leikkausosat 1 ja 2**

Kuvassa 33 ja 34 on esitetty laskennassa käytetyt osien 1 ja 2. leikkaukset



**Kuva 33 2-d laskentamallissa käytetty leikkaus, osa 1**



Kuva 34 2-d laskentamallissa käytetty leikkaus, osa 2 (ansaan kohdalta)

#### **4.2 Seinärakenteen lämmöneristeiden paksuudet eri U-arvoilla**

1-ulotteisesti kaavaa 7. ja 2-ulotteisesti 2-d laskentamallia käyttäen on laskettu eri eristemateriaaleilla tarvittavat lämmöneristepaksuudet umpinaisen seinäelementin keskeltä eri seinärakenteissa, kun seinän U-arvona on 0,16, 0,14 ja 0,10 W/m<sup>2</sup>K. Lämmöneristeiden lämmönjohtavuuksina on käytetty taulukossa 2. esitettyjä uusia vuoden 2010 alussa markkinoilla olevien eristeiden ennustettuja suunnittelulämmönjohtavuuksien arvoja.

Laskennassa ei ole huomioitu sisäisen konvektion vaikutusta mineraalivillaeristeille, jolla voi olla eristekerroksen paksuutta lisäävä vaikutus erityisesti suurilla eristepaksuuksilla. Seinärakenteen lämpimän tilan nykyisien lämmöneristysmääräyksien kiristys 30...40 %:lla vastaa seinälle U-arvoa 0,14...0,16. Seinän U-arvo 0,10 vastaa passiivienergiarakennuksen seinille vähintään vaadittavaa U-arvoa. Saatuja eristepaksuuksia on verrattu nykyisiin eristepaksuuksiin nykyisillä eristeillä. Saadut tulokset on esitetty taulukoissa 3, 4 ja 5, joissa tulokset on pyöristetty 5 mm:n tarkkuuteen.

1-ulotteisen ja 2-ulotteisen tarkastelun välillä eristepaksuudet poikkeavat hieman toisistaan. Eroa tuloksiin aiheuttaa osaltaan ansaiden kylmäsilta-vaikutuksen suuruuden laskenta sekä tuuletusurituksen huomiointi mineraalivillaeristeillä. 1-ulotteisessa tarkastelussa kylmäsilta oletetaan vakioksi eristepaksuuden suhteen. 2-ulotteisessa tarkastelussa kylmäsilta suuruudeksi arvioidaan lämpövirran suuruus painotettuna kylmäsilta suhteelli-

sella pinta-alalla. Teoreettisesti tarkastellen kylmäsiilan suuruus muuttuu eristepaksuuden kasvaessa.

### **Sandwich- rakenne**

Sandwich- rakenteeseen tarvittavien lämmöneristeiden paksuutta tarkasteltiin ei-kantavassa sandwich- rakenteessa, jossa sisäkuoren paksuus oli 80 mm ja ulkokuoren 70 mm. Tarvittavat lämmöneristepaksuudet ovat esitetty taulukossa 3. Polyuretaanin ja mineraalivillan sekaeritysratkaisussa lämmöneristeenä on käytetty mineraalivillana vuorivillaa.

**Taulukko 3 Tarvittavat lämmöneristepaksuudet ja eristekerrosten lukumäärä betonisandwich- seinärakenteessa**

<b>Rakenne:</b>	Betonisandwich, SK 80 mm UK 70 mm (eristekerrosten lkm.)					
<b>Eriste</b>	$\lambda_D$	<b>Ansastus</b>	<b>Nykyinen eristepaksuus</b>	<b>U-arvo 0,16</b>	<b>U-arvo 0,14</b>	<b>U-arvo 0,10</b>
	W/mK		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
vuorivilla	0,036	Diag.ansas k600	160 (1)	245 (2)	285 (2)	420 (3)
lasivilla	0,035	Diag.ansas k600	160 (1)	240 (2)	280 (2)	410 (2)
EPS/XPS	0,03	Diag.ansas k600	150 (1)	200 (1)	235(1)/(2)	345(1)/(2)
EPS/XPS	0,03	pistokas 4 kpl /m2	150 (1)	190(1)	215(1)/(2)	310(1)(2)
PUR	0,024	Diag.ansas k600	105 (1)	160(1)	185 (1)	275 (2)
PUR	0,024	pistokas 4 kpl /m2	105 (1)	150 (1)	175 (1)	250 (2)
PUR 70+min.villa	0,024 ;0,036	Diag.ansas k600		70;140 (2)	70;180 (2)	70;315 (3)
PUR 90+min.villa	0,024 ;0,036	Diag.ansas k600		90;110 (2)	90; 150 (2)	90;285 (3)
PUR 120+min.villa	0,024 ;0,036	Diag.ansas k600		120; 65 (2)	120; 105 (2)	120;240 (2 tai 3)
PUR 160+min.villa	0,024 ;0,036	Diag.ansas k600		-	160; 45 (2)	160; 180(2)
PUR 180+min.villa	0,024 ;0,036	Diag.ansas k600		-	-	180; 150 (2)

Taulukon 3 tuloksien laskenta on tarkemmin esitetty liitteessä 1. Tuloksista nähdään, että U-arvo vaatimuksen kasvaessa eristeiden pienempi lämmönjohtavuus korostuu eristepaksuuksissa yhä enemmän. Tuloksien perusteella voidaan nähdä, että lämmöneristeen paksuus kasvaa keskimäärin 1,5-kertaiseksi, kun seinän U-arvo muuttuu nykyisestä 0,16:een. Vastaavasti muutos nykyisestä U-arvoon 0,14 kasvattaa eristekerroksen paksuuden 1,75-



kertaiseksi ja U-arvoon 0,10 2,5-kertaiseksi. Suurin eristekerroksen kasvu tapahtuu mineraalivillaeristeillä, koska niiden suunnittelulämmönjohtavuutta ei voida nykyisestä enää kovinkaan paljon pienentämään. Muovipohjaisilla lämmöneristeillä eristeen paksuus ei kasva yhtä voimakkaasti, koska suhteellisesti näiden eristeiden lämmönjohtavuutta saadaan vuoden 2010 alkuun mennessä pienennettyä mineraalivilloja enemmän. Muovipohjaisien eristeillä päästään kokonaisuutena sandwich- rakenteessa keskimäärin 15...33 % ohuemmilla eristepaksuuksilla kuin mineraalivillalla.

Vuori- ja lasivillan eristepaksuudet ovat lähes samoja taulukon 3. mukaan. Seinän U-arvoon 0,16 päästään juuri yhdellä lasivillakerroksella, mutta U-arvo 0,14 vaatii jo kaksi lasivillakerrosta. Vuorivillaa tarvitsee laittaa aina kaksi kerrosta, kun eristekerroksen paksuus ylittää 200 mm. Poikkeavana ratkaisuna voidaan päästä vuorivillaa käyttäen aina yhdellä eristekerroksella, jos eristekerros tehdään eristetehtaalla valmiiksi leikatuista eristesuikaleista, jotka saadaan kääntämällä perinteinen eristelevy pystyyn. Tällöin kuitenkin eristelevyn lämmönjohtavuus kasvaa ja tällöin tarvittavat eristepaksuudet ovat taulukon 3. tuloksia suurempia. EPS- ja XPS- eristeillä päästään 200 mm:n eristepaksuuteen U-arvon 0,16-tasolla. XPS- eristeiden käytöllä ei kuitenkaan päästä yhdellä eristekerroksella U-arvoon 0,14, vaan tämä vaatii jo kaksi eristekerrosta.. Polyuretaanieristeitä käyttäen voidaan päästä lähes nykyisillä mineraalivillan eristepaksuuksilla U-arvoihin 0,16 ja 0,14.

U-arvoon 0,10 pääsemiseksi tarvitaan mineraalivillaa vähintään 410 mm, EPS-, XPS- eristettä vähintään 310 mm ja polyuretaania vähintään 250 mm. Mineraalivillaa käyttäen sandwich- rakenteen paksuus kantavassa seinärakenteessa tulee olemaan tällöin vähintään 630 mm. Jotta lämmöneristekerrokset eivät kasvaisi reilusti yli 350 mm:n, on tehtävä ns. sekaeristysratkaisuja, joissa esimerkiksi mineraalivillan kanssa käytettäisiin PUR- eristeitä. Rakennusfysikaalisesti ajatellen PUR- eristeet täytyy asentaa aina sisäkuorta vasten, ja sen päälle mineraalivilla. Tällöin rakenteen vesihöyryn läpäisevyys kasvaa ulospäin. Sekaeristysratkaisun tarkempi rakenteellinen ja rakennusfysikaalinen sekä taloudellinen tarkastelu tulee kuitenkin selvittää muihin ratkaisuihin nähden, jotta sen valmistaminen on perusteltua.

Sandwich- elementeissä voidaan muovipohjaisien eristeiden kanssa käytettävällä pistokas- kiinnikkeillä päästä noin 10...35 mm ohuempiin eristepaksuuksiin kuin diagonaa-

lianssilla, koska pistokas- kiinnikkeiden kylmäsilta-vaikutus on diagonaali-ansaita pienempi, ansaiden jakovälin ollessa 600 mm. Ohuemmalla eristekerroksella voi tuotanto-tekniisesti olla merkittäkin etu, jos eristekerroksen tarvittava paksuus voidaan tehdä yhdellä kerroksella kahden kerroksen sijaan.

### ***Eriytetty rakenne***

Eriytettyyn seinärakenteeseen tarvittavien lämmöneristeiden paksuutta tarkastellaan sisäkuorirakenteessa, jossa sisäkuoren paksuus on 120 mm. Tarkasteltavassa rakenteessa mineraalivillan kanssa tuulensuojana on tuulensuojavilla ja vastaavasti muovipohjaisilla eristeillä tuulensuojakipsilevy tai vastaava. EPS- eristeiden yhteydessä voidaan käyttää lasikuitukangasta. Käytettävän tuulensuojakipsilevyn ja lasikuitukankaan tulee täyttää vähintään B-s1,d0- paloluokan vaatimukset. Tarkastelun ulkopuolelle on jätetty Tyvek-pintainen mineraalivillaneriste, jolla voitaisiin yhdellä tuotteella saada tarvittava tuulensuoja rakenteelle. Kuitenkin palomääräysten vuoksi Tyvek- pintaisen eristeen käyttö on rajattu maksimissaan kolmekerroksisiin asuinrakennuksiin, koska Tyvek- kangas aiheuttaa palossa palavia pisaroita. Eriytettyyn seinärakenteeseen tarvittavat lämmöneristepaksuudet ovat esitetty taulukossa 4.

**Taulukko 4 Eriytetyssä seinärakenteessa tarvittavat lämmöneristeen kokonaispaksuudet sisältäen tuulensuojan**

<b>Rakenne:</b> Eriytetty betonijulkisivu,, SK 120 mm (eristekerrosten lkm.)							
<b>Eriste</b>	<b>Rakeneratkaisu</b>	$\lambda_D$	<b>kiinnikkeet</b>	<b>Nykyinen eristepaksuus</b>	<b>U-arvo 0,16</b>	<b>U-arvo 0,14</b>	<b>U-arvo 0,10</b>
		W/mK		[mm]	[mm] [kpl]	[mm] [kpl]	[mm] [kpl]
vuorivilla	eriste+tuulensuojavilla 30 mm	0,036; 0,034	kiinnike 4kpl/m <sup>2</sup>	120+30 (2)	220 (2)	255 (2)	370 (3)
lasivilla	eriste+tuulensuojavilla 30mm	0,033; 0,031	kiinnike 4kpl/m <sup>2</sup>	120+30 (2)	200 (2)	235 (2)	340 (3)
EPS	eriste+ lasikuitukan- gas	0,03	kiinnike 4kpl/m <sup>2</sup>	-	185 (1)	215 (1)	310 (1)
XPS	eriste+ tuulensuoja- kipsilevy 9 mm	0,030; 0,21	kiinnike 4kpl/m <sup>2</sup>	-	195 (2)	220 (2)	320 (3)
PUR	eriste+ tuulensuoja- kipsilevy 9 mm	0,024; 0,21	kiinnike 4kpl/m <sup>2</sup>	-	155 (2)	180 (2)	255 (3)
		HUOM. paksuudet sisältävät tuulensuojan paksuuden					

Taulukon 4 tuloksien laskenta on esitetty tarkemmin liitteessä 2. Tuloksista nähdään, että eristepaksuudet ovat samaa suuruusluokkaa kuin sandwich- rakenteessa. Eriytetyllä rakenteella voidaan mineraalivillaeristeitä käyttäen päästä ohuemmilla eristepaksuuksilla kuin vastaavassa sandwich- rakenteessa. Lasivillaa tarvitaan keskimäärin noin 7...9 %

ohuempia eristepaksuuksia kuin vuorivillaa, koska pehmeämmän lasivillan suunnittelulämmönjohtavuus on vuorivillan suunnittelulämmönjohtavuutta pienempi. Eriytetyssä seinärakenteessa voidaan käyttää pehmeämpää villaa kuin sandwich- ja eristerappaus rakenteessa, koska lämmöneristeeseen ei kohdistu suuria kuormituksia. Muovieristeitä käyttäen eristepaksuudet ovat keskimäärin 11...30 % ohuempia kuin mineraalivillalla. Muovieristeillä saatava hyöty eristekerroksen paksuudessa ei suhteellisesti ole niin suuri kuin sandwich- rakenteessa, koska tuulensuojamateriaalin lämmönjohtavuus on suhteellisen suuri lämmöneristeen lämmönjohtavuuteen verrattuna.

U-arvoihin 0,16 ja 0,14 päästään mineraalivilla ja muovipohjaisilla eristeillä kahdella lämmöneristekerroksella, kun huomioidaan tuulensuojakerros. XPS- eristeitä käyttäen tarvitaan kuitenkin kolme lämmöneristyskerrosta U-arvoon 0,14 pääsemiseksi. U-arvoon 0,10 pääseminen vaatii kaikilta eristeiltä kolme lämmöneristekerrosta, paitsi EPS- eristeiltä, joilla voidaan päästä kahdella kerroksella.

### ***Eristerapattu rakenne***

Eristerapatussa seinärakenteessa lämmöneristeiden paksuutta tarkastellaan kolmikerros- ja ohuteristerapatulle rakenteelle. Kantava rakenne on sisäkuorielementti, jonka paksuus on 120 mm. Kolmikerrosrappaus on suoritettu mineraalivillan päälle. Ohuteristerappaus taas on tehty mineraalivillan, EPS-, XPS-, tai PUR- eristeen päälle. Ohuteristerapatuissa seinissä käytetään mineraalivillana lamellivillaa, jolloin eristeen jäykkyys kasvaa, mutta silloin myös lämmönjohtavuus kasvaa kolmikerrosrappauksessa käytettävään villaan nähden. Kolmikerrosrappaus- rakenteessa lämmöneriste on mekaanisilla kiinnikkeillä sisäkuoresta kiinni. Kiinnikkeitä on 4 kpl/m<sup>2</sup>. Ohuteristerappauksessa eriste on liimalastilla tai betonin muodostamalla tartunnalla sisäkuoresta kiinni. Eristerapatulle seinärakenteelle tarvittavat lämmöneristepaksuudet on esitetty taulukossa 5.

**Taulukko 5 Tarvittavat lämmöneristepaksuudet eristerapatussa ulkoseinässä**

<b>Rakenne:</b> Eristerapattu betonijulkisivu, SK 120 mm (eristekerrosten lkm)							
<b>Eriste</b>	<b>rappausratkaisu</b>	$\lambda_D$	<b>kiinnikkeet</b>	<b>Nykyinen eristepaksuus</b>	<b>U-arvo 0,16</b>	<b>U-arvo 0,14</b>	<b>U-arvo 0,10</b>
		W/mK		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
vuorivilla	kolmikerrosrappaus	0,036	kiinnike 4kpl/m <sup>2</sup>	150 (1)	225 (2)	260 (2)	375 (2)
lasivilla	kolmikerrosrappaus	0,035	kiinnike 4kpl/m <sup>2</sup>	150 (1)	220 (1)	250 (2)	365 (2)
vuorivilla	ohuteristerappaus	0,041	ei	160 (1)	250 (1)	285 (1)	400 (1)
EPS/	ohuteristerappaus	0,03	ei	150 (1)	185 (1)	210 (1)	300 (1)
PUR	ohuteristerappaus	0,024	ei	110 (1)	145 (1)	170 (1)	235 (2)

Taulukon 5. tuloksien laskenta on esitetty tarkemmin liitteessä 3. Tulosten mukaan eristerapatuilla seinillä päästään keskimäärin samansuuruisilla eristekerroksilla kuin sandwich- ja eriytettyssä seinärakenteessa. Eristepaksuudet kasvavat nykyisestä 1,2...1,5-kertaiseksi U-arvoon 0,16 pääsemiseksi ja vastaavasti 1,4...1,8-kertaiseksi U-arvoon 0,14 pääsemiseksi. Tulosten perusteella voidaan nähdä, että kolmikerrosrapatussa seinässä päästään pienemmällä mineraalivillakerroksella kuin vastaavasti ohuteristerapatussa seinässä, vaikka ohuteristerapatussa seinässä ei ole kylmäsiltoja aiheuttavia kiinnikkeitä. Tämän perusteella voidaan todeta eristekerroksen suuremmalla lämmönjohtavuudella olevan suurempi merkitys eristepaksuuteen kuin kolmikerrosrappauksen kiinnikkeiden aiheuttamilla kylmäsiltoilla

Kolmikerrosrappauksessa päästään lasivillaa käyttäen seinän U-arvoon 0,16 yhdellä eristekerroksella, mutta U-arvoon 0,14 ja 0,10 tarvitaan kaksi eristekerrosta. Vuorivillaa tarvitsee kolmikerrosrappauksessa laittaa aina vähintään kaksi kerrosta. Ohuteristerappauksessa lamellivillaa käyttäen voidaan päästä yhdellä eristekerroksella U-arvoon 0,10 saakka, koska villakerros kootaan palasista, jotka saadaan leikkaamalla pystyyn käännetty eristelevy eristetehtaalla tiettyyn paksuuteen. PUR- eristeitä käytettäessä ohuteristerappauksella päästään kaikkein ohuimpiin eristekerroksiin, kuitenkin U-arvoon 0,10 pääsemiseksi joudutaan tavallisesti kaksikerroksiseen eristeratkaisuun. EPS- eristeillä voidaan päästä yhdellä eristekerroksella vaadittuihin U-arvoihin.

Muovipohjaisia eristeitä käytettäessä ohutererapatussa seinärakenteessa on huomioitava eristelevyjen lämpöliikkeet. Eristelevyjen lämpöliikkeet voivat aiheuttaa halkeamia rappauksen pintaan. Eristelevyjen koolla ja saumaratkaisulla on tällöin tärkeä rooli eristerakenteen muodonmuutoksien ehkäisyssä.

Taulukoiden 3, 4 ja 5 tulosten perusteella voidaan todeta, että muovipohjaisilla eristeillä päästään selvästi ohuempiin kerrospaksuuksiin kuin mineraalivilloilla. Rajoitteena muovipohjaisten eristeiden käytölle ovat kuitenkin niiden palotekniset ominaisuudet Suomen rakentamismääräyksissä oleviin palomääräyksiin nähden. EPS ja XPS-, ja PUR- eristeitä voidaan käyttää yksistään lämmöneristeenä P1-paloluokan asuinrakennuksessa, jossa on maksimissaan 8-kerrosta. Ohuempien eristepaksuuksien vuoksi muovipohjaisten lämmöneristeiden käyttö tulee olemaan merkittävä vaihtoehto villaeristeiden rinnalla.

Rakenteellisesti tarkastellen kaikissa seinärakenteissa joudutaan eristerakenteen paksuutta kasvattamaan lähes 2,5-kertaiseksi nykyisestä seinän U-arvoon 0,10 pääsemiseksi. Eriytetyllä seinärakenteella voidaan päästä 0...10 % ja vastaavasti eristerapatulla seinärakenteella 0...12 % ohuemmilla eristepaksuuksilla kuin sandwich- rakenteella. Kuitenkin sandwich- rakenteen kokonaispaksuus jää eriytettyä rakennetta ohuemmaksi, vaikka sillä päästääkin ohuemmilla eristepaksuuksilla. Eriytetyn rakenteen tuuletusväli lisää seinän kokonaispaksuutta sekä kuorien paksuudet, jotka ovat yleensä sandwich- rakenteen kuoria paksumpia. Eristerapatuilla rakenteilla päästään aina ohuemmilla rakenteilla, koska rappauskerroksen paksuus on ohut suhteessa muiden rakenteiden ulkokuoren paksuuteen.

### ***4.3 Eristepaksuuden ja -materiaalin vaikutukset seinärakenteeseen***

Lämmöneristepaksuuden kasvaessa seinärakenteen kantokyvyssä ja rakennusfysikaalisessa toiminnassa, sekä seinäelementin ulkokuoren kiinnikkeissä, ikkuna- ja nurkkaliitoksissa sekä nostojärjestelmässä tapahtuu muutoksia.

#### ***Seinärakenteen kantokyky***

Eristekerroksen paksuuden kasvaessa ulkokuori siirtyy kauemmaksi kantavasta sisäkuoresta. Sandwich- rakenteessa tämä kasvattaa ansaille sekä sisäkuorelle tulevia jännityk-

siä. Vastaavasti eriytetyssä ja eristerapatussa seinärakenteessa sisäkuorelle ulkokuoren ja eristeen painosta tuleva epäkeskinen kuormitus kasvaa.

Sandwich- rakenteen kantokyky on riippuvainen ansastuksen jäykkyydestä sekä siitä millainen yhteistoiminta sisä- ja ulkokuorien välille voi syntyä. Eristemateriaalin ominaisuudet vaikuttavat osaltaan kuorien välisen yhteistoiminnan syntymiseen. Sandwich- rakenteen kantokyvyn menettäminen tapahtuu joko kuorien välisen leikkauskapasiteetin ylittyessä tai rakenteen lommahtaessa. Yksinkertaisesti ajatellen eristerakroksen paksuutta lisättäessä sandwich- rakenteen kantokyvyn tulisi kasvaa, jos ansastuksen jäykkyys pysyy vakiona, koska eristelevyn taivutusjäyhyys kasvaa vaakasuunnassa. Käytännössä kuitenkin ansastuksen jäykkyys ei pysy vakiona vakioidulla ansasjaolla, koska eristerakroksen paksuuden kasvaessa ansaiden korkeus kasvaa, mikä vähentää ansastuksen jäykkyyttä.

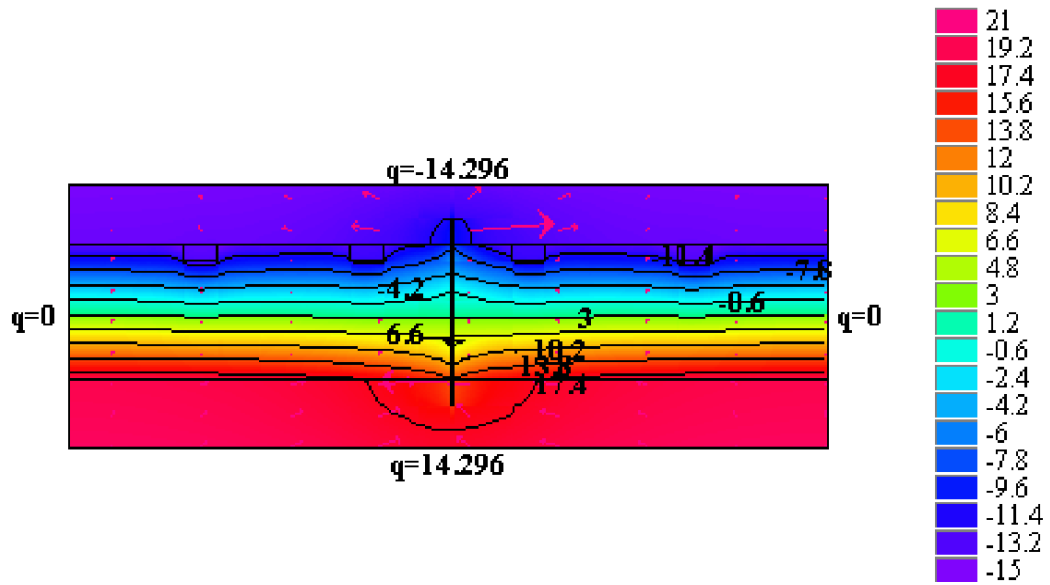
Muovipohjaisia eristeitä käyttäen sandwich- rakenteen kantokyky voi kasvaa, koska muovipohjaiset eristeet kestävät kovaa vetoa, leikkausta ja puristusta hyvin. Tällöin eriste voi kantaa kuormitusta ja jäykistää rakennetta lommahdusta vastaan ilman, että side- raudoituksen määrää lisätään, koska eriste voi ottaa aina tartuntaa betonikuorista.

Eriytetyn ja eristerapatun seinärakenteen kantokyky perustuu täysin sisäkuoren kantokykyyn. Sisäkuoren kantokyvyn menetys tapahtuu tavallisesti rakenteen lommahtaessa. Eristerakroksen paksuutta lisättäessä, kasvaa sisäkuorelle tuleva epäkeskinen kuormitus, jolloin sisäkuori voi lommahtaa aiempaa pienemmällä kuormituksella. Tällöin rakenteen kantokyky jää aikaisempaa pienemmäksi. Lämmöneristeen paksuudella tai jäykkyydellä ei voida juuri mitenkään jäykistää sisäkuoren rakennetta, koska lämmöneriste on yleensä vain ripustettu sisäkuoresta.

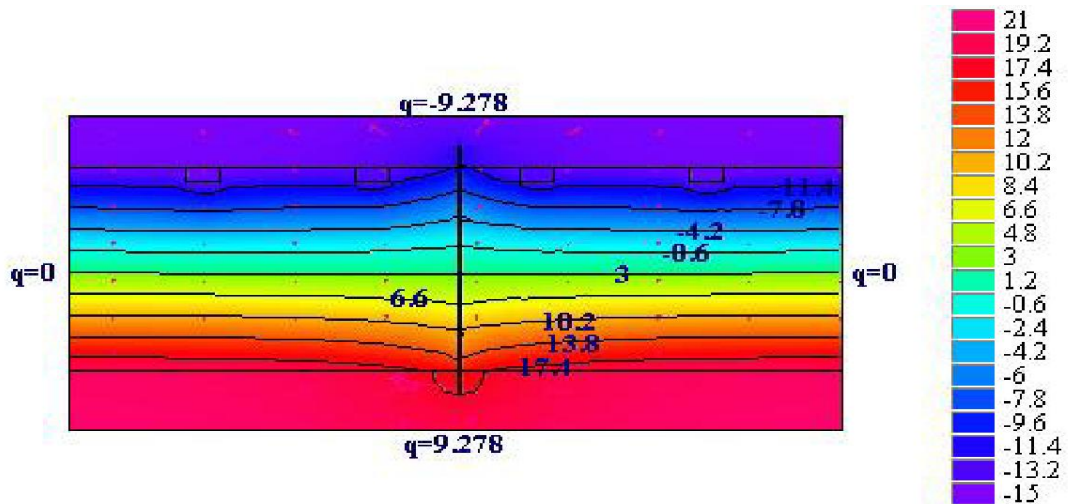
### ***Seinärakenteen lämpöjakauma ja kosteus***

Eristerakroksen paksuuden kasvaessa seinärakenteessa, kasvaa seinän lämmöneristävyys, jolloin lämpövirran suuruus  $Q$  vähenee seinärakenteen läpi sisältä ulos. Lämpövirran suuruuden vähentyessä seinässä, vähenee lämmöneristeen läpi tapahtuvat lämpövuodot, jolloin seinän sisä- ja ulkopinnan lämpötilaero kasvaa. Kuvassa on 35 ja 36 on esitetty eristepaksuuden vaikutus lämpövirran tiheyden suuruuteen stationääritilassa sandwich- seinärakenteessa. Laskenta on tehty 2-ulotteisella HEAT- 2 lämmönsiirtymistä mallinta-

valla ohjelmalla. Tarkasteluhetkellä rakennuksen sisälämpötila on +21 °C ja ulkolämpötila -15 °C. Lämpövirran tiheyden  $q$  etumerkki kertoo lämpövirran suunnan. Etumerkki on negatiivinen siellä, mihin suuntaan lämpövirta siirtyy.



Kuva 35 Sandwich- seinärakenteen, jossa on 160 mm mineraalivillaa, lämpötila- ja lämpövirran tiheys  $q$ . Diagonaaliansas on kuvassa keskellä. Lämpötilajakauma on esitetty väreillä ja käyrillä.



Kuva 36 Sandwich- seinärakenteen, jossa on 280 mm mineraalivillaa, lämpötila- ja lämpövirran tiheys  $q$ . Diagonaaliansas on kuvassa keskellä. Lämpötilajakauma on esitetty väreillä ja käyrillä.

Tarkasteltavan sandwich- seinärakenteen lämpövirran tiheys  $q$  väheni 14,296W/m<sup>2</sup>:stä 9,278 W/m<sup>2</sup>, kun eristekerroksen paksuus kasvaa 160...280 mm.

Liitteessä 4. esitetyn lämpötilajakauman perusteella voidaan nähdä, että ulkokuoren lämpötilat tulevat olemaan stationääritilassa lähes kauttaaltaan 280 mm:n ja 400 mm:n eristepaksuudella hieman matalampia kuin 160 mm:n eristepaksuudella. Ulkokuoren lämpötilat ovat keskimäärin 0,2...1 °C kylmempiä, kun lämmöneristeenä on 400 mm mineraalivillaa nykyisen 160 mm:n sijaan. Ansaan kohdalla lämpötilaerot ovat tätäkin suuremmat. Ulkokuoren pintalämpötilat ovat tarkastelussa 0,2...0,6 °C kylmempiä kuin nykyisellä lämmöneristyksellä ja alhaisimmillaan laskennallisesti jo 0,1 °C:n päässä ulkoilman lämpötilasta. Sisäkuoren lämpötilat ovat vastaavasti korkeampia 280 mm:n ja 400 mm:n eristekerroksella kuin 160 mm:n eristekerroksella, joten seinärakenteen sisä- ja ulkopinnan lämpötilaero kasvaa eristepaksuutta lisättäessä. Tällöin myös seinän sisäpinnan kylmät kohdat (ansaan kohdat) tulevat olemaan suhteellisesti lämpimämpiä. Ulkoilman lämpötilan ollessa +2 °C, lämpötilaerot eri eristepaksuuksien välillä ovat pienemmät kuin ulkoilman ollessa -15 °C.

Seinärakenteen sisä- ja ulkopinnan aikaisempaa suurempi lämpötilaero voi tällöin kasvattaa hieman pakkovoimien suuruutta sandwich- rakenteessa. Muutoksen suuruutta on vaikea arvioida ilman tarkempia tutkimuksia. Sisäpuolelta tulevien lämpövuotojen lämmittävän vaikutuksen puuttuessa, ulkokuoren lämpötilat ovat kauttaaltaan hyvin lähellä ulkoilman lämpötilaa. Tällöin voi yöaikaan tai aamulla ulkokuoren ulkopinnan lämpötila alittaa ulkoilman lämpötilan, jolloin seinän ulkopintaan tiivistyy kosteutta. Tämä tulee lisäämään ulkokuorelle tulevaa kosteusrasitusta. Ulkokuoren lävitse tapahtuva kosteuden haihtuminen vaikeutuu myös tällöin.

Sisäpuolelta tulevien lämpövuotojen vähentyessä, tuuletusraon tai -urien lämpötila laskee aikaisempaan verrattuna. Tuuletusraosta kosteuden poistuminen perustuu kosteuden haihtumiseen ulkokuoren lävitse tai tuuletusilmavirran lämpenemiseen raossa, jolloin se pystyy kulkiessaan sitomaan raosta kosteutta. Lämpövuotojen vähentyessä tuuletusilmavirta ei voi enää yhtä hyvin lämmitä tuuletusraossa kuin aiemmin, joten sen kyky kuljettaa kosteutta pois raosta vähenee.

Kokonaisuutena seinärakenteen lämmöneristeen paksuutta lisäämällä kasvaa seinän lämmöneristävyys, mikä lisää ulkokuoren pakkasrasitusta ja pakkovoimia sekä lisää rakenteen kosteusteknisiä riskejä.



Tiiviinä materiaalina muovipohjaiset eristeet eivät läpäise kosteutta juuri ollenkaan, joten rakenteen läpi sisältä ulospäin ei pääse siirtymään kosteutta juuri ollenkaan, jolloin rakenne kuivuu pääasiassa sisäänpäin. Tällöin ilmanvaihtolaitteen tulee kuljettaa ylimääräinen kosteus sisältä ulos. Tämä vähentää rakenteen läpi kulkeutuvaa kosteutta ja siten riskiä kosteuden kertymiseen rakenteessa.

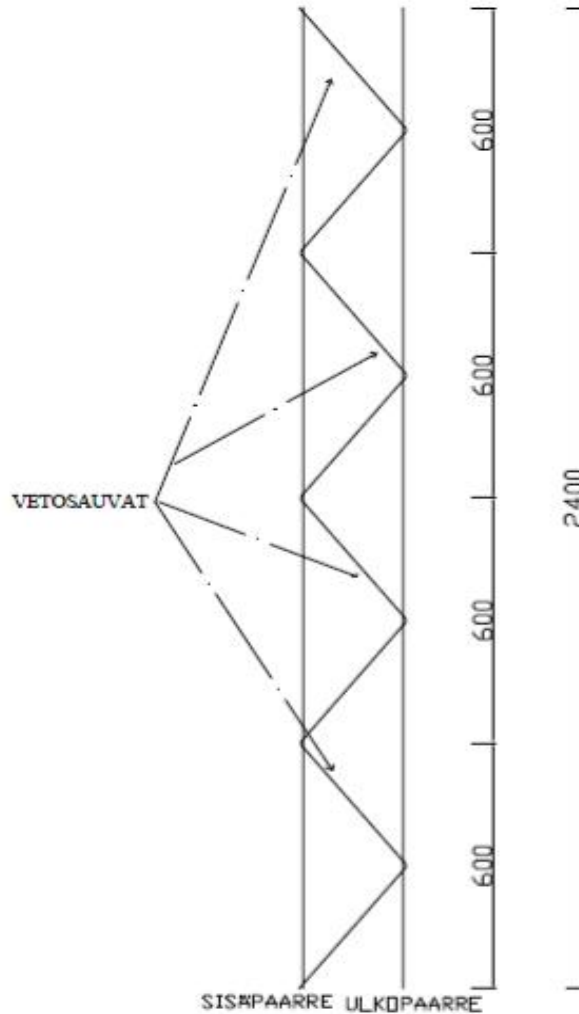
### ***Ulkokuoren kiinnikkeet***

Eristepaksuuden kasvaessa, ulkokuorta kannattelevien kiinnikkeiden korkeus kasvaa. Suurimmat muutokset tulevat tapahtumaan sandwich- rakenteen kiinnikkeissä, koska niiden tehtävä on kannatella ulkokuori sekä puristaa ulkokuori lämmöneristettä vasten siten, että sen kaareutuminen ja reunakäyristyminen on hallittua. Sandwich- rakenteen kiinnikkeiden tehtävänä on myös saada betonikuorien välille yhteistoimintaa.

Sandwich- rakenteen eristepaksuuden kasvaessa 400 mm:iin tulee diagonaaliansaan pariteiden välisen korkeuden olla tällöin vähintään 460 mm. Tällöin kumpaakin betonikuoreen jää ansaalle 25...30 mm:n ankkurointisyvyys. Diagonaaliansaan valmistaminen 460 mm korkeaksi tulee rakenteellisesti aiheuttamaan ongelmia. Tällä hetkellä suurin diagonaaliansaan korkeus on vain noin 300 mm, jolloin sitä käyttäen päästään 240 mm:n eristepaksuuteen. Tämä riittää juuri seinän U-arvoon 0,16 pääsemiseksi mineraalivillaeristeillä.

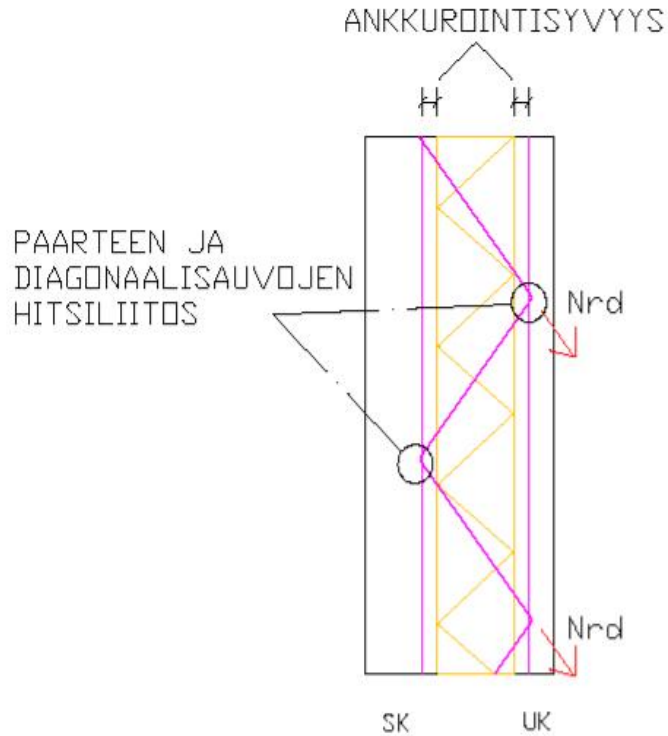
Diagonaaliansaan rakenne perustuu ristikkorakenteeseen, jossa ansaan ulkopaarre siirtää ulkokuoren painon diagonaalisauvoille, jotka puristus- ja vetosauvoina siirtävät jännitykset ristikon sisäpaarteelle ja siten sisäkuorelle. Ansaan ankkurointi betonikuoriin tapahtuu diagonaalien ja parteen välisellä ristiliitoksella.

Diagonaaliansaan valmistuksessa diagonaalien ja parteen liitoksen jakoväli on tavallisesti vakio, 600 mm. Ansaan pituudeksi on siten vakioitunut 1200, 1800 tai 2400 mm. Yhteen ansaaseen voi muodostua tällöin 2...4 veto- ja puristussauvaa, joiden kaltevuuskulma on 36...45° nykyisillä eristepaksuuksilla. Kuvassa 37 on esitetty 2400 mm pitkä diagonaaliansas ja sen valmistusmitat.



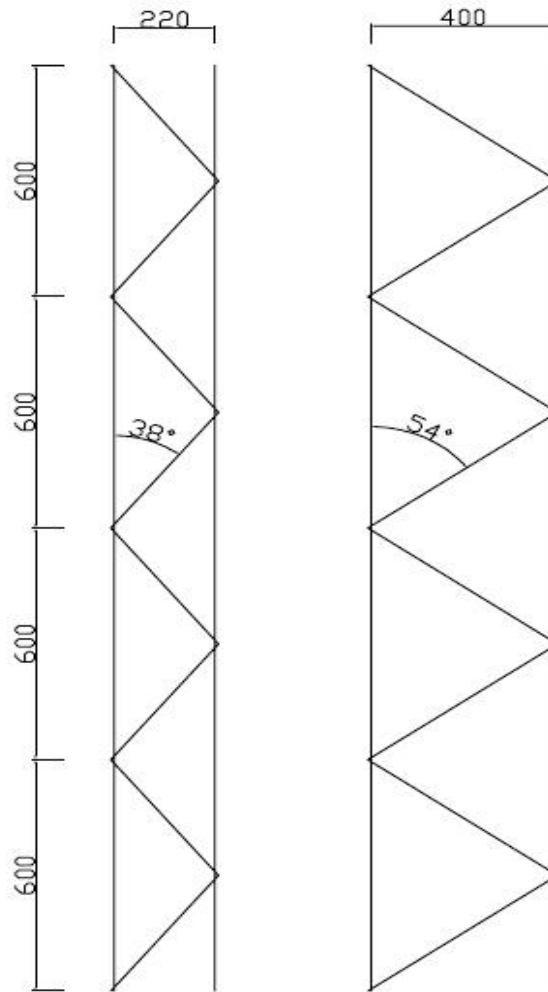
**Kuva 37 2400 mm pitkän diagonaaliinsaana vakioidut valmistusmitat**

Diagonaaliinsaana kapasiteetti määräytyy lähinnä vedetyn diagonaalisauvan ja paarteen välisen hitsausliitoksen pohjalta. Rakenteessa voi tulla mitoittavaksi myös ansaan ja betonin välinen ankkurointi, jos ankkurointisyvyys  $< 25$  mm. Puristetun diagonaalisauvan kapasiteetti ei tule tavallisesti mitoittavaksi, koska lämmöneriste pystyy estämään tehokkaasti sauvan nurjahtamisen. Lisäksi lämmöneriste pystyy ainakin osittain kantamaan ta-soa vastaan kohtisuoraa puristusta. Lämmöneristeiden ominaisuudet vaihtelevat kuitenkin materiaaleittain hyvin paljon, joten puristussauvan rasitukset vaihtelevat eristemateriaalin mukaan. Käytännön diagonaaliinsaana mitoituksessa ei huomioida kuorien välistä yhteisvaikutusta, koska nykyisillä eristepaksuuksilla on kokeellisesti todettu sen saavutettavan 600 mm:n ansasjaolla (Olin J. et al. 1981). Kuvassa 38 on esitetty diagonaaliinsaana kapasiteetin mitoittavat kohdat.



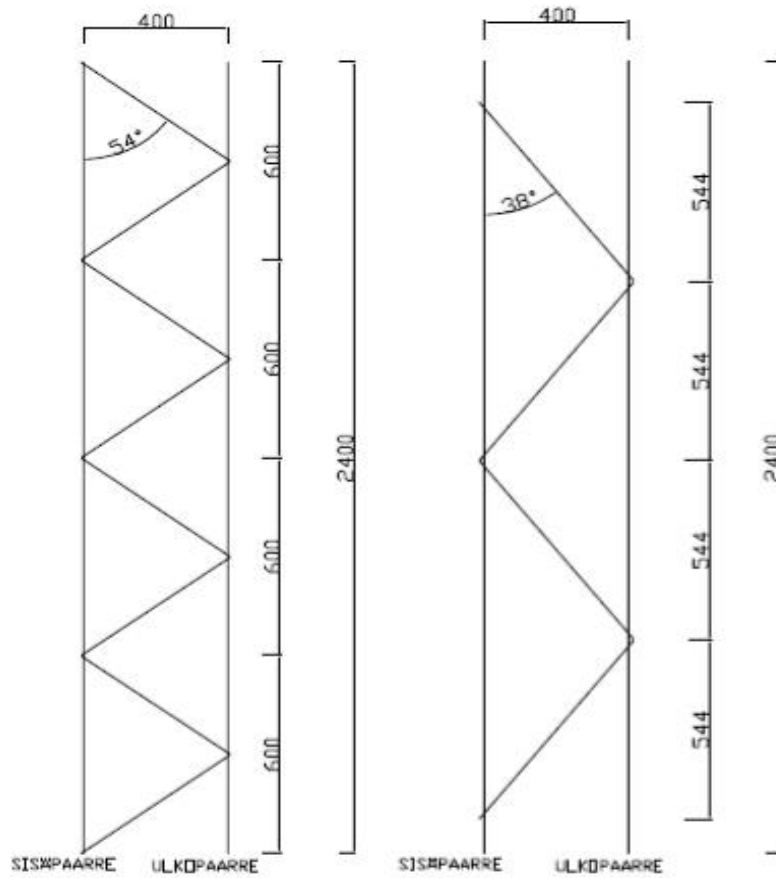
**Kuva 38 Diagonaaliansaan kestävyden kannalta mitoittavat kohdat; paarteen ja diagonaalisauvojen hitsiliitos tai ankkurointisyvyys betoniin.**

Diagonaaliansaan korkeuden kasvaessa tulee diagonaalisauvojen kulma muuttumaan enemmän vaakasuoraan suuntaan seinärakenteen paksuussuunnassa. Tämä tulee kasvattamaan vedetyn diagonaalisauvan vetojännitystä. Diagonaalisauvojen kaltevuuskulma tulee kuvan 39 mukaan kasvamaan  $16...17^\circ$ , kun ansaan korkeus kasvaa  $220...400$  mm. Tällöin vetosauvan vetojännitys kasvaa noin 34 %. Ansaan korkeuden kasvaessa tulee tällöin ansaan käyttöaste kasvamaan, ellei diagonaalisauvan ja paarteen välistä hitsausliitosta saada kestävämmäksi.



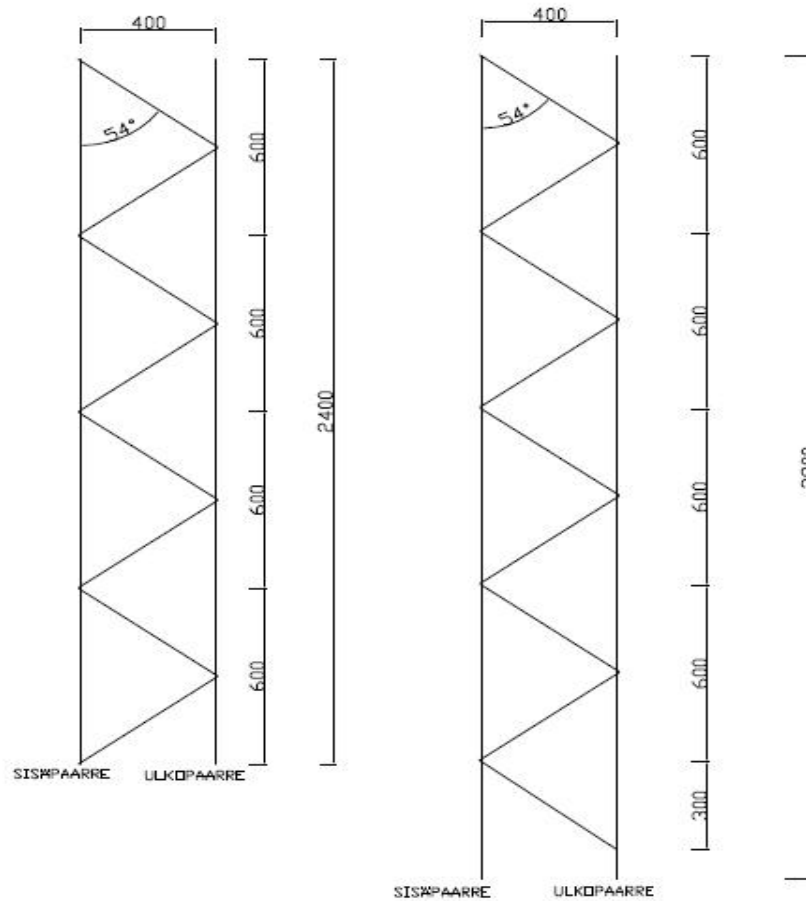
**Kuva 39 Diagonaaliansaan korkeuden kasvaessa diagonaalisauvojen kaltevuuskulma kasvaa**

Diagonaaliansaan diagonaalisauvan ja paarteen liitoksen kulman pysyessä muuttumattomana nykyiseen ansaaseen nähden, vetosauvan vetojännitys ei kasva, mutta ripustus pisteiden ja vetosauvojen määrä ulkokuoressa vähenee. Vakioansaassa, jonka pituus on 2400 mm, ripustus pisteiden määrä vähenee tällöin neljästä kahteen (kuva 40.) Ansaan kapasiteetti laskee tällöin reilusti suhteessa ansaaseen, jonka diagonaalisauvan ja paarteen välisen liitoksen jakoväli on vakio, 600 mm.



**Kuva 40 Diagonaaliansaamavetosauvojen määrä vähenee neljästä kahteen, jos ansaan diagonaalisauvan ja paarteiden välinen kulma pidetään vakiona ansaan korkeutta kasvatettaessa**

Ansaan pituutta kasvattamalla esimerkiksi 2800 mm:iin voidaan korkeissa julkisivuelementeissä kasvattaa ripustusasteiden ja vetosauvojen määrää yhdellä eli tällöin ansaassa olisi viisi vetosauvaa. Kuvassa 41. on esitetty ansaan pidentämisen vaikutus.



**Kuva 41 Ansaan pituutta kasvattamalla 2400 mm:stä 2800 mm:iin saadaan vetosauvojen määrää kasvatettua neljästä viiteen**

Matalissa julkisivuelementeissä, esimerkiksi ns. nauhaelementeissä, joiden korkeus on 2000 mm, ei voida kasvattaa ansaan korkeutta 1800 mm:stä ylöspäin, jotta valmistaminen on mahdollista. Tällöin niissä on käytettävä joko nykyisen mallista ansasta tai vaihdettava kokonaan ansasratkaisua.

Diagonaaliansaan paarteen ja diagonaalisauvan hitsausliitoksen vahvistaminen on mahdollista esimerkiksi vahvistamalla paarretta, joko sen dimensiota kasvattamalla tai lisäämällä toinen paarre jo olemassa olevan paarteen viereen. Samalla voidaan kasvattaa myös ansaan ankkurointikapasiteettia, koska ankkurointi pinta-ala kasvaa. Paarteen vahvistaminen voi toisaalta lisätä ansaan jäykkyyttä julkisivun vaakasuuntaisia muodonmuutoksia vastaan, mikä kasvattaa siihen kohdistuvia pakkovoimia.

Eriytetyssä seinärakenteessa eristepaksuuden lisääminen kasvattaa ripustuskiinnikkeiden pituutta. Vetojännitystä vastaanottavan sauvan jännitystila ei muutu, jos sauvan asennuskulma voidaan pitää samansuuruisena kuin se on nykyisin. Puristusjännitystä vastaanottavan sauvan pituuden kasvaessa kasvaa sauvan nurjahduspituus, jolloin sauvan nurjattaminen tulee mahdolliseksi aikaisempaa pienemmällä puristusrasituksella. Tarvittaessa on tällöin kasvatettava puristussauvan dimensiota. Itsekantavan tiilimuurin tapauksessa, vaakasiteiden pituuden kasvaessa siteiden kyky vastaanottaa puristusta heikkenee. Tällöin on tarvittaessa tihennettävä siteiden määrää, jotta ne voivat toimia suunnitellusti.

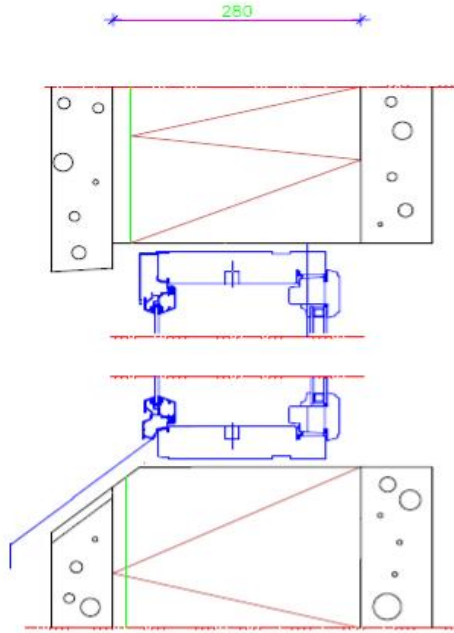
Kolmikerroseristerapatun seinärakenteen eristepaksuuden lisääminen kasvattaa rappauksen ja lämmöneristeen kantavien kiinnikkeiden pituutta. Kuitenkin rappauksen ja lämmöneristeen kuormitus ei ole suuri, joten kiinnikkeille tulevat jännitykset pysyvät pieninä. Tarvittaessa voidaan tihentää kiinnikkeiden määrää.

### ***Liitokset***

Eristepaksuuden kasvaminen tulee aiheutumaan muutoksia elementin ikkuna- ja oviliitokseen sekä elementtien väliseen nurkkaliitokseen. Eristepaksuuden kasvaessa tulee myös ikkunarakenteen paksuus kasvamaan, jotta ikkunarakenteen lämmöneristävyyttä saadaan parannettua. Ikkunan lasiosa tulee muuttumaan 4-lasiseksi, nykyisestä 3-lasisesta rakenteesta. Tällä tavoin saadaan ikkunarakenteen U-arvoa parannettua noin 0,2...0,4 W/m<sup>2</sup>K (Hemmilä K. et al 2008). Lasiosan paksuuden kasvaessa voidaan ikkunan karmisyyvyys kasvattaa 210 mm:iin.

Eristepaksuuden kasvaessa ikkunan karmisyyvyttä suuremmaksi tulee muutoksia ikkunan sijoittelussa. Muutoksia aiheuttaa erityisesti se, mihin kohtaan eristekerrosta ikkuna tulee asentaa, jotta se voi toimia sille vaaditulla tavalla. Ikkuna ei saa tällöin olla liian ulkona, koska vaaraksi voi tulla ikkunan ulkopuitteen liiallinen kastuminen. Tällöin myös sisälasin pinta voi huurtua, koska sisälasin pintalämpötila voi laskea leveiden ikkunapenkkiä myötä sisälämpötilaa reilusti matalammaksi. Toisaalta ikkuna ei saa olla myöskään liian sisässä, koska vaarana on tällöin kosteuden tiivistyminen ikkunan ulkolasin ulkopintaan. Ikkunan lasiosan pieni lämmönläpäisy vielä edistää ulkolasin pintaan tapahtuvaa kosteuden tiivistymistä, koska ulkolasin pintalämpötila on koko ajan hyvin lähellä ulkoilman lämpötilaa. Lämmöneristävyuden kannalta ikkunan taas tulisi mahdollisimman keskeisesti, jotta sen ympärille ei muodostu muuta rakennetta ohuempaa eristepaksuutta.

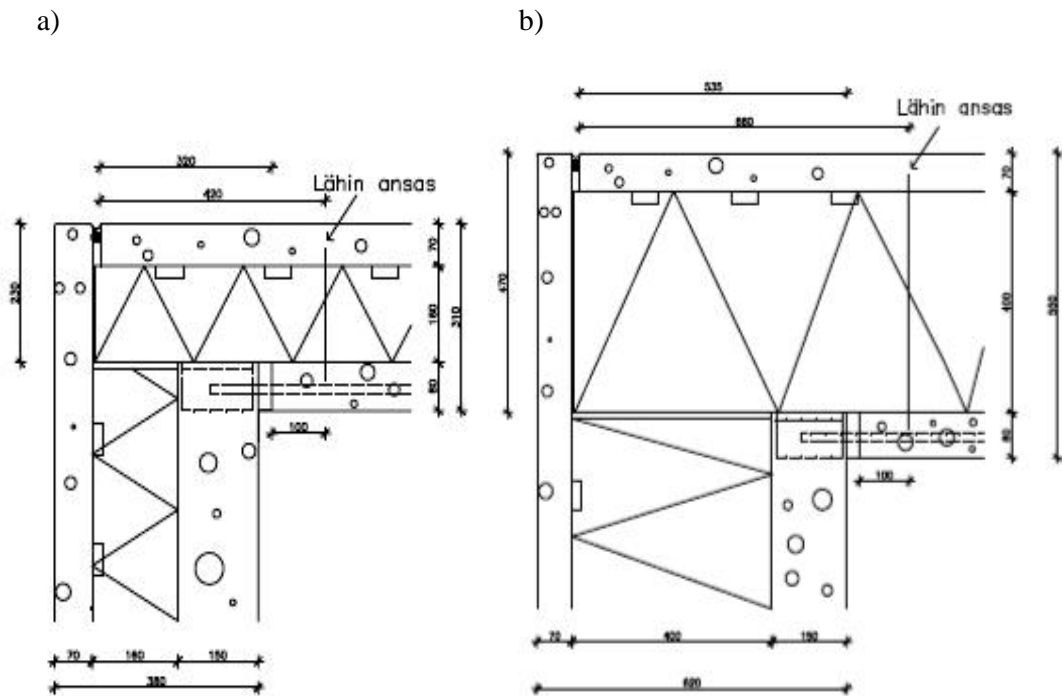
Ikkunan ainoaksi asennuskohdaksi tulee tällöin mahdollisimman keskelle lämmöneristekerrosta siten, että ikkunan ulkolasi on hieman ulkokuoren sisäpinnasta sisäänpäin. Kuvassa 42 on esitetty sandwich- rakenteessa ikkunan asennuskohta. Ikkunan asennuskohta vaihtelee tarkemmin eri rakenteittain. Detaljit ikkunan sijoittelusta ja liitosrakenteesta on esitetty tarkemmin liitteessä 8.



**Kuva 42 Ikkunan asennuskohta sandwich- elementissä, jonka eristepaksuus on 280 mm**

Eristekerroksen paksuuden kasvaessa tapahtuu muutoksia myös nurkkaliitoksessa. Eristepaksuuden kasvaessa ulkokuoren pituus kasvaa suhteessa sisäkuoren pituuteen. Tämä aiheuttaa nurkkaliitokseen valmistamiseen eriaisteisia vaikeuksia kaikilla seinärakenteilla. Sandwich- rakenteessa ulkokuoren ulokkeiden pituus kasvaa. Eristepaksuuden vaikutus sandwich- elementin nurkkaliitokseen on esitetty kuvassa 43.

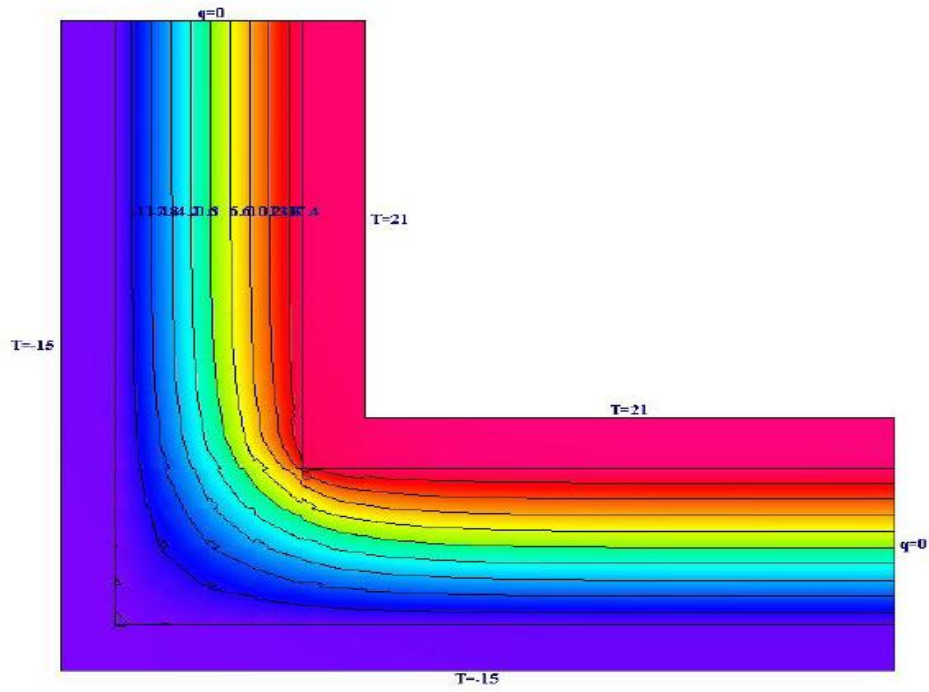




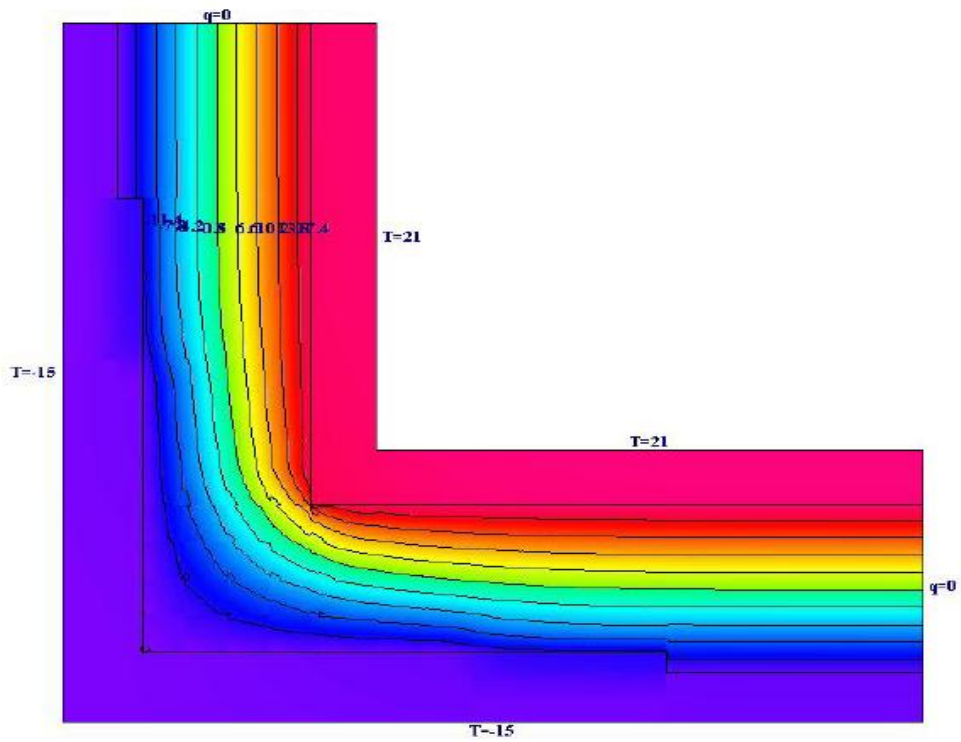
Kuva 43 Sandwich- rakenteen nurkkaliitos a) 160 mm:n eristepaksuudella b) 400 mm:n eristepaksuudella

Eristepaksuuden kasvaessa 160...400 mm kasvaa ulokkeen pituus 320...535 mm. Elementin reunimmaisen diagonaaliinsa etäisyys ulkokuoren päästä kasvaa tällöin 420...660 mm, jos ansas on 100 mm:n etäisyydellä elementin sisäkuoren päästä. Samalla myös mineraalivillassa olevien tuuletusurien välimatka kasvaa nurkan alueella noin kaksinkertaiseksi, joten nurkan alueella urituksen kautta poistuvan kosteuden määrä heikkenee. Ulkokuoren ulokkeen kasvaminen voi aiheuttaa pitkällä aikavälillä ulkokuoreen haitallista reunakäyritymistä, jolloin nurkka alkaa irvistää. Tämä sinänsä on vain visuaalinen haitta, mutta ulkokuori voi käyristyessään aiheuttaa myös liitoksen saumauksen vaurioitumisen. Pitkät ulokeosat ovat elementin siirtojen kannalta ongelmallisia, koska ne ovat hyvin alttiita vaurioille, esim. halkeilulle ja lohkeilulle.

Ulkokuoren ulokkeen vahvistaminen ulkokuorta paksuntamalla on valmistusteknisesti helppoa, mutta tällöin seinänlämmöneristävyys heikkenee nurkkauksessa ja sisäosan pinta lämpötilat tulevat olemaan hieman kylmempiä. Kuvassa 44 on esitetty ulkonurkan lämpötilajakauma ja kuvassa 45 ulkokuoresta 30 mm vahvistetun ulkonurkan lämpötilajakauma.



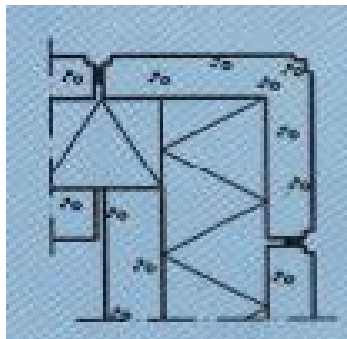
Kuva 44 Ulkonurkan lämpötilajakauma



Kuva 45 Ulkonurkan lämpötilajakauma, kun ulkokuoressa 30 mm vahvensus metrin matkalla ulkonurkasta

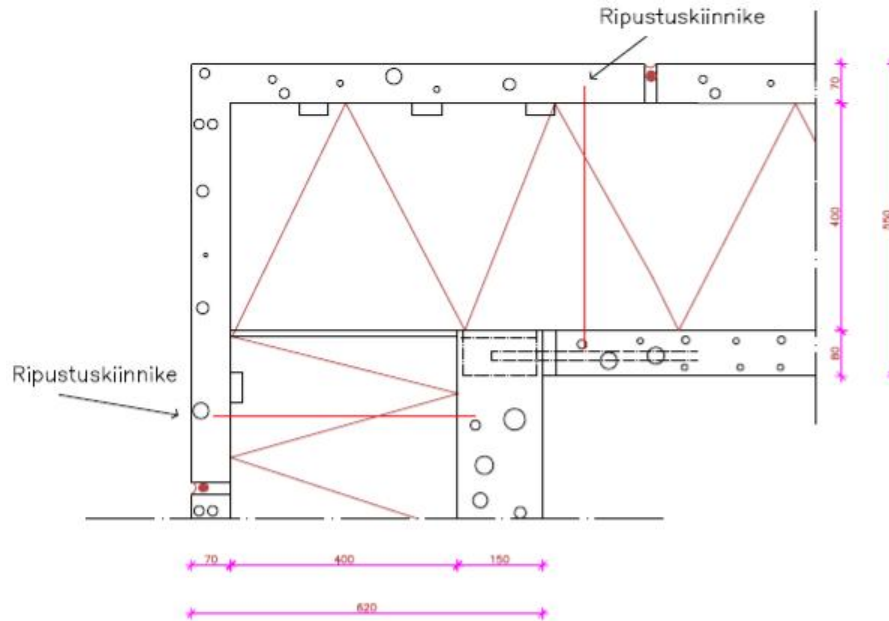
Kuvasta 44 ja 45 nähdään, että ulkonurkka on ilman ulkokuoren vahvistuksiakin muuta seinärakennetta kylmempi kohta, joten ulkokuoren vahvistus vain siirtää seinän lämpötilajakaumaa rakennuksen sisäosia kohti nurkan alueella. Ulkokuoren vahvistuksista aiheutuu ongelma, kuinka mineraalivillaa käyttäen tuuletusurituksen toimivuus voidaan järjestää. Betonikuoren vahvistaminen ulkokuoren paksuutta kasvattamalla ei ole suositeltavaa. Ulokeosan vahvistaminen on suositeltavaa tehdä vain lisäraudoituksella.

Toinen ratkaisuvaihtoehto nurkkaliitokseen on erillisen ulkokuoren kulmaelementin valmistaminen. Suorakulmainen ulkokuoren nurkkaelementtivaihtoehto on esitetty kuvassa 46.



**Kuva 46 Suorakulmainen ulkokuori kulmaelementtivaihtoehto nurkkaliitoksessa (RTT, 1995 Valmisarakentaminen- kansio)**

Kulmaelementin kiinnittäminen nurkan alueella on haastava, koska viereisien ulkokuorielementtien välille ei voida tehdä kantavaa liitosta. Kiinnikkeiden asentaminen seinän sisäkuoresta onnistuu vain hyvin kaukaa nurkkauksesta. Kuvassa 47 on esitetty eräs ratkaisu kulmaelementin kiinnittämiseen sisäkuoresta.



**Kuva 47** Periaatekuva ulkokuoren nurkkaelementin ripustimien sijoittelusta elementin sisäkuoresta (päästä päin katsottuna)

Kulmaelementin valmistaminen on teknisesti vaikeaa ja hidasta nykyisillä tuotantolaitteilla. Erillinen kulmaelementti lisää elementtisaumojen määrää kulmauksessa sekä työmaalla asennustyötä ja nostojen määrää. Tämä aiheuttaa kustannusten nousua nurkkaliitoksen valmistamiseen. Nurkkaelementin valmistaminen on kuitenkin välttämätöntä, jos sandwich- elementin nurkkaliitoksen vaurioriski käytännössä kasvaa liian suureksi.

Eriytetyn ja eristerapatun seinärakenteen kulmaliitosta on vaikea esivalmistaa elementti-tehtaalla, koska vaarana ovat lämmöneristeen ja rappauksen vauriot elementin siirtojen aikana. Tällöin kulmaliitoksen rakentaminen tulee tehtäväksi täysin työmaalla. Kuvissa 48 ja 49 on esitetty ohuteristerapatun seinärakenteen valmistaminen, kun eristemateriaalina on lamellivuorivilla, jonka paksuus on yli 400 mm. Määrämittaiset villalevyt asennetaan vaakasuunnassa päällekkäin, kiinnittäen ne esimerkiksi liimalaastilla sisäkuoreen.



**Kuva 48** Ohuteristerapatun seinärakenteen nurkkaliitoksen valmistaminen työmaalla. Kuvassa vasemmalla on aloitettu nurkkaliitoksen lämmöneristäminen ([www.paroc.com](http://www.paroc.com))



**Kuva 49** Valmis nurkkaliitos, vailla rappausta ([www.paroc.com](http://www.paroc.com))

## 5. Kylmäsiltojen vähentäminen

Kylmäsiltojen suhteellinen merkitys kasvaa, kun seinän lämmöneristävyyden kasvu kasvaa. Seinärakenteen läpi menevä lämpövirta vähenee suhteellisesti enemmän lämmöneristeen kohdalla kuin kylmäsiltojen kohdalla, jolloin samansuuruisella kylmäsiltoilla on suhteellisesti suurempi lämpöhäviö paremmin lämpöä eristävissä seinärakenteissa. Passiivienergiarakennuksissa rakenteiden eristävyyden on niin suuri, että kylmäsiltojen merkitys voi tulla kriittiseksi rakenteiden toiminnan kannalta (Niemi J. et al. 2008). Tämän vuoksi tulee pyrkiä poistamaan kaikki seinärakenteiden kylmäsiltoja, jotka eivät ole rakenteiden toiminnan kannalta välttämättömiä.

Kylmäsiltoja ei voida täysin koskaan poistaa seinärakenteesta, mutta niiden suuruutta voidaan kuitenkin vähentää eri rakenneratkaisuilla. Tässä luvussa esitetään ulkoseinäelementtien yksityiskohtia, jotka aiheuttavat kylmäsiltoja seinärakenteeseen sekä mahdollisia vaihtoehtoja niiden vähentämiseksi.

Kylmäsiltoja betoniseen ulkoseinäelementtiin aiheuttavat:

- ulkokuoren kannattelevat kiinnikkeet ja eristeen saumakohtien raot
- ikkuna- ja oviliitokset
- nostolenkit (sandwich)

### 5.1 Ulkokuoren kannattelevat kiinnikkeet

Lämmöneristeen läpi menevät ulkokuorta kantavat kiinnikkeet aiheuttavat suurimmat kylmäsiltoja seinäelementeissä juuri sandwich- elementissä. Tämän vuoksi tässä keskitytään nyt sandwich- elementtien kylmäsiltojen vähentämiseen, joko ansaiden tai ankkurien määrää vähentämällä tai etsimällä muita vaihtoehtoisia kiinnikkeitä. Sandwich- rakenteen valmistaminen ilman mekaanisia kiinnikkeitä on lähes mahdotonta, koska lämmöneristeen ja betonikuorien välille on vaikea saada riittävän kestävä, varmaa ja pitkäaikaista tartuntaa, jotta sillä olisi 4-kertainen varmuus ulkokuoren painoon nähden.

Sandwich- elementtien kylmäsiltojen vähentäminen on vaikeaa, koska kiinnikkeille tuleva rasitus kasvaa eristepaksuuden kasvaessa. Sandwich- elementtien diagonaaliensaarat aiheuttavat seinärakenteeseen pistemäisiä kylmäsiltoja ansaan kohdalta eristelevyjen välistä. Diagonaaliensaaran aiheuttama kylmäsiltovaikutus seinän U-arvoon nykyisillä eristepak-

suuksilla on VTT:n tutkimusten mukaan keskimäärin 0,011 W/m<sup>2</sup>K, kun ansaiden jakoväli on 600 mm (Salovaara M. et al 2003). Kylmäsilanvaikutukset seinärakenteen U-arvoon ansaiden eri jakoväleillä sekä pistokkaiilla 4 kpl/m<sup>2</sup> nykyisillä eristepaksuuksilla on esitetty taulukossa 6.

**Taulukko 6 Ansaiden ja pistokkaiden kylmäsilta-vaikutukset seinän U-arvoon nykyisillä eristepaksuuksilla**

	jakoväli	[W/m <sup>2</sup> K]
Diagonaaliansas*	k 600	0,0111
Diagonaaliansas*	k 900	0,0083
Diagonaaliansas*	k1200	0,0056
Pistokas**	4 kpl /m <sup>2</sup>	0,006

\* = teräksen halkaisija 5 mm

\*\* = teräksen halkaisija 4 mm ja kylmäsilan vaikutus on saatu RakMK :n osasta C4.

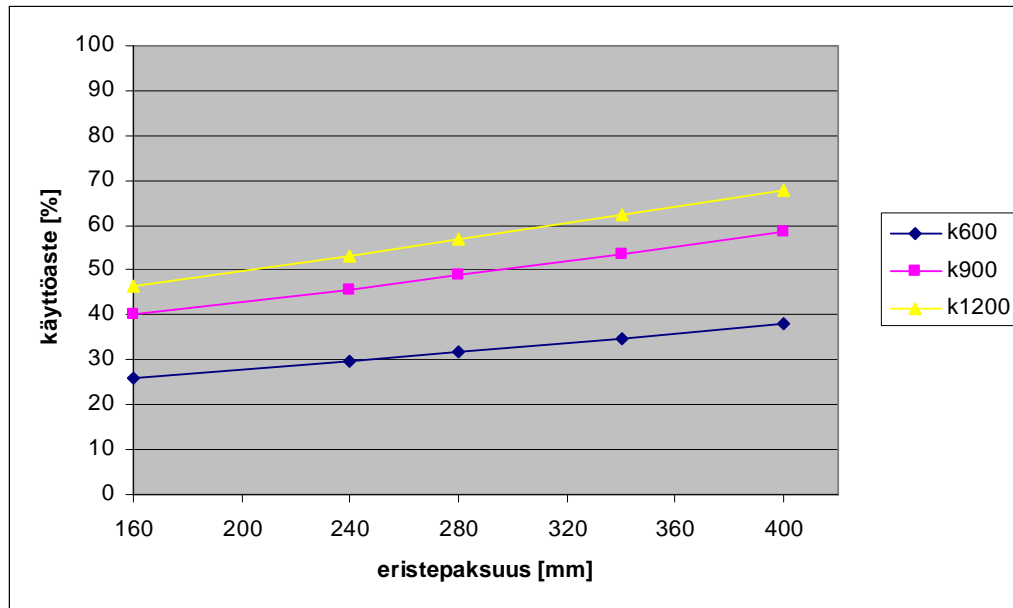
Taulukosta 6 on nähtävissä, että diagonaaliansas jakovälillä 600 mm, aiheuttaa noin kaksinkertaisen kylmäsilan pistokkasiin verrattuna, kun pistokkaan halkaisija on 4 mm ja jakotiheys 4 kpl /m<sup>2</sup>. Diagonaaliansailla, joiden jakoväli on 1200 mm päästään lähes samaan kylmäsiltaan kuin pistokkaiilla 4 kpl /m<sup>2</sup>. Diagonaaliansaiden jakovälin harventaminen tulee siten vaihtoehdoksi vähentää ansaiden aiheuttamaa kylmäsiltaa, jos ansaiden kapasiteetti on siihen riittävä.

Sandwich- rakenteen ansaiden jakoväliä harventaessa on huomattava kuorien välisen yhteistoiminnan merkitys. Kuorien välisellä yhteistoiminnalla voidaan seinän puristus- ja taivutuskapasiteettia kasvattaa normaalia betoniseinää suuremmaksi. Kuorien välisen yhteistoiminnan aste riippuu suurelta osin kiinnikkeiden toimintatavasta ja jakovälistä.

Ansaan jakovälin ollessa 600 mm päästään tutkimusten mukaan hyvin merkittävään kuorien väliseen yhteistoimintaa nykyisillä eristepaksuuksilla, mutta ansaan jakovälin ollessa 600...1200 mm päästään vain osittaiseen yhteistoimintaan. (Olin J. et al. 1981). On huomattava kuitenkin, että kuorien välisen yhteistoiminnan syntymiseen vaikuttaa osittain myös käytettävä eristemateriaali.

Koska diagonaaliansaiden jakovälin harventuessa ja eristepaksuuden kasvaessa lisääntyy ansaalle tuleva rasitus, on diagonaaliansaan kapasiteettia tarkasteltava. Käytännön ansaan mitoituksessa ei huomioida ansaaseen kohdistuvia pakkovoimia, vaan mitoituksellisesti ansaan vetosauvan ja paarteen välisen liitoksen käyttöaste pidetään tavallisesti alle 50 % :n.

Jos oletetaan ansaan jännityksien kasvavan eristepaksuuden kasvaessa vain ansaan geometrian mukaan, saadaan rasitetuimman diagonaaliinsaana käyttöasteeksi eristepaksuuden funktiona liitteen 5. mukaisessa elementissä kuvan 50 mukainen kuvaaja.



**Kuva 50** Diagonaaliinsaana käyttöaste ansaan eri jakoväleillä eristepaksuuden funktiona liitteen 4. elementille

Kuvasta 50 nähdään, että ansasjaon harventuessa 600...1200 mm ansaiden käyttöaste kasvaa noin 20 %, kun eristepaksuus on 160 mm. Ansaan jakovälin kasvaessa 600...900 mm tulee käyttöaste muuttumaan 13 %, eristepaksuudella 160 mm Ansaan jakovälin ollessa 900 mm on ansaan käyttöaste noin 59 %, kun eristepaksuus on 400 mm. Vastaavasti ansaan jakovälin ollessa 1200 mm nousee ansaan käyttöaste noin 71 %:iin. Koska suurella eristepaksuudella ja harvemmillä jakovälillä ansaan käyttöaste nousee vetosauvan ja paarteen liitoksen osalta yli 50 %:n, on määritettävä tarkemmin FEM- laskentamallilla diagonaaliinsaana todellinen kestävyys. FEM- laskentamallissakin tosin on vaikeaa huomioida kaikkia ansaalle kohdistuvia dynaamisia voimia, joita syntyy mm. elementin nostoissa ja siirroissa, ja joiden suuruus vaihtelee. Eristepaksuutta kasvatettaessa ja ansaan jakoväliä harventaessa tulee siis tärkeäksi selvittää tarkemmin diagonaaliinsaana todellinen kestävyys sekä kuorien välinen yhteistoiminta ja sen vaikutus sandwich- seinärakenteen kantokykyyn.



### *Vaihtoehtoisia kiinnikeratkaisuja*

Sandwich- rakenteen ulkokuoren kiinnikkeiden aiheuttamien kylmäsiltojen suuruutta voidaan vähentää osaltaan myös vaihtamalla toisenlaiset kiinnikkeet elementtiin. Tässä on esitelty muita mahdollisia markkinoilla olevia ansas- tai ankkurikiinnikkeitä, joiden aiheuttamaa kylmäsiltaa on tarkasteltu 3-ulotteisella laskentamallilla. Vaihtoehtoiset kiinnikkeet soveltuvat pääasiassa muovipohjaisille eristeille.

Sandwich- elementin kuorien välisiä kiinnikkeitä valittaessa on huomioitava:

- kuorien välinen leikkausvoima
- ulkokuoren pintaa vastaan kohtisuora veto- ja puristusvoima ulkokuoren lämpötilan- ja kosteudenmuutoksista aiheutuvista muodonmuutoksista
- lämmöneriste ja sen lujuusominaisuudet
- kuorien välisen yhteistoiminnan aste
- ulkokuoren muodonmuutosten mahdollisuus

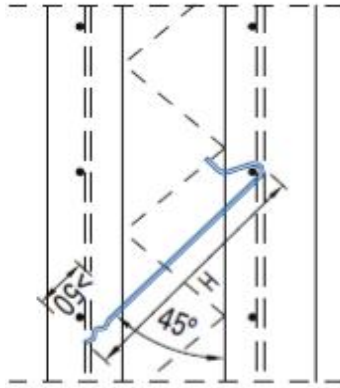
Kuorien välinen leikkausvoima muodostuu pääasiassa ulkokuoren painosta. Kuorien välinen leikkausvoima on kiinnikkeen mitoituksen kannalta merkittävin rasitus. Ulkokuoren muodonmuutokset aiheuttavat kuoreen kaareutumista ja reunakäyritymistä, jolloin ulkokuoren suorana pysyäkseen kiinnikkeisiin tulee ulkokuorta vastaan kohtisuora veto- tai puristusjäännitystä. Lämmöneristeiden lujuusominaisuudet huomioiden voidaan kiinnikkeiden rasituksia pienentää, käyttämällä lämmöneristeen ominaisuuksia hyväksi. Kiinnikkeiden toimintatavasta riippuen voi kiinnikkeelle muodostua ulkokuoren muodonmuutoksien vastustamisesta pakkovoimia, joiden suuruus voi vaihdella paljon kiinnikkeiden jakovälistä ja kiinniketyypistä riippuen.

Vaihtoehtoisia kiinnikeratkaisuja voivat olla erilaiset pistemäiset kiinnikkeet:

- pistoansaat eli pistokkaat
- SPA- ankkurit ja pistokkaat
- Delta-ankkurit ja pistokkaat
- Levy- tai putkihylsyankkurit ja pistokkaat

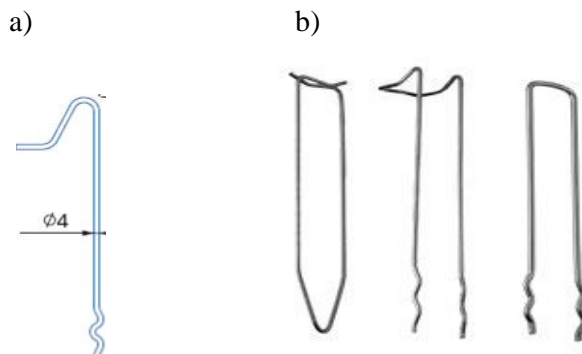
Pistokkaita voidaan käyttää muovieristeiden kanssa kantamaan ulkokuori. Tällöin saadaan tavallisesti seinän kylmäsiltaa osaltaan vähennettyä. Elementissä tulee olla vinoon asennettuja pistokkaita, jotka voivat kantaa kuorien välisen leikkausvoiman vetovoimana.

Vinoon asennetuista pistokkaista, tulee tehdä säännöllisesti toistuvia linjoja, jotta ne voivat mahdollisimman hyvin kantaa ulkokuoren painon. Kuvassa 51 on esitetty elementin poikkileikkaus pystysuunnassa, jossa on vinoon asennettu pistokas.



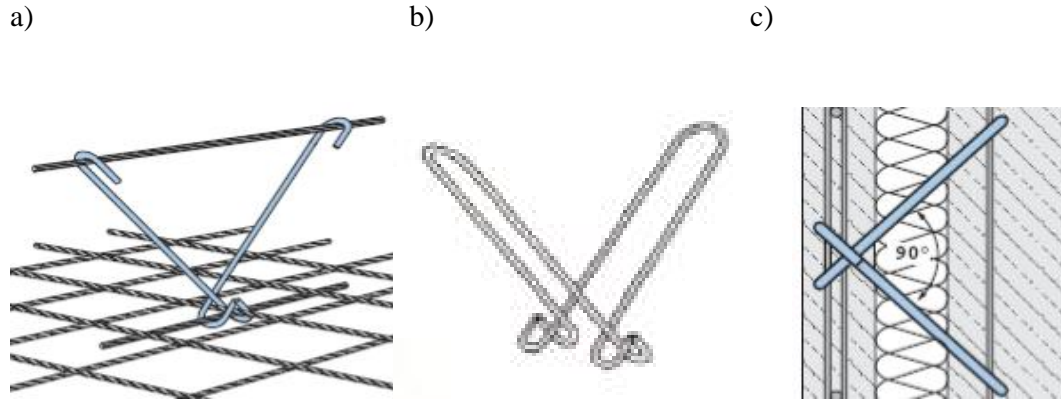
**Kuva 51 Poikkileikkaus elementin pystysuunnassa, jossa on 45° kulmaan asennettu pistokas (www.peikko.fi)**

Pistokkaiden asennusruudun ollessa < 500 mm, voidaan nykyisillä eristepaksuuksilla päästä osittaiseen kuorien väliseen yhteisvaikutukseen. Pistokkaiden asentamisessa on tärkeää saada hyvä tartunta betoniin, jotta kaikki pistokkaat voivat toimia suunnitellusti. Pistokkaita on olemassa yksi- tai kaksileikkeisiä kuvan 52 mukaisesti.



**Kuva 52 a) yksileikkeinen pistokas, b) kaksileikkeinen pistokas (www.peikko.fi, www.pfeifer.de)**

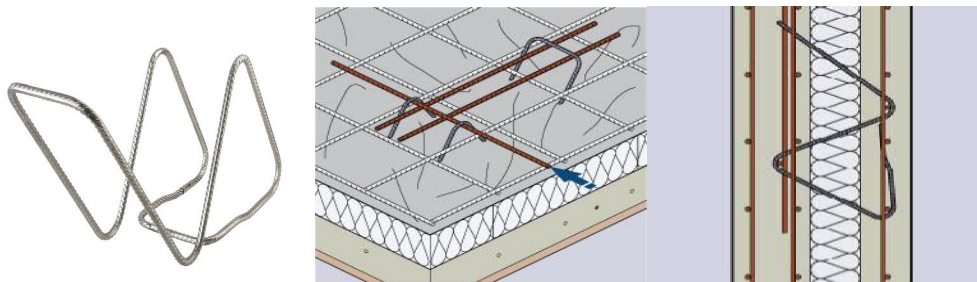
SPA- ankkurit soveltuvat ensisijaisesti muovipohjaisten eristeiden, mutta myös mineraalivillan kanssa käytettäväksi. SPA- ankkureita voi olla joko yksi- tai kaksileikkeisiä. SPA- ankkurin kanssa käytetään yleensä pistokkaita. SPA- ankkuri kantaa kuorien välisen leikkausvoiman veto- ja puristusjännityksillä. Pistokkaat ottavat levyn tasoon nähden kohtisuoran vedon ja puristuksen. Pistokkaiden määrä on pienempi, kuin vastaavassa rakenteessa, joka on täysin pistokkailla sidottu. Kuvassa 53 on esitetty SPA-1 ja SPA-2 ankkuri.



Kuva 53 SPA-ankkureita a) SPA-1-ankkuri, b) SPA-2 ankkuri, c) SPA- ankkuri elementissä (www.halfen-deha.fi)

SPA- ankkureita asennetaan elementtiin tavallisesti 2- 5 kpl. SPA- ankkurin teräksen halkaisija on 6...10 mm. Ankkureiden kohdalle muodostuu näin paikallisesti suuria kylmäsilloja. Muilla osilla elementtiä kylmäsillat ovat pienempiä.

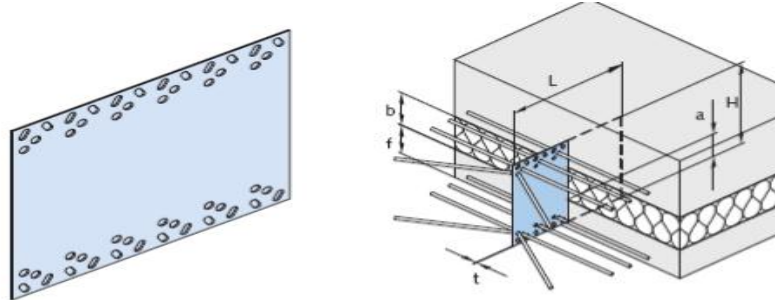
Delta-ankkuri on lähes SPA- ankkuria vastaava, mutta siinä on kaksi kiinnityskohtaa ulkokuoreen. Delta-ankkuri sopii ainoastaan kovien muovipohjaisien eristeiden kanssa käytettäväksi. Delta-ankkurin kanssa käytetään SPA- ankkurin tavoin pistokkaita. Delta-ankkuri kantaa kuorien välisen leikkausvoiman veto- ja puristusjännityksinä. Delta-ankkureita on 2-3 kpl elementissä. Delta-ankkurin teräksen halkaisija on 6...10 mm. Siten elementtiin voi muodostuu paikallisesti suurikinkylmäsilta ankkureiden kohdalle. Kuvassa 54 on esitetty Delta-ankkuri.



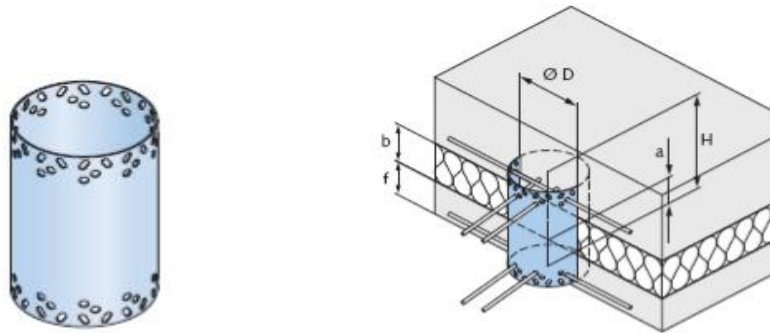
Kuva 54 Delta-ankkuri (Semtu Oy)

Levy- ja putkihylsyankkurit soveltuvat kovien muovipohjaisten eristeiden kanssa käytettäväksi. Niiden kanssa käytetään tavallisesti pistokkaita. Levy- ja putkihylsyankkurit ottavat vastaan kuorien välisen leikkausvoiman ja pistokkaat levyn pintaan nähden kohtisuoran vedon. Levyankkureita pelkästään pistokkaiden kanssa käytettäessä tulee asen-

taa levyjä pysty ja vaakasuoraan julkisivua vastaan kohtisuorassa suunnassa. Levy- ja putkihylsyankkureiden korkeuden kasvaessa kasvaa nopeasti myös ankkurin leveys ja paksuus, koska ankkurit ovat ulokkeen tavoin sisäkuoresta kiinni. Kuorien välistä yhteistoimintaa ei pääse syntymään, koska ulkokuori on vain ripustettu kiinnikkeistä. Levy- ja putkihylsyn aiheuttama kylmäsilan suuruus riippuu hyvin paljon ankkureiden materiaalin paksuudesta ja se voi olla paikallisesti hyvinkin suuri. Ankkureita on elementissä 2...4 kpl. Levyankkuri on esitetty kuvassa 55 ja putkihylsyankkuri kuvassa 56.



**Kuva 55 Levyankkuri (www.halfen-deha.fi)**



**Kuva 56 Putkihylsyankkuri (www.halfen-deha.fi)**

Yhteistä SPA-, Delta-, levy- ja putkihylsyankkureille on, että ne pyritään asentamaan elementin painopisteen nähden keskeisesti. Lisäksi ne ankkuroidaan aina verkon taakse harjateräksiä apuna käyttäen, jotta betoniin ei pääse muodostumaan liian suuria jännityskeskittymiä. Tällöin sandwich- elementissä tulee olla aina verkko sisä- ja ulkokuoressa. Lisäksi ankkureiden kanssa käytetään aina pistokkaita estämään ulkokuoren kaareutuminen. Kiinnikevaihtoehtojen tarkemmat tekniset ominaisuudet ovat taulukossa, joka on liitteenä 6.

Nykyisin lähes kaikkien ankkurikiinnikkeiden korkeus on riittävä eristepaksuudelle 260 mm, paitsi putkihylsyankkureilla, joiden maksimikorkeus on 160 mm:n eristepaksuudel-

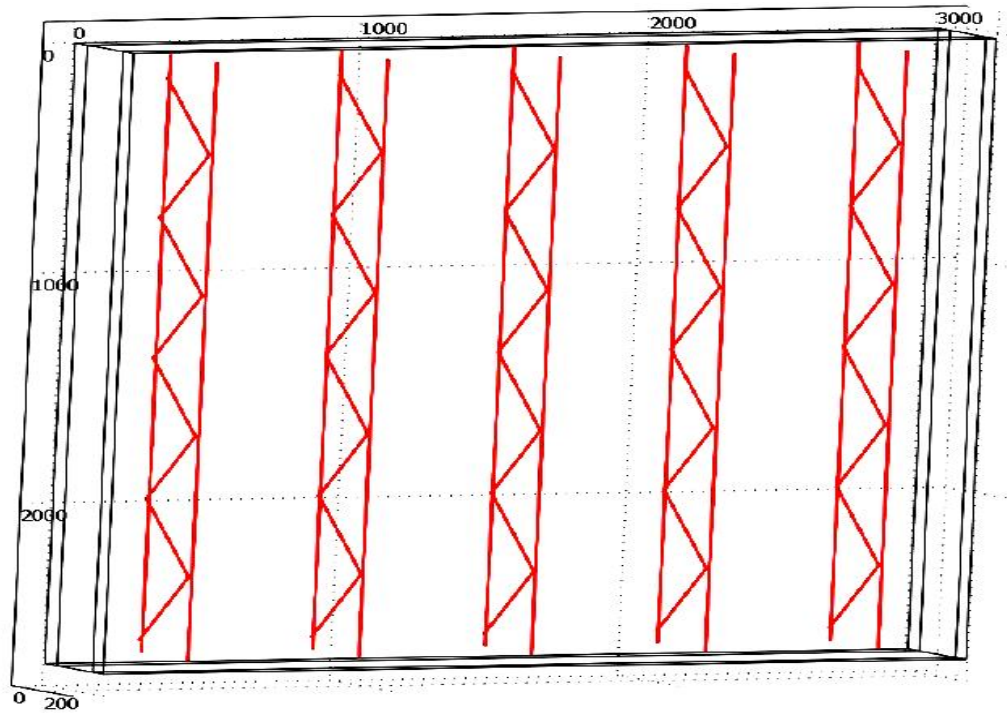
le. Ankkureiden korkeutta täytyy siten vielä kasvattaa, jotta kaikkia muovipohjaisia eristeitä käyttäen voitaisiin päästä seinän U-arvoon 0,10.

Eri kiinnikevaihtoehtojen kylmäsilan suuruutta tarkasteltiin 3-ulotteisella FEM- laskentamallilla Comsol- ohjelmaa käyttäen. Laskentamallilla määritettiin seinärakenteen läpi siirtyvän lämpövirran tiheyden keskimääräinen suuruus julkisivupinnalla kiinnikkeiden kanssa sekä ilman kiinnikkeitä. Tarkastelussa seinän muiden reunojen pinnalla lämpövirran suuruus oli nolla eli lämpöä pääsi siirtymään vain julkisivupinnan lävitse. Kylmäsilan keskimääräinen vaikutus U-arvoon voitiin laskea, kun tiedettiin lämpötilaero rakenteen yli, kaavalla

$$\Delta U_{\text{kylmäsilta}} = \frac{q_{\text{keskim.}} - q}{\Delta T}, \quad (10)$$

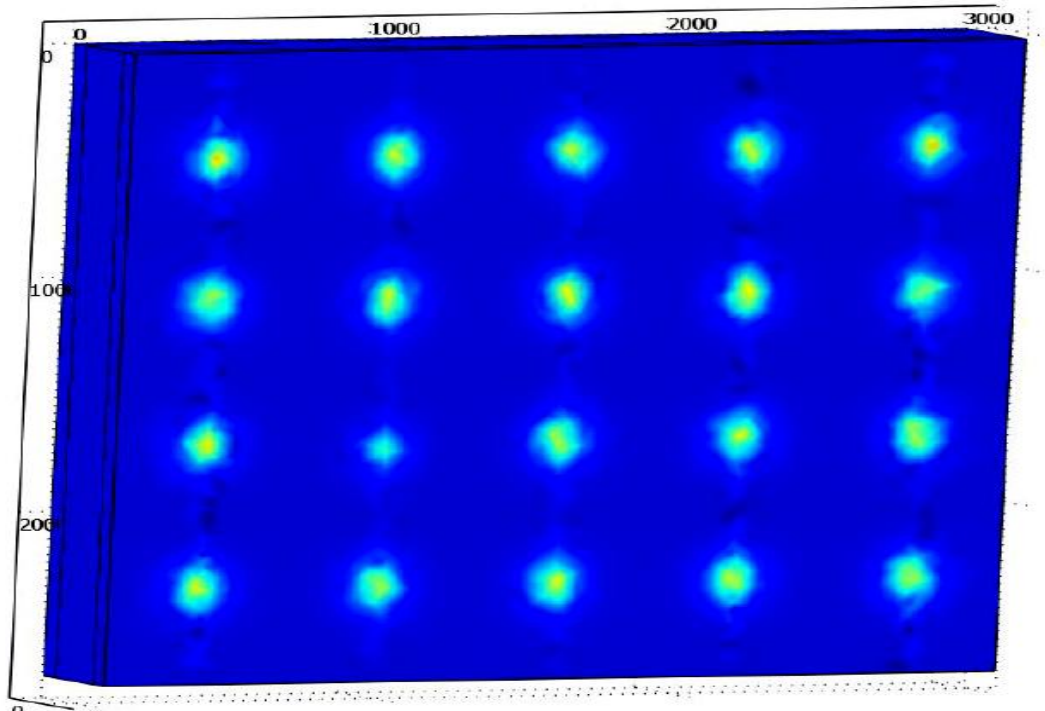
missä  $q_{\text{keskim.}}$  on keskimääräinen lämpövirran tiheys seinän läpi kiinnikkeiden kanssa  
 $q$  on lämpövirran tiheys seinän läpi ilman kiinnikkeitä  
 $\Delta T$  on lämpötilaero rakenteen yli.

Laskennassa sisälämpötila oli 21 °C ja ulkolämpötila -15 °C. Laskentamallissa kiinnikkeet mallinnettiin sauvoina tai suorakulmaisina särmiöinä sandwich- elementtiin, jonka mitat olivat 3,0 m x 2,7 m. Lämmöneristeenä elementissä oli 240 mm mineraalivillaa. Laskentamallissa käytettiin ohjelman antamaa normaaliverkkoa.



**Kuva 57 Sandwich- elementtiin diagonaaliinsaatt mallinnettuna**

Ansasmateriaalin lämmönjohtavuutena käytettiin kaikille kiinnikkeille ruostumattoman teräksen lämmönjohtavuutta  $17 \text{ W/mK}$ . Kiinnikkeiden koko valittiin ulkokuoren painon perusteella valmistajien kuormitustaulukoiden pohjalta tai päättelemällä siitä, ellei taulukossa ollut tarvittavaa eristepaksuutta. Kuvassa 58 on esitetty havainnollisesti kylmäsilat julkisivupinnan lämpövirtauksien avulla, kun kiinnikkeinä ovat diagonaaliinsaatt.



Kuva 58 Julkisivupinnassa olevan lämpövirran tiheys mallinnettuna, kun kiinnikkeinä ovat diagonaaliansaat 600 mm:n jakovälillä

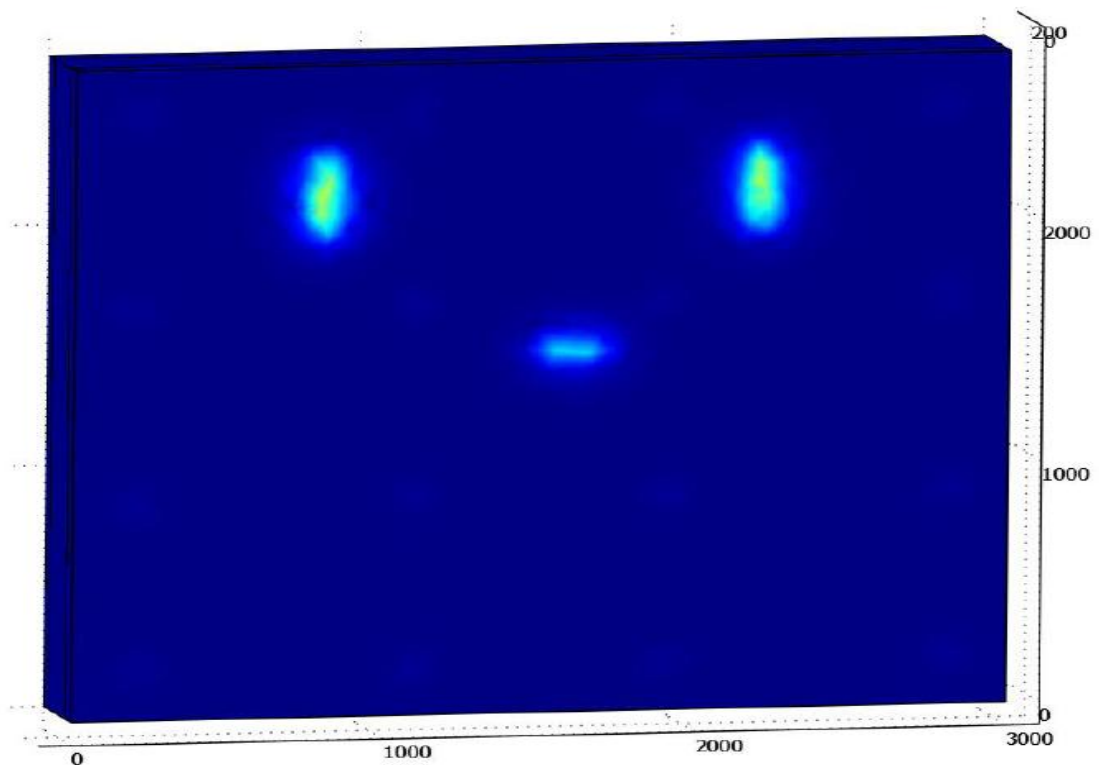
Taulukossa 7. on esitetty laskennalliset kylmäsilan suuruudet eri kiinnikevaihtoehdoille.

Taulukko 7 Kylmäsilan laskennalliset suuruudet eri kiinnikevaihtoehdoilla

Rakenne:	Sandwich SK 80 mm, UK 70 mm, mineraalivilla 240 mm		
Ansastus	q	q keskim.	Kiinnikkeiden vaikutus U-arvoon
	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> K]
Diagonaaliansas k600	5,183	5,480	0,0083
Diagonaaliansas k1200	5,183	5,369	0,0052
pistokas (t=4 mm) 4..5kpl/m <sup>2</sup>	5,183	5,327	0,0040
SPA-2 (t=8 mm) 2kpl ja pistokkaat 2...3 kpl/m <sup>2</sup>	5,183	5,419	0,0066
Delta-ankkuri (t=8 mm) 2kpl ja pistokkaat 2...3 kpl/m <sup>2</sup>	5,183	5,396	0,0059
Levyankkuri (t= 2 mm) 3kpl ja pistokkaat 2...3 kpl/m <sup>2</sup>	5,183	5,732	0,0153

Taulukon 7. tuloksien perusteella nähdään, että pienin kylmäsilta-vaikutus on pistokkailla. Diagonaaliansaiden aiheuttama kylmäsilta 1200 mm:n ansasvälillä on noin 30 % pistokkaita suurempi. Delta-ankkurin ja SPA- ankkurin kylmäsilta on suuruusluokaltaan hyvin samansuuruinen. Ankkureiden väliseen kylmäsilta-vaikutuksen eron aiheuttaa lähinnä ankkurin koko, mikä kasvattaa sen aiheuttaman kylmäsilan pinta-alaa. Levyankkuri-

kiinnikkeiden aiheuttama kylmäsilta on selvästi suurempi kuin muiden kiinnikkeiden. Tämä johtuu levyn suuresta poikkileikkauksalasta lämmöneristeen läpi, jolloin kiinnikkeen kohdalle muodostuu paikallisesti hyvin suuri kylmäsilta. Levyankkurin paksuuden kasvaessa kiinnikkeen kylmäsilta-vaikutus tulee kasvamaan hyvin nopeasti lisää. Tämän perusteella sandwich- elementin kiinnikkeiden tulee olla hyvin pistemäisiä, jotta niiden kylmäsilta-vaikutus on mahdollisimman vähäinen. Kuvassa 59 on esitetty havainnollisesti julkisivupinnan lämpövirran tiheyden avulla levyankkurikiinnityksen, jossa on lisäksi pistokkaita 2...3 kpl/m<sup>2</sup> kylmäsiltoja.



**Kuva 59 Levyankkurikiinnityksen, jossa on pistokkaita 2...3 kpl /m<sup>2</sup> kylmäsiltoja. Levyankkurin aiheuttama kylmäsilta on suhteellisesti niin suuri, että pistokkaiden aiheuttamien kylmäsiltojen erottaminen kuvasta on vaikeaa.**

Taulukon 7. tuloksissa ei ole tarkasteltu putkiyhysylinteriä, koska sen valmistus rajoittuu vain 160 mm:n eristepaksuudelle. Taulukon 7. tuloksien lukuarvoja tarkasteltaessa on muistettava, että saadut tulokset ovat teoreettisia laskentatuloksia, joissa on oletettu kiinnikkeiden olevan täysin ideaalisesti rakenteessa. Käytännössä kylmäsiltojen kohdat eivät ole koskaan täysin ideaalisia. Tämän vuoksi laskentatulokset eroavat käytännön las-



kenta-arvoista. Laskennassa käytetty ansasmateriaalin lämmönjohtavuuskin voi vaihdella käytännössä eri kiinnikevaihtoehtojen välillä, mikä voi aiheuttaa muutoksia tuloksiin.

Taulukon 7. perusteella nähdään, että pistokkaita sekä Delta- ja SPA- ankkureita käyttäen päästään pienempään kylmäsiltaan kuin diagonaaliansailla 600 mm:n jakovälillä. Pistokkaita ja ankkureita käyttäen kuorien välille ei kuitenkaan muodostu yhteistoimintaa kuin osittain tai ei lainkaan. Tämän vuoksi on selvitettävä saadaanko kuorien välisellä yhteistoiminnalla merkittävää etua asuinrakennuksen seinäelementtien kantokyvyn kannalta.

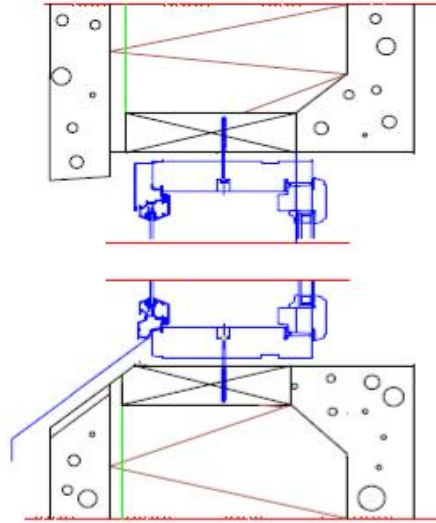
Runko- BES seinäelementti- julkaisusta nähdään nykyisillä eristepaksuuksilla eri seinärakenteille sallittavat puristuskapasiteetit. Asuinrakennuksen kuormien yksinkertaisen laskennan perusteella nähdään, että tavanomaisessa asuinkerrostalossa kantavia sandwich- elementtejä käyttäen voidaan tehdä yksi kerros enemmän kuin vastaavilla sisäkuorielementeillä. Ei-kantavien sandwich- elementtejen kantavuus vastaavasti riittää käyttämään niitä seitsemän kerrosta korkeammassa rakennuksessa kuin vastaavia 120 mm paksuja sisäkuorielementtejä. Laskelma on esitetty liitteessä 7. Laskelman mukaan kantavissa rakenteissa ei kuorien yhteistoiminnalla siis saada enää suurtakaan hyötyä kantokyvyn kannalta, kun taas ohuissa ei-kantavissa rakenteissa sillä on oleellinen merkitys.

Eristekerroksen paksuuden kasvaessa kuorien välisellä yhteistoiminnalla tulee olemaan tärkeämpi rooli, koska sisäkuorirakenteen kantokyky tulee heikkenemään eristepaksuuden kasvun aiheuttaman kuormien epäkeskisyyden lisääntymisen vuoksi. Jotta suurta rakennepaksuutta voidaan käyttää hyväksi, on kuorien välillä oltava jonkin asteista yhteistoimintaa. Tämän vuoksi on järkevää kylmäsiltaan vähentämiseksi pyrkiä harventamaan diagonaaliansaiden jakoväliä siten, että harvemman ansasjaon kanssa käytetään lisäksi pistoansaita, jotta kuorien välillä voidaan pitää tarvittava yhteistoiminta kantokyvyn kannalta.

## **5.2 Ikkuna- ja oviliitos**

Ikkuna- ja oviliitoksissa kylmäsiltaan aiheuttaa yleensä nykyinen apukarmirakenne. Betonijulkisivuissa apukarmirakennetta käytetään ikkunan ja oven kiinnittämiseen. Apukarmirakenne tehdään asentamalla painekyllästetty puu betonivaluun aukon ympärille. Apukarmirakenne on lähes nykyisen lämmöneristeen paksuinen tai ikkunan ympärille teh-

dään betonikuoriin pienet paksunnukset. Siten apukarmirakenteen kohdalle syntyy muuta rakennetta selvästi heikommin lämpöä eristävä kohta. Kuvassa 60 on esitetty ikkunan apukarmirakenne.

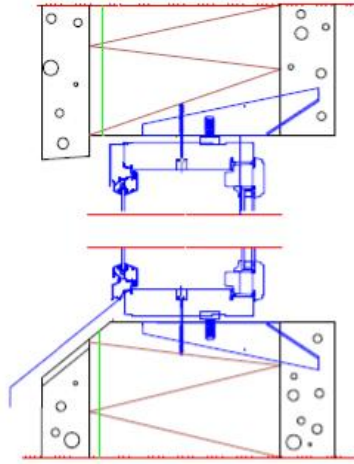


**Kuva 60 Ikkunan ympärillä oleva apukarmirakenne aiheuttaa rakenteeseen kylmäsilan**

Apukarmirakenteen kylmäsilan pienentäminen on mahdollista poistamalla se kokonaan. Apukarmirakenteen poistaminen on suositeltavaa myös siksi, että sen valmistaminen tulee vaikeaksi eristepaksuuden kasvaessa. Apukarmirakenteen käytössä on myös käytännössä muodostunut ongelmia, koska sen kosteuspitäisyys on rakennusaikana suuri. Tällöin esimerkiksi ikkunoita asennettaessa paikalleen, voi ikkunoihin tulla vaurioita, kun apukarmirakenne alkaa kuivua ja kutistua. Ikkunan karmisyyden ollessa nykyistä suurempi voivat vauriot olla todennäköisempiä. Ikkunavalmistajien osalta onkin asetettu vaatimukset apukarmirakenteen asennusajankohdan maksimikosteuspitäisyydelle. Apukarmirakenteen poistamista puoltaa lisäksi se, että painekyllästetty puu on ympäristöllisesti ongelma.

Apukarmirakenne voidaan korvata käyttämällä sinkitystä tai ruostumattomasta teräksestä valmistettuja karmikenkiä tai vastaavia kiinnikkeitä, joilla voidaan varmistaa ikkunan ja ovenkarmin kiinnitys tuulikuormaa vastaan ja palotilanteessa. Karmikengät ovat kiinnitetty sisäkuoresta siten, että ne eivät läpäise täysin lämmöneristekerrosta. Karmikenkiin kiinnitetään poraruuveilla ikkuna- tai ovikarmi tavallisesti 2...8 kiinnityskohdasta. Kiinnityskohdat on pyritty ikkuna ja ovivalmistajien osalta vakioimaan tietyn etäisyyden päähän karmin ulkoreunasta. Karmikengän kohdalle muodostuu vain pistemäinen

kylmäsilta, joten sen kylmäsilta vaikutus on apukarmirakennetta pienempi. Karmikengä-rakenteessa ei myöskään tapahdu muodonmuutoksia, jotka voisivat vaurioittaa ikkunara-kennettä. Kuvassa 61 on esitetty ikkunaliitos karmikengää käyttäen.

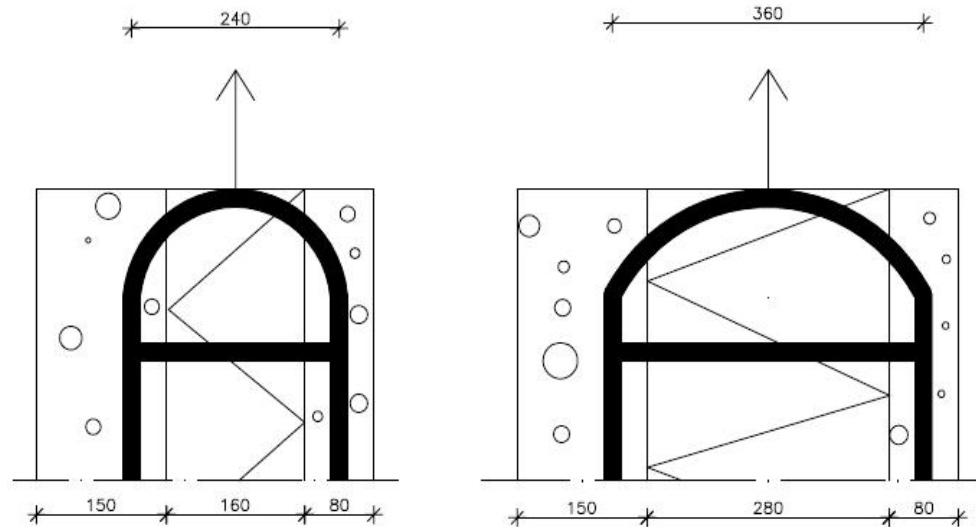


**Kuva 61 Ikkunaliitos karmikengillä (vrt. kuva 60)**

Samanaikaisesti tämän työn kanssa Betonikeskus ry on tehnyt betonijulkisivujen ikkunaliitosten kehitystyötä. Kehitystyön lähtökohtana ja tavoitteena on ollut saada ikkunaliitosratkaisuja erityisesti matalaenergiarakentamiseen, mutta myös passiivenergiarakentamiseen soveltuviin betonijulkisivuihin, joissa voidaan vähentää kylmäsiltoja ja ilmapuotoja ikkunaliitoksessa. Kehitystyön tuloksena syntyneet ikkunaliitosdetaljit ovat liitteenä 8.

### **5.3 Nostolenkit**

Sandwich- nostolenkin leveys kasvaa suuremmaksi eristepaksuuden kasvaessa, jolloin nostotilanteessa kuorien välistä puristusvoimaa ottavan lenkin välitangon puristusjännitys ja nurjahduspituus kasvaa. Välitangon dimensiota joudutaan kasvattamaan. Lenkin valmistamiseen tulee teknisiä vaikeuksia lenkin leveyden ja välitangon dimension kasvaessa. Välitanko aiheuttaa elementtiin kylmäsiltaa, jolloin nostolenkin aiheuttama kylmäsilta kasvaa. Kuvassa 62 on esitetty lenkin leveyden kasvaminen elementin pysty poikkileikkauksessa.

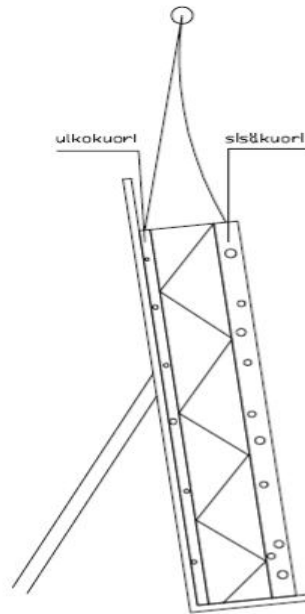


**Kuva 62 Sandwich- nostolenkin leveys kasvaa eristepaksuuden kasvaessa, jolloin kuorien välisen tangon puristusjännitykset kasvavat nostotilanteessa**

Jotta sandwich- nostolenkin aiheuttama kylmäsilta saadaan poistettua elementistä, on välitanko poistettava lenkistä. Sandwich- nostolenkin välitangon poistamisella voidaan vähentää myös kuorien välisiä pakkovoimia, joita välitanko osaltaan aiheuttaa. Tällöin on kehitettävä elementin nostolenkkiä niin, että nostotilanteessa kuorien välinen puristusvoiman ottaa vastaan rakenteen ulkopuolinen tanko, tai nostojärjestelmää on muutettava kokonaan. Tällöin tulee kyseeseen sisäkuoresta nosto tai neljästä pisteestä nosto (Precast/Prestressed Concrete Institute, 1990). Sandwich- elementin sisäkuoresta nosto onnistuu lähinnä vain kantaville elementeille, koska elementin painopiste ei ole kovinkaan kaukana sisäkuoren ulkopinnasta. Neljästä pisteestä nostolla saadaan ei-kantavatkin elementit nousemaan suorassa. Nostolenkkien ja ankureiden aiheuttama halkaisuvoima voi kasvaa ohuissa kuorissa, lähinnä ei-kantavassa sandwich- elementissä sekä yleisesti sandwich- elementin ulkokuoressa niin suureksi, että vaarana on kuoren halkeilu ilman nostokohtaan tehtävää raudoitusta. Jotta nosto-osien kapasiteetti voidaan käyttää sallituissa rajoissa täysin hyväkseen, on ohuiden kuorien nostokohdissa oltava kuoren vetojännityksiä vastaanottava raudoitus, jotta halkeilua ei pääse syntymään.

Neljästä pisteestä nostettaessa voidaan käyttää nostolenkkejä tai sisäkierteellisiä käyrä- ja hylsyankkureita. Nelipistenostossa ongelmakohtana on kuitenkin elementin muotista nosto, jolloin ulkokuoren nostolenkeille tulee lähes kokonaan elementin paino ja elementin

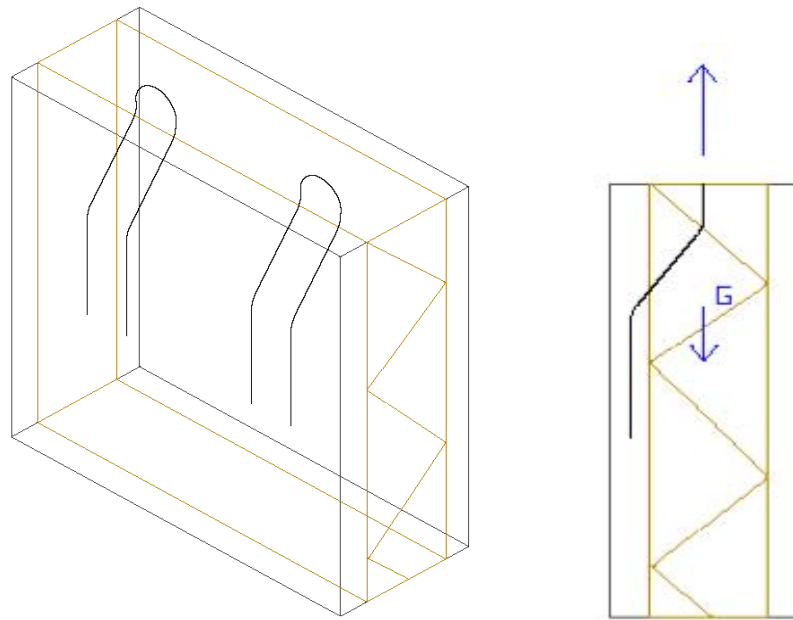
betoni ei ole vielä saavuttanut tavallisesti kuin reilun puolet suunnittelulujuudestaan. Kuvassa 63 on esitetty elementin muotista nostotilanne.



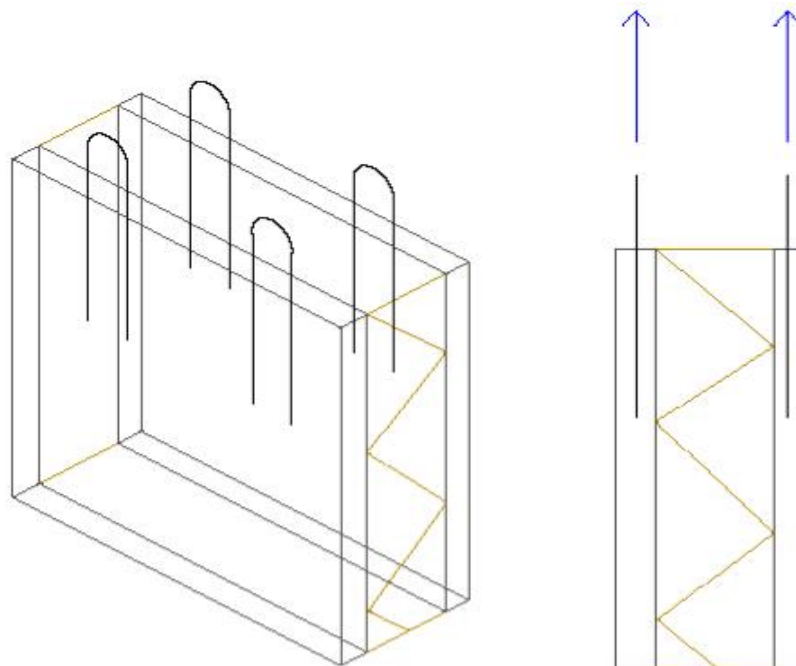
**Kuva 63. Sandwich- elementin muotista nosto 4-pistenostossa, kun muottipöytä on pystyasennossa**

Kuorien välinen puristusvoima täytyy huomioida myös nelipistenostossa. Tällöin joudutaan käyttämään nostettaessa ulkopuolista välitankoa tai nostopuomia, jolloin saadaan poikkisuunnassa elementtiin suoranosto.

Kuvissa 64 ja 65 on esitetty mahdolliset nostojärjestelmät sandwich- elementtien nostamiseen, kun eristepaksuus on nykyistä suurempi ja rakenteessa ei ole nostolenkin aiheuttavaa kylmäsiltaa.



**Kuva 64 Sisäkuoresta nostavat pokatut nostolenkit tai reikäraudat**



**Kuva 65 Nelipistenosto; nostolenkeillä tai käyrä- ja hylsyankkureilla. Sisäkuoren nosto-osat voivat olla tavallista terästä, ulkokuoressa RST- nosto-osat.**

## 6. Ilmatiiveys

Rakennuksen vaipan ilmapuodoilla on tutkimusten mukaan todettu olevan merkittävä rooli lämmitysenergian kulutukseen. Ilmavirtauksia esiintyy rakenteissa, joissa on betonikuoressa ja lämmöneristekerroksessa epäjatkuvuuskohtia. Ilmavirtaukset rakenteissa aiheuttavat huokoisten eristeiden lämmöneristävyyden heikkenemisen, jolloin rakennuksen lämpöhäviöt kasvavat ja sisällä pintalämpötilat laskevat. Tällöin rakennuksen ilmapuodot ilmenevät varsinkin kylmällä ja tuulisella säällä rakennuksen sisällä vedon tunteena. Vedon tunne saadaan pois nostamalla rakennuksen sisälämpötilaa. Ilmapuodot lisäävät vaaraa kosteuspitoisuuden kasvamiseen rakenteessa. Seinärakenteen ilmanpitävyys vaikuttaa siten seinärakenteen lämmöneristävyyteen sekä rakenteiden kosteustekniiseen toimivuuteen. Ilmatiiveys korostuu passiivienergiarakennuksissa, joissa ei yleensä ole varsinaisia pattereita ikkunan alla. Tällöin pienikin ilmapuoto esim. seinärakenteessa, havaitaan hyvin nopeasti rakennuksen sisällä, kun seinän pintalämpötila laskee vuotokohdan läheisyydessä.

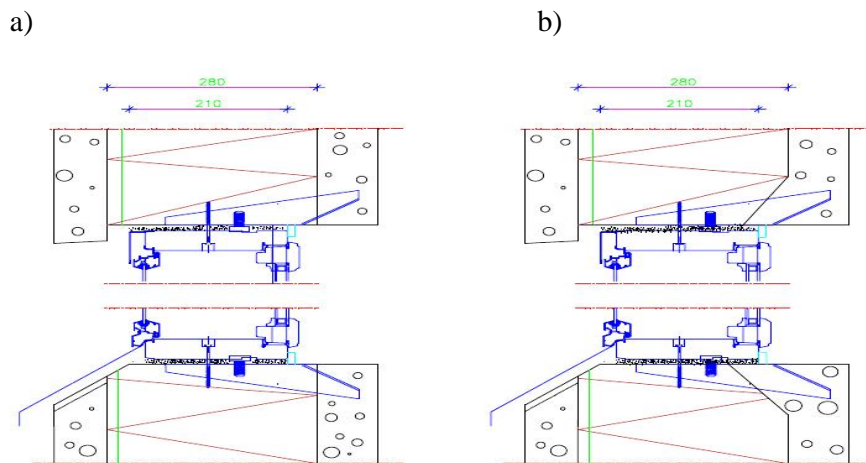
Rakennuksen ilmanpitävyyttä mitataan ilmapuotoluvulla  $n_{50}$ , jolla tarkoitetaan rakennuksen sisällä 50 Pa:n ali tai ylipaineessa ympäristöön nähden esiintyvää ilmavirtausta suhteessa rakennuksen sisätilavuuteen. Ilmapuotoluvun ollessa 0,5...1 1/h, rakennus on hyvin ilman pitävä. Rakennusten ilmanpitävyys tutkimusten mukaan betonielementtien tulojen ilmanpitävyys vaihteli keskimäärin 1,1...4,7 1/h. Vaihtelua aiheutti erityisesti yläpohjarakenteen rakennusmateriaali (Korpi, M. et al. 2007). Passiivienergiarakennuksen ulkovaipan ilmanpitävyydelle on määritetty vaatimus 0,6 1/h.

Seinärakenteen liitoskohdat ovat siten yleisimpiä ilmapuotokohtia. Siten myös elementtien väliset liitokset voivat olla merkittäviä ilmapuotokohtia. Liitoksen epäonnistunut lämmöneristys ja sisäkuoren juotosvalu voivat olla syynä huonoon ilmanpitävyyteen. Betoni itsessään voi toimia ilmansulkuna, kun se on hyvin tiivistetty.

Itse seinäelementissä esiintyviä ilmapuotokohtia voivat olla ikkuna- ja oviliitos sekä erilaiset läpiviennit, kuten esimerkiksi sähkövedot ja IV-laitteiden läpiviennit. Ikkuna- ja oviliitoksen ilmanpitävyyteen vaikuttaa ratkaisevasti rakennedetalji ja työn suorituksen laatu. Ikkuna- ja oviliitos tulisi aina betonisessa ulkoseinärakenteessa pyrkiä tekemään siten, että rakennuksen sisäpuolelta liitos voidaan tiivistää betonin päältä. Koska betoni it-

sessään on hyvin ilmatiivis rakennusmateriaali, on sen päälle työteknisesti helppoa ja varmaa tehdä esimerkiksi polyuretaanivaahtoa, saumanauhaa ja elastista kittiä käyttäen ilmatiivis liitos. Eristepaksuuden kasvaessa ikkunaliitoksen karmisyyvyys kasvaa, jolloin tiivistettävän liitoksen ala kasvaa. Tällöin on tärkeää tehdä työteknisesti ikkunaliitoksen tiivistys 2-vaihettiivistyksenä.

Eristepaksuuden kasvaessa ikkunan asennuskohta on hyvin keskellä poikkileikkausta, joten sisäkuoreen joudutaan tekemään betoninen paksunnus ikkunaliitoksen kohdalle. Tämä heikentää paikallisesti hieman seinän lämmöneristävyttä, mutta parantaa ikkunaliitoksen ilmatiiveyttä. Kuvassa 66 on esitetty periaatekuva sisäkuoreen tarvittavasta betonipaksunnuksesta, jotta ikkunaliitoksesta saadaan ilmatiivis.



**Kuva 66 a) ikkunaliitoksen pystyleikkauksen periaatekuva a) ei-ilmatiivis ikkunaliitos (ei välttämättä saada ilmatiivistä liitosta), b) ilmatiivis ikkunaliitos**

Läpivientien ilmavuotojen vähentäminen on mahdollista keskittämällä läpiviennit muutamiiin kohtiin rakennusta sekä suorittamalla tiivistystyö erityisellä huolella. Sähkövetojen ilmavuotojen vähentämiseksi tuleekin käyttää ulkona pintavetoja, jos se on suinkaan mahdollista.

Käytettävällä lämmöneristeillä voi olla myös vaikutusta elementin ilmanpitävyyteen. Hyvin ilmaa pitävä eriste ei välttämättä ole kokonaisuutena ilmanpitävä, jos sen saumoista tapahtuu ilmavuotoja. Yleisesti ajatellen muovipohjaisia eristeitä käyttäen on helpompi saada ilmaa pitäviä rakenteita kuin mineraalivillalla, mutta tällöin muovieristeiden muodonmuutokset tulee huomioida saumaratkaisuissa esimerkiksi käyttämällä reunoistaan puolipontattuja levyjä.

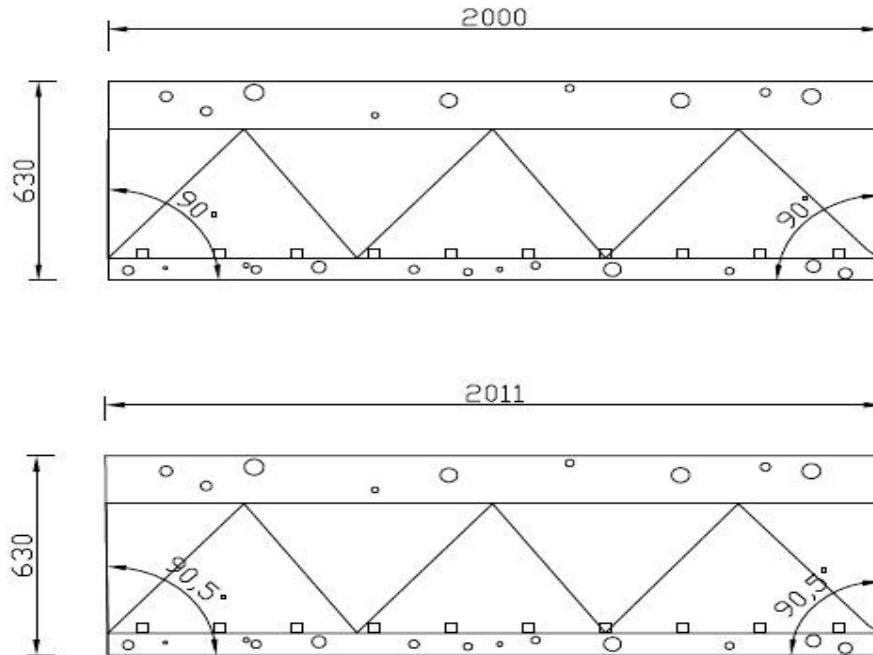


## 7. Valmistustekniset muutokset

Tässä luvussa tutkitaan betonisen ulkoseinäelementin valmistamiseen liittyviä muutoksia elementtitehtaassa, kun eristekerroksen paksuus on taulukoiden 3, 4 ja 5 tuloksien mukainen. Ulkoseinäelementtien eristepaksuuden kasvaminen aiheuttaa muutoksia etenkin sandwich- ja ohuteristerapatun elementin valmistukseen. Muottilaitojen korkeus ja lämmöneristeen määrä tulee kasvamaan, mikä lisää materiaali- ja työpanosta. Sandwich-elementin nostojärjestelmässä tulee tapahtumaan muutoksia. Lisääntynyt materiaaltarve kasvattaa materiaalsiirtojen määrää tehtaalla. Elementtien paksuuntuminen kasvattaa varastointi- ja kuljetustilavuuden tarvetta.

### 7.1 Sandwich- elementti

Mineraalivillaeristeen sandwich- elementin muottilaitojen korkeus kasvaa kantavaa elementtiä valmistaessa 380...630 mm, kun seinän U-arvo pienenee 0,24...0,10. Muottilaidoille tuleva valupaine muodostuu tällöin suuremmaksi ja muotit joudutaan tekemään entistä tukevammaksi. Muottimateriaalien; vanerin ja puutavaran määrä kasvaa muotin korkeuden kasvaessa. Muottilaitojen korkeuden ja tukevuuden kasvaessa muottien paino kasvaa, mikä vaikeuttaa muottien käsittelyä. Muottilaidan korkeuden kasvaessa tulee tärkeäksi laidan pystysuoruus. Muottilaita pyrkii valupaineen vaikuttaessa yläosassa muottia avautumaan aina ulospäin. Laidan kaltevuuden muuttuessa  $0,5^\circ$  elementin yhdellä reunalla, muuttuu elementin mitta 5,5 mm, jos muottilaidan korkeus on 630 mm. Jos elementtimuotin kumpikin päätylaita kallistuu  $0,5^\circ$ , muuttuu elementin pituus tällöin 11 mm. Elementtien valmistustoleranssit sallivat normaalissa valmistusluokassa pituustoleranssia 10 mm (Betonikeskus 2003, Betonielementtien toleranssit). Kuvassa 67 on esitetty elementin pituusleikkauksessa, elementin pituuden muutos, kun elementin kummatkin päätylaidat ovat valupaineen alla kallistuneet  $0,5^\circ$ .



**Kuva 67 Muotin päätylaitojen pystysuoruuden muutos kasvattaa nopeasti elementin pituutta, kun laidan korkeus on 630 mm**

Eristepaksuuden kasvaessa tarvitaan siis tavallista suurempaa mittatarkkuutta muotin koamisessa sekä tukevampaa muottia, jotta muotti ei muuta muotoaan valupaineen vaikuttaessa ja toleranssien sallimissa rajoissa voidaan pysyä. Kuvassa 68 on tavallista korkeampi muottilaita.



**Kuva 68 Tavallista korkeampi muottilaita, jossa on tukirunkona alumiiniprofiili**

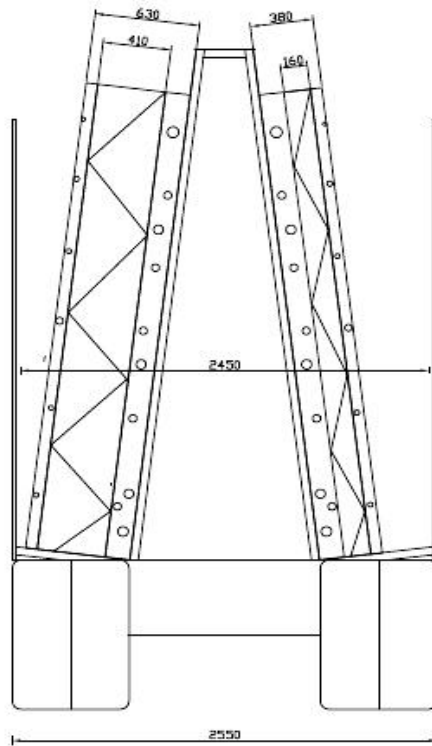
Lämmöneristeen paksuuden kasvaessa lämmöneristeen määrä ja sen asennustyö kasvaa. Eristekerroksen syntyessä yhdellä levypaksuudella, kasvaa eristeen asennusaika hieman eristepaksuuden mukaan. Muovieristeitä käytettäessä eristeen asentamiseen menee hieman enemmän aikaa suhteessa mineraalivillaan verrattuna, koska muovieristeen leikkaaminen on vaikeampaa ja mittatarkempaa. Lämmöneristeen asentamiseen tarvittava aika on myös riippuvainen käytetystä ansastusratkaisusta. Muovieristeitä käytettäessä ansaiden tai ankkureiden kohdat joudutaan aina tiivistämään polyuretaanivaahdolla, jotta ne voidaan saada riittävän tiiviiksi. Kokonaisuutena muovipohjaisia eristeitä käyttäen eristekerroksen asentamiseen menee enemmän aikaa kuin mineraalivillaeristeellä. On kuitenkin huomattava, että muovipohjaisia eristeitä käyttäen voidaan päästä joissakin tapauksissa yhdellä eristekerroksella, kun taas mineraalivillaa tarvittaisiin kaksi kerrosta. Lämmöneristeiden materiaalihukat voivat lisäksi vaihdella eristeiden välillä.

Elementin lämmöneristävyuden parantaminen aiheuttaa muutoksen nostojärjestelmään. Muutosta tulee tapahtumaan tarvittavissa nostovälineissä; ketjuissa, puomeissa yms. Neliipistenostossa nostolenkkejä käytettäessä joudutaan muottilaidat rei'ittämään, mikä vähentää muotin käyttöikä. Tämän vuoksi nostoankkurit ovat suositeltavia.

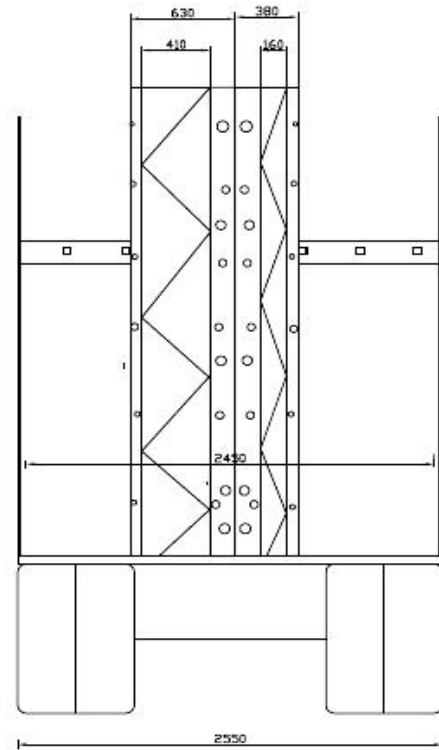
Elementin paksuuden kasvaminen tulee lisäämään elementtitehtaan varastointitilantarvetta. Tällöin elementtejä ei voida enää varastoida niin suurta lukumäärää kuin nykyisillä paksuuksilla, mikä täytyy varaston logistiikassa ottaa huomioon. Tilantarve kasvaa myös elementtejä työmaalle kuljettaessa. Kuljetuskaluston nykyinen lavatilavuus tulee olemaan leveyden puolesta rajoite. Jos lavapituus ei riitä korvaamaan puuttuvaa lavaleveyttä, tulee yhdellä kerralla kuljetettava seinäelementtien neliömäärä vähenemään jopa puolella nykyisestä.

Seinän paksuuden ylittäessä 380 mm, elementtejä ei enää voida sijoittaa tavanomaisessa A-pukillisessa kuljetuskalustossa rinnakkain. Elementin suuri paksuus vaikeuttaa elementin laskemista A-pukkiin ja nostamista siitä pois, koska betonikuoret pyrkivät pystysuunnassa liukumaan toistensa suhteen, kun elementin toinen kuori tapaa lavaan ja toinen on vielä ilmassa. Tämä aiheuttaa betonikuorille ja ansaille rasitusta. Kuljettamalla elementtejä kampapukissa saadaan tehollista lavaleveyttä kasvatettua ja elementtien laskeminen lavalle on helpompaa. Kuvassa 69 on esitetty A-pukissa ja kampapukissa tapahtuva elementtien kuljettaminen

a)



b)



Kuva 69 Elementtien kuljettaminen a) A-pukissa b) kampapukissa

## 7.2 Eriytetty seinärakenne (sisäkuorielementti)

Eriytetyn seinärakenteen valmistamisessa ei tapahdu juurikaan muutoksia eristepaksuuden kasvaessa. Sisäkuorielementin muottilaidat pysyvät hyvin matalina, maksimissaan 150 mm paksuina, koska sisäkuorielementit valetaan aina siten, että sisäkuori on muottia vasten ja sen päälle asennetaan tarvittaessa lämmöneristeet.

Eristeen asentaminen tehtaassa sisäkuorielementteihin vähentää työmaalla tehtävää työtä, mutta eristeen saumat joudutaan joka tapauksessa aina eristämään työmaalla. Lämmöneristeen suojaaminen elementin varastoinnin ja kuljetuksen aikana kastumiselta on vaikeaa. Lisäksi eristeen kiinnipysyminen elementin siirroissa on ongelmallista (Karvinen S. 2005). Tämän vuoksi sisäkuorielementtien lämmöneristäminen tehdään usein kokonaan työmaalla.

Sisäkuorielementtien varastointitilantarve on melko pieni, jos lämmöneristeitä ei asenneta tehtaalla. Tilantarvetta hieman kasvattavat ikkuna- ja oviaukon kohdalle tehtävät sisäkuoren paksunnukset. Kuljetuksen tilantarve ei kuitenkaan tällöin juurikaan kasva, joten kerralla kuljetettavien elementtien määrä ei muutu.

### **7.3 Eristerapattu seinärakenne (sisäkuorielementti)**

Eristerapattun sisäkuorielementin valmistuksessa tulee tapahtumaan muutoksia vain ohuteristerapattujen seinien kohdalla. Kolmikerrosrapattun seinärakenteen lämmöneristäminen ja rappaus suoritetaan usein kokonaan työmaalla, joten sen valmistaminen ei eroa eriytetyn seinärakenteen sisäkuorielementin valmistamisesta muuten kuin aukkojen kohdalle tehtävien paksunnusten suhteen. Ohuteristerapattun seinäelementin valmistamisessa muuttuu muottilaitojen korkeus sekä varaston ja kuljetuksen tilantarve eristemäärän kasvaessa.

Ohuteristerapattut seinäelementit valmistetaan siten, että lämmöneristeet ovat muottia vasten ja niiden päälle valetaan sisäkuori. Sisäkuoren sisäpinta on tällöin aina hiertopinta.. Eristepaksuuden kasvaessa kasvaa muottilaitojen korkeus maksimissaan 310...550 mm. Ohuteristerapattun seinäelementin muottilaitoihin tulee siten tapahtumaan samanlaiset muutokset sandwich- elementin kanssa, riippuen käytettävästä lämmöneristeestä.

Eristepaksuuden kasvaessa lamellivillaa ja EPS- eristeitä ei tarvitse asentaa kuin yksi eristekerros, koska niiden valmistustekniikka mahdollistaa paksujen eristelevyjen valmistamisen. PUR- eristeitä käyttäen päästään muuten hyvin ohuilla eristepaksuuksilla, mutta seinän U-arvoon 0,10 pääsemiseksi tarvitaan aina kaksi eristekerrosta. Eristystyö muovipohjaisia eristeitä käyttäen voi olla hieman nopeampaa kuin lamellivillaa käyttäen, koska muovipohjaisten eristeiden levykoko on suurempi. Muovipohjaisten eristeiden levykoko ei voi kuitenkaan olla hirvittävän suuri, koska ongelmaksi voi tulla tällöin eristeen liian suuret muodonmuutokset. Lamellivillan seinän tasoa vastaan kohtisuora painuma tulee sisäkuoren omanpainon aiheuttaman kuormituksen vuoksi kasvamaan, koska eristekerroksen paksuus on nykyistä suurempi. Tämä tulee ottaa huomioon eristepaksuutta valittaessa.

Eristepaksuuden kasvaessa elementtien varastointi ja kuljetustilantarve kasvaa. Elementtien kuljetuksessa rajoitteeksi tulee sandwich- elementtien tapaan kuljetuskaluston lavatilavuus. Ohuteristerapattujen elementtien kuljetusta rajoittaa lisäksi se, että elementtien rappauserkerros on erityisen vaurioaltis, koska se ei kestä juurikaan pistemäisiä kuormia vaurioitumatta.

## **7.4 Eristemateriaalien valmistustekniset erot**

Eristemateriaalien valmistustekniset plussat ja miinukset mineraalivillan ja muovipohjaisien eristeiden välillä on esitetty seuraavassa:

mineraalivilla:

- + helppo työstää (leikata, muotoilla)
- + joustava materiaali => helppo asentaa ja ei erillistä eristesaumojen tiivistämistä
- vaatii useita asennuserroksia hyvään lämmöneristävyyteen (poikkeus lamellivuorivilla)
- uritettu villa <=> materiaalihukka suhteellisen suuri urittamattomaan verrattuna
- varastointi ja kuljetustilantarve suuri

muovipohjaiset eristeet:

- + ohuemmat paksuudet => päästään usein yhdellä asennuserroksella
- + suurempi levykoko <=> asennusnopeus
- + pieni materiaalihukka
- + varastointi- ja kuljetustilantarve kohtuullinen
- lujaa materiaalia <=> materiaali ei jousta=> asentaminen vaikeampaa => hidastaa asennustyötä
- leikkaustyö tarkkaa ja kova materiaali => vaatii usein konesahan leikkaamiseen
- eristeen saumojen ja kiinnikkeiden tiivistystyö (eristeen muodonmuutokset)
- aukkojen palokatkot (EPS, XPS) (osittain PUR)

## 8. Kustannusvaikutus

Betonisten ulkoseinäelementtien lämmöneristävyyden parantaminen muuttaa osaltaan elementin kustannusrakennetta. Tässä luvussa on tarkoitus laskea karkeasti kustannusrakenteessa tapahtuvat muutokset elementin valmistajan kannalta. Elementtien valmistamisessa tapahtuvat muutokset esiteltiin edellisessä luvussa. Lämmöneristemateriaalien keskinäiset hinnat vaihtelevat paljon, joten ne osaltaan vaikuttavat elementin hintaan. Lisääntyvä materiaalitarve kasvattaa siirtojen määrää tehtaalla, mikä aiheuttaa kustannuslisän.

Tässä työssä kustannusten muutoksien vaikutus on laskettu soveltamalla materiaalivalmistajien hinnastohintoja, sekä betoniteollisuuden kustannustietoja. Hinnat ovat saatu materiaalitoimittajilta sekä Betonikeskus ry:stä. Joidenkin lämmöneristeiden hinnastot ovat vanhoja, ja hinnat voivat olla siten hieman muuttuneet markkinatilanteen ja tuotteen muuttumisen vuoksi. Joidenkin materiaalien hintoja ei ollut käytettävissä, joten niiden hinnat on jouduttu arvioimaan. Laskennan apuna on käytetty mallielementtiä, jonka pituus on 3,6 m ja korkeus 3,0 m ja jossa on yksi 1,5 m<sup>2</sup>:n aukko.

### *Sandwich- elementti*

Lämmöneristävyyden parantamiseksi sandwich- elementin kustannuksiin aiheutuvia muutoksia ovat;

- Muotit
  - o materiaali
  - o työ
- Ansaat
  - o materiaali
  - o työ
- Lämmöneristeet
  - o materiaali
  - o työ
- Nostoelimet
- Kuljetus

Muottilaitojen korkeuden kasvaessa muottimateriaalin määrän kasvaminen ja muottilaitojen valmistustyö kasvaa keskimäärin 1,5-kertaiseksi nykyisestä. Muottilaitojen kustannusmuutokset ovat riippuvaisia käytettävästä lämmöneristeestä ja sen paksuudesta. Polyuretaania käyttäen päästään matalimpiin muottilaitoihin, kun taas mineraalivillaa käyttäen

tarvitaan korkeimmat muottilaidat. Muottilaitojen aiheuttaman kustannus on kuitenkin usein vain kertaluontoinen kustannus, koska samalla muotilla voidaan tehdä useita elementtejä.

Ansas- ja ankkuriratkaisusta riippuen määräytyvät siitä aiheutuvat kustannukset. Ansaiden ja ankkureiden keskimääräiset materiaalihinnat on esitetty taulukossa 8. mallielementtiin soveltuvana, kun seinän eristepaksuudeksi on oletettu 160 mm.

**Taulukko 8 Ansas- ja ankkurivaihtoehtojen keskimääräisiä materiaalihintoja**

<b>Ansas- ja ankkuriratkaisu</b>	<b>jakoväli [mm]</b>	<b>€/m<sup>2</sup></b>
Diagonaaliansas	600	5
Pistoansas (pistokas) 4...5 kpl/m <sup>2</sup>	500	4
SPA-ankkurit+ pistokkaat 2...3 kpl/m <sup>2</sup>	800...1200 (pistokkaat)	5,5
Delta-ankkurit+pistokkaat 2...3 kpl/m <sup>2</sup>	800...1200 (pistokkaat)	7
Levyankkurit+pistokkaat 2...3 kpl/m <sup>2</sup>	800...1200 (pistokkaat)	14
Putkisylinteri-ankkurit+pistokkaat 2...3 kpl/m <sup>2</sup>	800...1200 (pistokkaat)	19

Taulukon 8 tuloksista nähdään, että pisto- ja diagonaaliansasaiden materiaalihinnat ovat keskimäärin edullisimpia. SPA- ankkuriratkaisu on hieman diagonaaliansaita kalliimpi. Levy- ja putkisylinteri-ankkuriratkaisun hinta on keskimäärin lähes 3...4-kertainen diagonaaliansasain hintaan nähden. Ansaiden ja ankkureiden asennustyön nopeus vaihtelee suuresti, koska ansaiden ja ankkureiden välillä asennusmäärät ovat hyvin erilaiset. Lisäksi ankkureita käytettäessä joudutaan käyttämään aina verkkoraudoitusta sisä- ja ulkokuoressa. Tämä lisää ankkureiden käytön kustannuksia. Diagonaali- ja pistoansasaiden asentaminen on ajallisesti nopeinta, koska ne voidaan vain painaa betoniin.

Eristepaksuuden kasvamisesta aiheutuvat kustannusmuutokset lämmöneristeen osalta seinän eri U-arvoihin erilaisilla eristeratkaisuilla on esitetty taulukossa 9. Taulukon 9. tuloksien laskennassa on käytetty lämmöneristeen paksuutena taulukossa 3. esitettyjä eristepaksuuksia ja tuloksissa on huomioitu eristeen asennustyö sekä tarvittavien eristekerrosten määrä asennustyön kustannuksiin.



**Taulukko 9 Sandwich- elementin lämmöneristeiden kustannusmuutokset (%) seinän eri U-arvoille. Hinnat sisältävät lämmöneristemateriaalin ja sen asennustyön, sekä diagonaaliensaiden tai pistokaiden asennuksen, mutta ei ansaan materiaalihintaa.**

Rakenne	Betonisandwich, SK 80 mm, UK 70 mm						
	U-arvo 0,24		U-arvo 0,16		U-arvo 0,14		U-arvo 0,10
Eristeratkaisu	YHT.	YHT.	Muutos	YHT.	Muutos	YHT.	Muutos
	€/m <sup>2</sup>	€/m <sup>2</sup>	%	€/m <sup>2</sup>	%	€/m <sup>2</sup>	%
<i>vuorivilla (diag.ansas)</i>	23	35	54	41	76	60	159
<i>lasivilla (diag.ansas)</i>	22	32	44	38	73	53	144
<i>EPS* (diag.ansas)</i>	30	44	50	51	74	74	149
<i>EPS* (pistokas)</i>	30	42	43	47	60	67	125
<i>XPS (diag.ansas)</i>	30	40	36	49	65	69	132
<i>XPS (pistokas)</i>	30	39	30	45	53	63	111
<i>PUR (diag.ansas)</i>	36	52	47	60	68	89	151
<i>PUR (pistokas)</i>	36	49	39	57	60	82	130
<i>PUR 70+min.villa</i>		44		49		68	
<i>PUR 90+min.ivilla</i>		47		52		71	
<i>PUR 120+min.villa</i>		50		55		74	
<i>PUR 160+min.villa</i>				60		77	
<i>PUR 180+min.villa</i>						79	

\*= arvioitu hinta

Taulukon 9. laskelma on tarkemmin esitetty liitteessä 9, josta on nähtävissä laskelmassa käytetyt hinnat Taulukon 9. tuloksista nähdään, että lisäkustannusten suuruus vaihtelee paljon eristeittäin. Elementin ansastusratkaisulla on myös vaikutusta elementin lämmöneristeiden paksuuteen ja siten eristyksen hintaan. Edullisin eristeratkaisu tulee jatkosakin olemaan mineraalivilla. EPS- ja XPS- eristeratkaisut tulevat olemaan lähes samanhintaisia, ollen keskimäärin noin 20 % mineraalivillarakaisua kalliimpia. Polyuretaanieristeratkaisu on mineraalivillan hintaan nähden noin 50 % kalliimpi. Polyuretaanin ja mineraalivillan sekaeristysratkaisun suhteellinen hintaero pienenee mineraalivillaeristykseen nähden, kun seinän U-arvovaatimus kiristyy. Kuitenkaan sillä ei voida koskaan päästä mineraalivillaa edullisempaan ratkaisuun. Polyuretaanieristeiden hintaan verrattuna sekaeristysratkaisun käyttö tulee taloudellisesti mielekkääksi vasta, kun seinän U-arvo on luokkaa 0,10. Tällöin on kuitenkin huomattava, että sen kuljetuskustannukset voivat kasvaa polyuretaanilla eristettyyn elementtiin nähden, joten kokonaisuutena sekaeristysratkaisun hintaetu voi muuttua negatiiviseksi.

Nostojärjestelmän muuttuminen aiheuttaa osaltaan elementin valmistuskustannuksiin muutosta. Taulukossa 10. on esitetty mallielementin eri nostovaihtoehdot, kun elementti on kantava ja ei-kantava.

**Taulukko 10 Eri nostojärjestelmien kustannuksia kantavalle ja ei-kantavalle sandwich- elementille**

<b>Kantava elementti (5,4 t)</b>		
<b>2-pistenosto</b>		
Sandwich nostolenkki RST (nykyinen)	68	€/elementti
Sisäkuoresta nosto lenkeillä	20	€/elementti
Siskuoresta reikärauta	41	€/elementti
<b>4-pistenosto</b>		
Lenkit	32	€/elementti
Käyräankkurit	46	€/elementti
Hylsyankkurit	42	€/elementti
<b>Ei-kantava elementti (3,6 t)</b>		
<b>2-pistenosto</b>		
Sandwich nostolenkki RST	36	€/elementti
<b>4-pistenosto</b>		
Lenkit	20	€/elementti
Käyräankkurit	31	€/elementti
Hylsyankkurit	31	€/elementti

Taulukon 10. mukaan nähdään, että sisäkuoresta nosto on kaikkien edullisin nostotapa kantavalle sandwich- elementille, koska siinä ei tarvitse käyttää lainkaan ruostumattomia nosto-osia. Nelipistenostossa ulkokuoren nosto-osa (nostolenkki tai-ankkuri) tulee olla ruostumattomasta teräksestä valmistettu, kun taas sisäkuoressa voi olla tavallinen teräs. Nelipistenostossa nosto-osien hinta voi tulla edullisemmaksi kuin nykyinen sandwich-nostolenkki.

Ei-kantavan elementin nelipistenosto tulee taloudellisesti nostolenkkejä ja -ankkureita käyttäen edullisemmaksi kuin kaksipistenosto sandwich- nostolenkkiä käyttäen. Laskelmassa käytetyt hinnat sandwich- elementin nostojärjestelmistä on esitetty liitteessä 10.

Sandwich- elementin kuljetuskustannukset voivat elementissä käytettävästä lämmöneristemateriaalista ja sen paksuudesta riippuen kasvaa jopa 2-kertaiseksi.

### *Eriytetty seinärakenne*

Eriytetyssä seinärakenteessa kustannusmuutoksia aiheuttaa lämmöneristeen määrän kasvaminen, kun eristeet asennetaan jo elementtitehtaalla. Eristepaksuuden kasvamisesta aiheutuvat kustannusmuutokset lämmöneristeen osalta seinän eri U-arvoihin erilaisilla eristeratkaisuilla on esitetty taulukossa 11. Taulukon 11. laskelmissa on käytetty lämmöneristepaksuutena taulukossa 4. esitettyjä eristepaksuuksia ja tuloksissa on huomioitu eristeen asennustyö sekä asennuskerrosten määrän kasvamisessa tapahtuvat kustannusmuutokset.

**Taulukko 11 Lämmöneristetyn sisäkuorielementin lämmöneristeiden kustannusmuutokset (%) seinän eri U-arvoille. Hinnat sisältävät lämmöneristemateriaalin ja sen asennustyön, sekä kiinnikkeiden asennuksen, mutta ei kiinnikkeiden materiaalihintaa.**

Rakenne	Eriytetty seinärakenne, sisäkuori 120 mm						
	U-arvo 0,24		U-arvo 0,16		U-arvo 0,14		U-arvo 0,10
Eristeratkaisu	YHT.	YHT.	Muutos	YHT.	Muutos	YHT.	Muutos
	€/m <sup>2</sup>	€/m <sup>2</sup>	%	€/m <sup>2</sup>	%	€/m <sup>2</sup>	%
vuorivilla+tuulensuojavuorivilla 30 mm	23	27	19	29	29	38	69
lasivilla+tuulensuojalaseivilla 30mm	20	23	16	25	27	34	71
EPS*+ lasikuitukangas*		46		52		72	
XPS+ tuulensuojakipsilevy 9 mm*		41		46		66	
PUR+ tuulensuojakipsilevy 9 mm*		52		59		84	

\* = arvioitu hinta

Taulukon 11 laskelmat on esitetty tarkemmin liitteessä 11, josta voi nähdä laskelmassa käytetyt hinnat. Taulukon 11 tuloksista nähdään, että mineraalivillaa lämmöneristeenä käyttäen päästään edullisimpaan eristeratkaisuun seinän U-arvon vaihdeltaessa 0,16:sta 0,10:een. EPS- ja XPS- eristeratkaisujen hinta on mineraalivillan verrattuna 1,5...2-kertainen. Polyuretaanieristeratkaisu on taas mineraalivillan nähden 2...2,5-kertainen, riippuen seinän U-arvosta. Muovieristeratkaisujen hintaa nostaa eriytetyn rakenteen vaatima paloluokitus tuuletusrakoon rajoittuvasta eristemateriaalista sekä eristeen suuri puristuslujuus mineraalivillan verrattuna, jota ei voida hyödyntää.

### *Ohuteristerapattu seinäelementti*

Ohuteristerapattun seinäelementin valmistamiseen lisäkustannuksia aiheuttavat;

- Muotit
  - o materiaali
  - o työ
- Lämmöneristeet
  - o materiaali
  - o työ
- Kuljetus

Ohuteristerapattun elementin muottilaitojen korkeuden aiheuttama kustannusmuutos on keskimäärin samaa suuruusluokkaa sandwich- elementin muottimuutosten kanssa.

Eristepaksuuden kasvamisesta aiheutuvat kustannusmuutokset lämmöneristeiden osalta seinän eri U-arvoihin erilaisilla eristeratkaisuilla on esitetty taulukossa 12 Taulukon 12. tuloksien laskennassa on käytetty taulukossa 5. esitettyjä eristepaksuuksia ja tuloksissa on huomioitu eristeen asennustyö sekä eristekerroksien määrän kasvamisesta aiheutuvat kustannusmuutokset.

**Taulukko 12 Ohuteristerapattun elementin lämmöneristeiden kustannusmuutokset (%) seinän eri U-arvoille. Hinnat sisältävät lämmöneristemateriaalin ja sen asennustyön**

Rakenne	Eristerapattu seinärakente (ohuteristerappaus), sisäkuori 120 mm						
	U-arvo 0,24		U-arvo 0,16		U-arvo 0,14		U-arvo 0,10
Eristeratkaisu	YHT.	YHT.	Muutos	YHT.	Muutos	YHT.	Muutos
	€/m <sup>2</sup>	€/m <sup>2</sup>	%	€/m <sup>2</sup>	%	€/m <sup>2</sup>	%
Lamellivuorivilla	32	47	49	53	69	73	133
EPS *	34	41	21	46	36	65	90
PUR	37	48	29	55	49	77	107

\* = arvioitu hinta

Taulukon 12 laskelmat on esitetty tarkemmin liitteessä 12, josta käy ilmi laskelmassa käytetyt hinnat. Taulukon 12. tuloksista nähdään, että EPS- eristeratkaisulla voidaan päästä pienimmillä kustannusmuutoksilla. EPS- eristeiden kuutiohintaa on jouduttu arvioimaan, joten laskenta on sen vuoksi EPS:n kohdalta vain arvio. Lamellivuorivilla ja polyyuretaani eristeratkaisujen hintaerot tasoittuvat seinän U-arvon pienentyessä.

Ohuteristerapatun seinäelementin kuljetuskustannukset tulevat sandwich- elementin tavoin lisääntymään. Kuljetuskustannukset voivat eristemateriaalista ja eristepaksuudesta johtuen kasvaa 2-kertaiseksi nykyisestä.

Yhteenvedona kaikkien seinäelementtien kustannuslaskelmista voidaan todeta, että valmistuskustannuksissa muovipohjaiset eristeet ovat mineraalivillaa kalliimpia. Muotti- ja kuljetuskustannuksien myötä eristemateriaalien väliset hintaerot tasoittuvat, koska muovipohjaisilla eristeillä päästään ohuempiin rakennepaksuuksiin.

Kokonaisuutena elementtien valmistus- ja kuljetuskustannukset tulevat nousemaan selvästi lämmöneristävyden kasvaessa. On kuitenkin huomattava, että asuinkerrostalon julkisivuelementtien kustannus on keskimäärin vain 5 % talon rakennuskustannuksista, joten julkisivuelementtien hinnan nousun merkitys on hyvin vähäinen, jos sillä voidaan talon loppukäyttäjälle aiheuttaa selvää hyötyä. Koska julkisivuelementin rakenteellinen ja rakennusfysikaalinen toiminta muuttuu eristepaksuuden kasvaessa, on suositeltavaa tutkia betonisen ulkoseinärakenteen elinkaartiloutta huomioiden tulevaisuuden energiahinnat.

## 9. Yhteenveto

Tutkimuksessa selvitettiin, miten betonisten sandwich, eriytetyn ja eristerapatun ulkoseinäelementin lämmöneristävyttä voidaan parantaa ja mitä vaikutuksia sillä tulee olemaan elementtien toimintaan ja valmistamiseen. Betonisen ulkoseinäelementin lämmöneristävyyden parantaminen on mahdollista lähinnä lämmöneristekerroksen paksuutta kasvattamalla, paremmin lämpöä eristäviä eristeitä käyttämällä sekä elementin kylmäsiltoja vähentämällä. Paksuntamalla lämmöneristekerrosta tai käyttämällä paremmin lämpöä eristävää eristettä voidaan voimakkaimmin vaikuttaa rakenteen lämmöneristävyyteen. Kylmäsiltojen määrää tulee pyrkiä nykyisestä vähentämään, koska lämmöneristävyyden kasvassa kylmäsiltojen suhteellinen osuus kasvaa, vaikka kylmäsiltojen koko pysyy samana.

Lämmöneristepaksuus kasvaa U-arvoon 0,16 pääsemiseksi keskimäärin 1,5-kertaiseksi nykyisestä. Vastaavasti U-arvoon 0,14 pääsemiseksi lämmöneristepaksuus kasvaa 1,75-kertaiseksi ja U-arvoon 0,10 2,5-kertaiseksi. Mineraalivillaa käyttäen lämmöneristepaksuudet kasvavat suurimmiksi. Muovipohjaisilla eristeiden (EPS, XPS ja PUR) lämmöneristävyys on 16...40 % mineraalivillaa parempia, joten niillä voidaan päästä mineraalivillaa ohuempiin eristepaksuuksiin. Muovipohjaiset eristeet soveltuvat ominaisuuksien puolesta betonin kanssa käytettäväksi. Muovipohjaisten eristeiden mekaaniset, kosteus-, ääni ja palotekniset ominaisuudet poikkeavat mineraalivillaeristeistä. Tärkeimpiä huomioitavia asioita muovieristeitä käytettäessä ovat eristeen muodonmuutokset ja palo-ominaisuudet. Lämpötilan vaihteluista aiheutuvat eristelevyjen muodonmuutokset voidaan hallita saumaratkaisuilla. Palo-ominaisuuksiltaan muovipohjaiset eristeet katsotaan palaviksi eristeiksi. Tällöin niiden käyttöä on rajoitettu kerrosluvun sekä julkisivun ja tuuletusrakoon rajoittuvan materiaalin suhteen. Muovipohjaisten eristeiden käyttö on rajoitettu maksimissaan 8-kerroksiseen asuinrakennukseen. Julkisivunmateriaalin ja tuuletusrakoon rajoittuvan eristemateriaalin suhteen muovipohjaisia eristeitä ei voida käyttää eriytettyssä seinärakenteessa yli 2-kerroksisissa rakennuksissa ilman tuuletusrakoon tehtävää palosuojasta palamattomasta materiaalista. Muovipohjaisia eristeitä käytettäessä joudutaan lisäksi tekemään palokatkoja palamattomasta materiaalista julkisivussa olevien aukkojen yläosaan sekä osittain kerrosten välille.

Muovipohjaisten eristeiden mineraalivillaa ohuempi eristepaksuus tuo etuja lähinnä elementin liitoksissa, ulkokuoren kantavissa kiinnikkeissä, nostojärjestelmissä, valmistustyössä ja kuljetuksessa.

Eristepaksuuden kasvaminen aiheuttaa muutoksia rakenteen toimintaan ja valmistamiseen. Elementin kantokyky ja rakennusfysikaalinen toiminta muuttuvat. Sandwich-elementin kuorien välisen yhteistoiminnan tarve kasvaa, koska ansaan jäykkyys vähenee eristepaksuuden kasvaessa. Sisäkuorirakenteen eli eriytetyn ja eristerapatun elementin kantokyky laskee epäkeskisen kuormituksen kasvaessa. Rakennusfysikaalisesti seinärakenteen läpi virtaava lämpövirta vähenee eristepaksuuden kasvaessa, jolloin rakenteen lämpövuodot ovat vähäisempiä. Tällöin sisä- ja ulkopinnan välinen lämpötilaero kasvaa. Vähentyneiden lämpövuotojen vuoksi ulkokuoren lämpötilat laskevat. Tarkastellessa stationääritilassa sandwich-seinärakennetta, jossa sisälämpötila oli 21 °C ja ulkolämpötila -15 °C, olivat ulkokuoren lämpötilat keskimäärin 0,2...1 °C kylmempinä, kun lämmöneristeenä oli 400 mm mineraalivillaa nykyisen 160 mm:n sijaan. Ansaan kohdalla lämpötilaerot olivat tätäkin suuremmat. Ulkokuoren pintalämpötilat olivat tarkastelussa 0,2...0,6 °C kylmempinä kuin nykyisellä lämmöneristyksellä ja alhaisimmillaan laskennallisesti jo 0,1 °C:n päässä ulkoilman lämpötilasta. Tällöin kosteuden tiivistyminen ulkokuoren pintaan on mahdollista nykyistä herkemmin varsinkin yöllä ja aamulla. Vähentynyt lämpövirta vähentää myös ulkoseinän kosteuden poistokykyä.

Eristepaksuuden kasvamisella on vaikutusta ulkokuorta kannattelevien kiinnikkeiden pituuteen ja niihin kohdistuviin rasituksiin. Suurimmat muutokset tapahtuvat sandwich-elementin diagonaaliansailla, joiden rasitukset kasvavat nykyistä ansasmallia käytettäessä. Ansaan geometrian muuttamisella ei voida saada ansaan kuormituskapasiteettia kasvatettua, koska ansaan ripustusasteiden määrä vastaavasti vähenee tällöin. Ansaan pituutta ja siten ripustusasteiden määrää sekä ansaan vetosauvan ja paarteen liitoksen kestävyyttä kasvattamalla voidaan ansaan kapasiteettia kasvattaa. Vetosauvan ja paarteen liitoksen kapasiteetin kasvattaminen tulee mahdolliseksi esimerkiksi vahvistamalla ansaan paarretta.

Ulkokuorta kannattelevista kiinnikkeistä aiheutuu merkittävimmät kylmäsiljat sandwich-elementille. Sandwich-elementin kylmäsiltoja voidaan vähentää esimerkiksi ansaiden jakoväliä harventamalla. Suurella eristepaksuudella tämä kuitenkin lisää entisestään an-

sailia tulevaa rasitusta ja ansaan käyttöaste kasvaa yli 70 %:n eristepaksuuden ollessa 400 mm, kun ei huomioida ansaaseen kohdistuvia pakkovoimia. Koska käytännön ansaan mitoituksessa ei ole otettu huomioon ansaisiin kohdistuvia pakkovoimia, on ansaan käyttöaste ollut enintään 50 %.

Eristepaksuuden kasvaminen muuttaa kaikkien tarkasteltujen seinätyyppien ikkuna- ja oviliitoksen rakennetta. Nykyisen apukarmirakenteen käyttö vaikeutuu, joten karmikenkäinnitys tulee mahdolliseksi vaihtoehdoksi. Tällöin saadaan ikkunaliitoksen kylmäsiltaa osaltaan vähennettyä. Suuri eristepaksuus muuttaa sandwich- elementin nostojärjestelmää. Nostojärjestelmä muuttuu sandwich- nostolenkin aiheuttaman kylmäsilan ja valmistustekniikan vaikeuksien vuoksi joko 2-pistenostoon elementin sisäkuoresta tai 4-pistenostoon elementin sisä- ja ulkokuoresta.

Suuri eristepaksuus aiheuttaa muutoksia tarkasteltavien seinärakennetyyppien elementtien väliseen nurkkaliitokseen. Merkittävimmät muutokset tapahtuvat sandwich- ja eristerapatun elementin nurkkaliitoksessa. Sandwich- elementtien nykyisen nurkkaliitoksen ulokeosan pituus kasvaa lähes kaksinkertaiseksi, jolloin elementin ulkokuoren muodonmuutos kasvaa liitoksen kohdalla. Pitkä ulokeosa vaikeuttaa myös elementin kuljettamista ja asentamista, jolloin elementtiin voi aiheutua vaurioita. Ulokeosan nykyistä vahvempi rauditus tai erillisen ulkokuorikulmaelementin valmistaminen voi olla ratkaisu ongelmaan. Kulmaelementtiä käytettäessä elementtien saumojen määrää lisääntyy julkisivussa ja elementin ripustuspisteet sisäkuoresta muodostuvat melko kauaksi nurkasta. Ohuteristerapatuissa seinärakenteissa muodostuu vaikeaksi nurkkaliitoksen valmistaminen, koska eristeen ulokeosa on liian pitkä ja herkkä vaurioitumaan elementin siirtojen aikana. Tämän vuoksi nurkkaliitoksen lämmöneristäminen ja rappaaminen on mahdollista vain työmaalla seinäelementtien asentamisen jälkeen.

Eristepaksuuden kasvaminen tulee aiheuttamaan muutoksia elementtien valmistus- ja kuljetustekniikkaan. Varsinkin sandwich- ja eristerapatujen elementtien valmistustekniikan osalta työ- ja materiaalipanokset kasvavat muotti- ja lämmöneristystyössä. Kasvava materiaalimenekki lisää tehtaalla tarvittavien siirtojen määrää ja varastointitilantarvetta. Eristepaksuuden kasvaessa elementtien kuljetettava neliömäärä voi vähentyä kuljetuskaluston lavatilavuuden loppuessa jopa puolella. Tämän vuoksi kuljetuskalustoa on kehitettävä paksumpien elementtien kuljettamiseen esimerkiksi kampapukkia käyttäen.



Seinäelementin valmistuskustannuksissa muovipohjaiset eristeet ovat mineraalivillaa kal-  
liimpia. Muotti- ja kuljetuskustannuksien myötä eristemateriaalien väliset hintaerot ta-  
soittuvat, koska muovipohjaisia eristeitä käyttäen päästään ohuempisiin rakennepaksuuk-  
siin.

Elementtien valmistus- ja kuljetuskustannukset tulevat kokonaisuutena nousemaan sel-  
västi lämmöneristävyuden kasvaessa. On kuitenkin huomattava, että asuinkerrostalon  
julkisivuelementtien kustannus on keskimäärin vain 5 % talon rakennuskustannuksista,  
joten julkisivuelementtien hinnan nousun merkitys on hyvin vähäinen, jos sillä voidaan  
talon loppukäyttäjälle aiheuttaa selvää hyötyä.

Kokonaisuutena betoniset sandwich-, eriytetyt ja eristerapatut julkisivuelementit soveltu-  
vat matalaenergiarakentamiseen. Kaikissa tarkastelluissa seinäelementtityypeissä on kui-  
tenkin matalaenergiarakentamiseen soveltuvana sekä hyviä että huonoja puolia. Eriyte-  
tyssä ja eristerapatussa seinärakenteessa tapahtuvat muutokset ovat suhteellisesti vähäi-  
sempiä kuin sandwich- rakenteessa. Sandwich- rakenteen kylmäsiltoja tulee saada vä-  
hennettyä nykyisestä. Tällöin on tehtävä FEM- laskentamallilla käytännön mitoitusta tar-  
kempi määrittäminen diagonaaliensaaseen kohdistuvista voimista harvemmallalla ansasvälillä ja  
paksummalla eristeellä. Kuorien välistä yhteistoimintaa harvemmallalla ansasvälillä tulee  
myös selvittää. Eristepaksuuden kasvamisesta aiheutuvien lämpövirtausten vähentymisen  
vuoksi on suositeltavaa selvittää seinän kosteusteknistä käyttäytymistä erityisesti sand-  
wich- ja eristerapatun seinärakenteen osalta. Suomessa on äänitekniistä tutkimustietoa  
yleisesti vähän muovipohjaisista eristeistä, lähinnä polyuretaanista. On suositeltavaa sel-  
vittää polyuretaanin äänitekniisiä ominaisuuksia, jotta ei muodostuisi ongelmia varsin-  
kaan ohuilla eristepaksuuksilla. Julkisivuelementin rakenteellisen ja rakennusfysikaalisen  
toiminnan muuttuessa eristepaksuuden kasvaessa on myös tarvetta tutkia betonisen ulko-  
seinärakenteen elinkaaritaloutta huomioiden tulevaisuuden energiahinnat.

## 10. Lähdeluettelo

### Normit ja viranomaismääräykset

1. Suomen Betoniyhdistys ry.2004 Betoninormit 2004 by50. Suomen Betonitieto Oy, Helsinki 263 s. ISBN 952-5075-60-5.
2. Ympäristöministeriö 2005, Asunto ja rakennusosasto. Suomen rakentamismääräyskoelma, osa B4; Betonirakenteet, ohjeet , 83 s.
3. Ympäristöministeriö 1998, Asunto ja rakennusosasto. Suomen rakentamismääräyskoelma, osa C1; Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa, määräykset ja ohjeet 1998, 9 s.
4. Ympäristöministeriö 1998, Asunto ja rakennusosasto. Suomen rakentamismääräyskoelma, osa C2; Kosteus, määräykset ja ohjeet, 16 s.
5. Ympäristöministeriö 2007, Asunto ja rakennusosasto. Suomen rakentamismääräyskoelma, osa C3; Rakennuksen lämmöneristys, määräykset 2007, 7 s.
6. Ympäristöministeriö 2003, Asunto ja rakennusosasto. Suomen rakentamismääräyskoelma, osa C4; Rakennuksen lämmöneristys, ohjeet, 24 s.
7. Ympäristöministeriö 2002, Asunto ja rakennusosasto. Suomen rakentamismääräyskoelma, osa E1; Rakennuksen paloturvallisuus, määräykset ja ohjeet, 40 s.

### Kirjat ja julkaisut

8. Aho H et al. 2006, Paloturvallinen rakentaminen EPS- eristeillä, julkaisu 134, 2. painos, Tampereen teknillinen yliopisto Rakennetekniikan laitos, Tampere, 106 s. ISBN 952-15-1615-1
9. Betonikeskus r.y.2003, Betonielementtien nostolenkit ja -ankkurit. Suomen Betonitieto Oy, Helsinki,. 37 s. ISBN 952-5075-52-4.
10. Betonikeskus r.y. 2003, Betonielementtien toleranssit, Suomen Betonitieto Oy, Helsinki, 31 s. ISBN 952-5075-53-2
11. Hemmilä K. et al.2008, Puu- ja puu-alumiini-ikkunat sekä niiden asennus, RT-kortti 41-10644x, ohjetiedosto, Rakennustieto Oy, Helsinki, 23 s.
12. Karvinen S. 2005, Ulkoseinien sisäkuorielementtitekniikka ja kehitystarpeet. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja ympäristötekniikan osasto, talonrakennustekniikka, Espoo, 123 s.

13. Korpi M. et al. 2007, Pientalojen ja kerrostaloasuntojen ilmanpitävyys, Tampereen teknillinen yliopisto, Teknillinen korkeakoulu, Tiivistelmä (saatavissa [www.tut.fi](http://www.tut.fi) 27.05.2008)
14. Lehtinen T. et al.1997, Betonisandwich- ulkoseinien kosteustekninen käyttäytyminen, julkaisu 70, Teknillinen korkeakoulu talonrakennustekniikan laboratorio, Espoo, 65 s. ISBN 951-22-3914-0
15. Lydman M. 1990, Betonisandwich- elementin muodonmuutokset. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, talonrakennustekniikka, Espoo, 129s.
16. Nieminen J. et al. 2008, Passiivitalo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Espoo, 42 s., julkaisematon
17. Olin J. et al.1981, Betonisten ulkoseinäelementtien lämpötaloudellinen ja rakenteellinen kehittäminen, Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Espoo, 170s. ISBN 951-38-1325-8
18. Precast/Prestressed Concrete Institute 1990, Architectural precast concrete, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, 339 s. ISBN 0-937040-42-8
19. Rakennustuoteteollisuus RTT r.y.1998, Betonijulkisivujen materiaali- ja valmistustekniikka (Julkisivu 2000 -julkaisut). Suomen Betonitieto Oy, Helsinki, 96 s. ISBN 952-5075-12-3.
20. Rakennustuoteteollisuus RTT r.y. 1998,. Uudet betonijulkisivurakenteet (Julkisivu 2000 julkaisut), Suomen Betonitieto Oy, Helsinki, 171 s. ISBN 952-5075-13-3.
21. Rakennustuoteteollisuus RTT r.y. 1998 Yhdistelmä julkisivut (Julkisivu 2000 -julkaisut), Suomen Betonitieto Oy, Helsinki, 171 s. ISBN 952-5075-11-7.
22. Ratvio J. 1998, Eriytetyn julkisivun suunnitteluperusteita, Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Espoo, 37 s. ISBN 951-38-5292-X
23. Salonvaara M. et al.2003, Betonirakenteiden tuuletus ja lämmöneristävyys, VTT tiedotteita 2210, Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Espoo, 58 s. ISBN 951-38-6169-4
24. Suomen Betoniteollisuuden Keskusjärjestö 1990, Runko-BES, julkaisu 10 Seinäelementit, 27 s
25. Suomen Betoniyhdistys r.y. 1995, By 203 Betonirakenteiden perusteet, Suomen Betonitieto Oy, Helsinki, 273 s. ISBN 951-9365-94-X
26. Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004, BY 201, Betonitekniikan oppikirja 2004 5.painos, Suomen Betonitieto Oy, Helsinki, 520 s. ISBN 952-5075-61-3

27. Viinikainen S. et al. 2007, Energy Use-Visions and Technology Opportunities for Finland, Edita Prima, Helsinki, Tiivistelmä (saatavissa [www.vtt.fi](http://www.vtt.fi), 27.05.2008)
28. Ympäristöministeriö 2003, Ympäristöopas 39, Rakennusten paloturvallisuus & paloturvallisuus korjausrakentamisessa, Edita Prima Oy, Helsinki, 165 s. ISBN 952-11-1375-8
29. Ympäristöministeriö 2003, Ympäristöopas 108, Rakennuksen julkisivun ääneneristävyyden mitoittaminen, Edita Prima Oy, Helsinki, 37 s. ISBN 952-11-1507-6.

## **Haastattelut**

30. Finnfoam Oy, Nieminen Henri
31. Halfen-Deha Ab, Olin Juhani, Sulasalmi Seppo
32. Ins.tsto Heikki Helimäki Oy, Helimäki Heikki (puhelinhaastattelu)
33. Paroc Oy Ab, Sevón Jukka
34. Peikko Finland Oy, Kinnunen Jorma, Leinonen Taru, Lehtinen Raimo
35. Pintos Oy, Nummela Mikko, Nurmi Kari, Pere Tuomas
36. Rakennuspolyuretaaniteollisuus ry, Pullola Jaana
37. Rakennusteollisuus RT ry, Luhanka Juha
38. Saint-Gobain Rakennustuotteet Oy, Kemppainen Harri
39. Semtu Oy, Määttä Lassi, Lääkkö Antti
40. SPU-Systems Oy, Kurikka Jussi
41. Suutarinen yhtiöt, Vilve Janne
42. Thermisol Oy, Kilpeläinen Tapio

## **Internet**

43. [akseli.tekes.fi](http://akseli.tekes.fi),
44. [www.anstar.fi](http://www.anstar.fi)
45. [www.betoni.com](http://www.betoni.com)
46. [www.emeraldinsight.com](http://www.emeraldinsight.com)
47. [www.finnfoam.fi](http://www.finnfoam.fi)
48. [www.glacierbay.com](http://www.glacierbay.com)
49. [www.halfen-deha.fi](http://www.halfen-deha.fi)
50. [www.isover.fi](http://www.isover.fi)
51. [www.julkisivuyhdistys.fi](http://www.julkisivuyhdistys.fi)

52. [www.microthermgroup.com](http://www.microthermgroup.com)
53. [www.paroc.com](http://www.paroc.com)
54. [www.peikko.fi](http://www.peikko.fi)
55. [www.pfeifer.de](http://www.pfeifer.de)
56. [www.pintos.fi](http://www.pintos.fi)
57. [www.semtu.fi](http://www.semtu.fi)
58. [www.spu.fi](http://www.spu.fi)
59. [www.thermisol.fi](http://www.thermisol.fi)
60. [www.vacuuminsulation.co.uk](http://www.vacuuminsulation.co.uk)
61. [www.wienerberger.fi](http://www.wienerberger.fi)