

Väinö Juntunen

# **BETONISANDWICH-ELEMENTIN LÄMMÖNERISTYSVAIHTOEHDOT**

Kandidaatintutkielma  
Rakennetun ympäristön tiedekunta

4/2020

# TIIVISTELMÄ

Juntunen, Väinö: Betonisandwich-elementin lämmöneristysvaihtoehdot  
Kandidaatintutkielma  
Tampereen yliopisto  
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma  
1/2020

---

Tässä kandidaatintutkielmassa kartoitetaan yleisimpiä betonisandwich-elementtien lämmöneristysmateriaaleja Suomessa ja vertaillaan niiden ominaisuuksia. Tutkielmassa pyritään myös määrittämään tehokas menettelytapa sopivan eristemateriaalin valinnalle rakennesuunnittelijan näkökulmasta. Menetelmän määrittämisessä analysoidaan mahdollisimman monta elementin laatuun vaikuttavaa parametria sekä niiden keskinäistä hierarkiaa. Tämän lisäksi tutkielmassa huomioidaan eristys- ja elementtivaihtoehtojen kustannusvaikutukset suhteuttamalla ne elementtien lämmöneristyskykyyn. Tutkimus on rajoitettu koskemaan eristeratkaisuiden vertailua ainoastaan uudisrakennuksen näkökulmasta.

Lämmöneristysvaihtoehtojen vertailussa otetaan huomioon eri elementtirakenteiden rakennusfysikaaliset ominaisuudet sekä niiden kustannustehokkuus. Lämmöneristeiden toimintaan vaikuttavista suureista tässä tutkielmassa tarkastellaan rakenneratkaisujen lämmönläpäisykykyä, kosteusteknistä toimivuutta, palonkestävyyttä, ääneneristävyyttä sekä mekaanista kantavuutta. Kustannustehokkuuden tarkastelu on toteutettu vertaamalla rakennetyyppien U-arvoja elementtien neliöhintaan. Kandidaatintutkielmassa käsitellään myös betonielementtien suunnittelua sen nykyisessä toteutusmuodossaan ja menettelytapaa, jolla suunniteltavaan elementtirakenteeseen valitaan rakennuskohteen kannalta optimaalisin lämmöneristys.

Betonisandwich -elementin lämmöneristemateriaalin valintaa ja mitoitusta ohjaavat materiaalin vaikutus elementin kokonaishintaan sekä useat rakennefysikaaliset ominaisuudet. Tärkein näistä ominaisuuksista on materiaalin lämmöneristyskyky. Useimmissa kohteissa mineraalivilla on alhaisten kustannustensa ja hyvän palonkestonsa takia toimivin eristevalinta. Muovipohjaisille eristeille kuitenkin löytyy käyttökohteita, joissa ne toimivat villaeristeitä paremmin etenkin kosteudeneristyskykynsä takia, ja joissa niiden käyttö johtaa kokonaiskustannuksiltaan edullisempiin ratkaisuihin.

Tutkimus on toteutettu kirjallisuuskatsauksena ja sen perustana ovat toimineet elementtisuunnittelua ohjaavat kansalliset ja kansainväliset säädökset ja normit. Tutkielma on tehty yhteistyössä Sweco Rakennetekniikka Oy:n kanssa.

# ABSTRACT

Juntunen, Väinö: Thermal insulation of concrete sandwich element  
Bachelor's thesis  
Tampere University  
Civil engineering  
1/2020

---

The purpose of this bachelor's thesis is to define most commonly used thermal insulation solutions used in concrete sandwich elements in Finland and to compare properties of insulating materials. The purpose is also to define an effective method of choosing an effective insulating material from structural designer's point of view. The method is determined by analyzing as many attributes effecting the elements quality as possible and also by analyzing the hierarchy of these attributes. The thesis also takes the cost of insulating materials into account by comparing it to the elements heat insulating capacity. The thesis is restricted to only comparing different insulation solutions from new construction's standpoint.

The comparison of insulating materials is done by reviewing different physical properties and cost-effectiveness of element structures. The thesis analyzes insulating materials' thermal transmittance, ability to withstand humidity and fire, soundproofing capabilities and mechanical tenacity. Analysis of cost-effectiveness is done by comparing U-values of the elements to element's price per square meter. This bachelor's thesis also goes through structural designing of elements in it's current state and the process of choosing an optimal insulating material.

The design process of concrete sandwich element is guided by the total cost effect of the insulating material along with various physical properites. The most important of these properties is the material's thermal transmittance. Because of it's low cost and ability to withstand fire, mineral wool is usually the most suitable material for most elements. However, plastic based insulating materials fit better for certain elements because of their ability to insulate humidity.

This study has been carried out as a literature research and it's based on national and international standards and norms. The thesis has been produced in collaboration with Sweco Rakennetekniikka Oy.

# ALKUSANAT

Tämä kandidaatintutkielma on yhteistyössä Sweco Rakennetekniikka Oy:n kanssa tehty selvitys betonisandwich -elementtien lämmöneristysvaihtoehdoista. Esitän kiitokseni työn valvojalle Toni Pakkalalle Tampereen Yliopistosta sekä Sweco Rakennetekniikka Oy:n puolelta työn ohjaamiseen osallistuneille Juha Kukkoselle, Emma Skantzille, Heini Pönnille ja Kimmo Fabrinille.

Tampereella 15.6.2020

Väinö Juntunen

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. BETONISANDWICH-ELEMENTTI .....	3
3. SANDWICH-ELEMENTIN LÄMMÖNERISTYS .....	5
3.1 LÄMMÖNERISTYSVAIHTOEHDOT .....	5
3.2 LÄMMÖNJOHTAVUUS.....	6
3.3 KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA.....	7
3.4 PALONKESTÄVYYS.....	8
3.5 ÄÄNENERISTÄVYYS .....	9
3.6 VAIKUTUS RADIOAALTOIHIN .....	5
3.7 MEKAANISET OMINAISUUDET .....	9
3.8 KUSTANNUSTEHOKKUUS.....	10
4. ERISTEEN VALINTAMENETTELY .....	13
5. YHTEENVETO.....	14
LÄHTEET.....	

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

$\lambda$	lämmönjohtavuus
dB	äänenvoimakkuuden dimensioton yksikkö
R	lämmönvastus
U-arvo	lämmönläpäisykerroin

# 1. JOHDANTO

Rakennesuunnittelun kaikilla osa-alueilla suunnittelijan ensisijaisia tavoitteita ovat rakenteiden toimintavarmuus, pitkäikäisyys ja kustannustehokkuus. Tämän lisäksi kiihtyvä ilmastokeskustelu ja ympäristöarvot korostavat rakenteiden energiatehokkuuden merkitystä ja ohjaavat suunnittelijoita hukkamateriaalin minimointiin. Elementtirakentamisessa oikean lämmöneristysvaihtoehdon valinnalla on suuri merkitys toimivan ja energiatehokkaan kokonaisuuden suunnitteluprosessissa.

Sandwich-elementit ovat kolmen rakennekerroksen muodostamia rakennuskomponentteja, joita hyödynnetään erityisesti jäykkää, mutta kevyttä rakennusosaa vaativissa kohteissa. Betonisandwich-elementtien toiminta perustuu tiheydeltään pieneen, lämmöneristeenä toimivaan ytimeen ja sen kummallakin puolella oleviin betonikuoriin. Nämä kuoret on sidottu toisiinsa lämmöneristeen läpäisevillä kiinnittimillä, jotka puristavat lämmöneristeen betonilevyjen väliin.

Suomessa betonisandwich-elementtejä on käytetty rakentamisessa 1960-luvulta alkaen. Rakentamista ohjaavien tiukentuvien säädösten ja kehittyvän tekniikan myötä elementtirakentamisen laatu ja tehokkuus ovat parantuneet nopeasti, ja nykyään elementtirakentaminen on rakennusalan tärkeimpiä osa-alueita. Yleisin betonisandwich -elementin käyttökohde on toimia rakennuksen ulkoseinärakenteena.

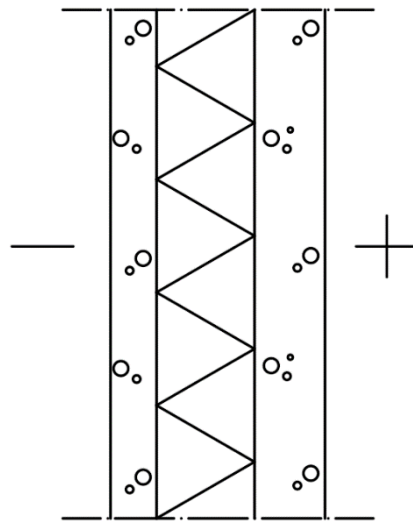
Pääasiallisesti käytetyin betonisandwich-elementin lämmöneriste on uritettu ja urasuojattu mineraalivilla etenkin asennuksen helppouden ja hyvän palonkestävyyden takia. Toisaalta maanvastaisiin sandwich-rakenteisiin valitaan monesti EPS- tai polyuretaanieristekerros niiden paremman vedeneristävyuden ja puristuslujuuden vuoksi. Niiden käyttöä kuitenkin rajoittavat palonkestävyyttä käsittelevät määräykset.

Tämän työn tarkoituksena on toimia selvityksenä käytössä olevista betonisandwich-elementtien lämmöneristevaihtoehdoista, vertailla niiden eri ominaisuuksia ja pyrkiä kuvaamaan menettelytapaa toimivan lämmöneristysvaihtoehdon valitsemiseksi. Tutkimuksessa on tarkasteltu lämmöneristeeltään erilaisten elementtien U-arvoja, kosteusteknistä

toimivuutta, palonkestävyyttä, ääneneristävyyttä sekä mekaanista kantavuutta. Tutkimuksessa on käsitelty myös lämmöneristevalinnan vaikutusta elementin kustannuksiin ja pyritty löytämään valintaperiaatteet kustannustehokkaalle rakenteelle.

## 2. BETONISANDWICH-ELEMENTTI

Betonisandwich-elementillä tarkoitetaan tehdasvalmistettua kerrosrakennetta, joka koostuu kahdesta kuorena toimivasta betonilevystä ja niiden välissä olevasta lämmöneristeestä. Rakenteen toimivuus perustuu betonin kykyyn kantaa mekaanisia kuormia ja tiheydeltään pienen ytimen kykyyn toimia lämmöneristävänä kerroksena.



**Kuva 1:** Betonisandwich-rakenteen poikkileikkaus.

Mikäli sandwich rakenne on kantava, toimii sen sisäkuori yleensä kantavana rakenteena, johon puristus ja taivutus pääasiassa kohdistuvat. Suutarisen (2008, s. 14) mukaan Suomessa ulkokuoren tyypillinen paksuus on 70-85 mm, johon vaikuttavat olennaisesti valittu pintamateriaali ja -käsittely sekä valinta ruostumattoman ja ruostuvan raudoituksen välillä. Sisäkuoren paksuus on puolestaan välillä 80-150 mm riippuen siitä, onko elementti kantava vai ei. Kantavan sisäkuoren paksuudessa tulee huomioida vaatimus holvin tukipinnalle sekä elementtilaattaholveissa saumaraudoituksen ja itse sauman vaatima tilantarve.

Betonikuoret on liitetty toisiinsa ansailla eli sideraudoituksella, jonka tehtävänä on ulkokuoren kannattaminen sekä tapauskohtaisesti esimerkiksi tuulikuorman tai maanpaineen siirtäminen ulkokuorelta sisäkuorelle. Rakenteen tuuletus toteutetaan tarvittaessa eristerakroksen tuuletusurituksella. Suutarisen (2008, s. 25) mukaan lämmöneristerakroksessa ei käytetä erillistä tuulensuojaa, koska tiiviit betonikuoret estävät haitalliset virtaukset kuorien välillä riittävän tehokkaasti.

Suutarisen (2008, s. 23) mukaan rakennusfysikaalisesta näkökulmasta sandwich-rakenteiden suurin kosteusrasitus tapahtuu rakennusvaiheessa. Tämän lisäksi betonimassan sisältämä vesi ja sen kuivuminen aiheuttavat elementeille merkittävää kosteusrasitusta. Rakennusvaiheen aikaisia epätoivottavia kosteusrasituksia elementteihin ovat Lahdensivu et al. mukaan (2012, s. 11) mm. tasoilta eristetilaan runkovaiheessa valuva vesi, vuotovedet sekä erilaiset märät työvaiheet kuten tasoitustyöt ja märkätilojen pintalattioiden valaminen.

Alan kirjallisuuden mukaan käyttövaiheen aikana rakenteeseen muodostuu kosteutta diffuusion ja konvektion vaikutuksesta. Tämä kosteusrasitus on kuitenkin selkeästi rakennusaikaista rasitusta pienempi, ja rakenne pääsee kuivumaan tuuletusurituksen kautta sekä ympäristön lämpötilan nousun myötä suhteellisen kosteuden alentuessa. (Suutarinen 2008)

Betonisandwich-elementin lämmöneristyskyvyn muodostavat pääasiassa eristekerroksen paksuus, eristeen lämmönjohtavuus, eristeen urituksen koko, vesihöyryn läpäisevyyskyky, kuorien kiinnitys toisiinsa sekä rakenteen virheettömyys. Suutarisen (2008, s. 25) mukaan betonin lämmönjohtavuus on noin  $1,7 \text{ W/(mK)}$  ja Kiannan mukaan (2017, s. 35) tyypillisten sandwich-rakenteissa käytettyjen lämmöneristeiden noin  $0,020\text{--}0,039 \text{ W/(mK)}$ . Sandwich-rakenteen lämmöneristyskyvyn voidaan siis katsoa määräytyvän kokonaan eristeen lämmönjohtavuuden ja paksuuden perusteella.

## 3. SANDWICH-ELEMENTIN LÄMMÖNERISTYS

Lämmöneristävyys on tärkein yksittäinen betonisandwich-elementin energiatehokkuuteen vaikuttava tekijä. Valittaessa suunniteltavaan sandwich-rakenteeseen lämmöneristysmateriaalia tulee huomioida suunnittelukohteen ominaisuuksien asettamat reunaehdot. Näitä ovat lämmöneristävyden lisäksi vaatimukset sandwich-rakenteen mekaaniselle kestävyydelle, ääneneristävyydelle sekä kosteuden- ja palonkestolle.

### 3.1 Lämmöneristysvaihtoehdot

Suomessa käytetyt materiaalit betonisandwich-elementtien lämmöneristeenä ovat uringattu mineraalivilla, XPS eli suulakepuristettu polystyreeni, EPS eli paisutettu polystyreeni sekä PIR- ja PUR-eristeet eli umpisoluiset polyuretaanimuovit. XPS-, EPS-, PIR- ja PUR-eristeistä voidaan käyttää yhteisnimityksiä ”muovipohjaiset eristeet” tai ”umpisoluiset eristeet”. Betonisandwich -elementeissä käytettäviä mineraalivilloja ovat kivi- ja lasivilla.

Suomessa käytetyimpiä eristysmateriaaleja betonisandwich -elementeissä ovat selkeästi mineraalivillat niiden helpon asennettavuuden, edullisen hinnan, paremman liikennemelun ääneneristävyuden ja hyvän palonkeston takia. (Suikka 2010) Suutarisen (2008, s. 41) XPS-eristeisiä sandwich-elementtien käyttö Suomessa on puolestaan vähäistä, ja tutkimustietoa niistä on saatavilla varsin vähän.

EPS- ja polyuretaanieristeet ovat mineraalivilloja tiiviimpiä ja niiden rakennusaikaisen kosteusrasituksen sietokyky on parempi kuin mineraalivilloilla. Tiiviytensä takia muovipohjaisilla eristeillä pienempi eristepaksuus riittää tarvittavan lämmöneristyskyvyn saavuttamiseksi, mikä vähentää esimerkiksi muottityön, ansastuksen ja kuljetuksen kustannuksia.

Mineraalivilla on toisiinsa sidonaineella sidotuista kuiduista muodostuva lämmöneriste, jonka kokonaistilavuudesta yli 95% koostuu kuitujen väliin jäävästä ilmasta, jonka suureen ominaislämpökapasiteettiin mineraalivilla lämmöneristyskyky perustuu. Betonisandwich-elementeissä käytetään tyypillisesti kovaa mineraalivillaa, jonka uritus on päällystetty lasikuituhuovalla.

EPS valmistetaan paisuttamalla polystyreenihelmiin pentaanikaasua, joka vaihtuu käytön aikana ilmaksi diffuusion vaikutuksesta. Näin saadaan aikaan rakenne, jossa suuren ominaislämpökapasiteetin omaavan ilman osuus on kokonaistilavuudesta noin 98%.

Sandwich-rakenteita varten valmistetun EPS-eristeen palonkestoa pyritään monesti parantamaan käyttämällä paisutusprosessissa erilaisia bromiyhdisteitä.

Myös polyuretaanieristeiden lämmöneristyskyky perustuu umpinaisien solujen sisällä seisovaan kaasuun, jonka lämmöneristys on moninkertaisesti ilmaa parempi. Polyuretaanilevyjä valmistetaan puristamalla polyuretaanimassaa kovassa paineessa pinnoitemateriaalien välissä, jonka jälkeen levyt leikataan haluttuihin mittoihin. Polyuretaanieristeet ovat kuitenkin elementissä käytetyistä eristeistä selkeästi materiaalikustannuksiltaan muita vaihtoehtoja kalliimpia. Polyuretaanieristeet vaativat myös diffuusiosuojakalvon säilyttääkseen lämmöneristyskykynsä. Vinhan et al. (2013 s. 235) mukaan yleisesti diffuusiosuojakalvona käytetty alumiinipaperi kuitenkin estää radiosignaalien kulkua rakenteen läpi ja voi näin ollen aiheuttaa ongelmia matkapuhelimien käytössä.

XPS valmistetaan suulakepuristamalla polystyreenimassaa niin, että eristeeseen muodostuu EPS-eristeen rakennettava vastaava hiilidioksidin täyttämä solurakenne. Solurakenteessa oleva hiilidioksidi korvautuu ilmalla käytön aikana.

Suutarisen (2008, s. 45) mukaan EPS- ja polyuretaanieristeitä käytettäessä sandwich-rakenteissa ei ole tarvetta tuuletusuritukselle toisin kuin mineraalivillaa käytettäessä, koska umpisoluihin eristemateriaalien kosteustekninen toiminta ei edellytä sitä ja palonkesto heikkenee urituksen myötä.

## 3.2 Lämmönjohtavuus

Betonisandwich-elementtien lämmöneristevaihtoehtojen vertailussa materiaalien lämmönjohtavuus on niiden rakennusfysikaalisen toiminnan kannalta tärkein yksittäinen ominaisuus. Lämmönjohtavuus ilmaisee rakenteen lämmönläpäisytehon eristekerroksen paksuusyksikköä kohti.

Betonisandwich -elementeissä käytettävien eristeiden lämmönjohtavuudeksi Kiannan (2017, s. 35) esittämiä arvoja on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1.** Eistemateriaalien lämmönjohtavuudet.

Materiaali	Tuotenimi	Lämmönjohtavuus (W/mK)
Lasivilla	Isover KL37	0,037
Kivivilla	Parox eXtra	0,036
EPS	ThermiSol EPS 60S Laattia	0,039
EPS	ThermiSol EPS 100S Laattia	0,036
EPS	ThermiSol Platina Laattia	0,031
XPS	BEWi XPS 300	0,034
Polyuretaani	Kingspan Therma TP10	0,022

Eristemateriaalin lämmönjohtavuutta käytetään laskennallisesti hyväksi, kun lasketaan koko elementin U-arvo eli sen lämmönläpäisykerrointa. Pienempi U-arvo tarkoittaa parempaa lämmöneristyskykyä. Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C3 kohta 3.2 määrittelee U-arvojen enimmäisarvot eri rakenneosille. Näistä huomionarvoisimmat betonisandwich-elementtien mitoituksessa ovat ulkoseinän U-arvot, jotka lasketaan materiaalikerrosten paksuuksien ja lämmönjohtavuuksien avulla. Ympäristöministeriön asetuksen 1010/2017 mukaan lämpimäksi luokiteltavaan sisätilaan rajoittuvien ulkoseinien suurin sallittu U-arvo on 0,17 W/(m<sup>2</sup>K). Puolilämpimän tilan seinälle puolestaan käytetään vertailuarvoa 0,26 W/(m<sup>2</sup>K).

Taulukon 1. arvoista nähdään, että muovipohjaiset eristeet johtavat lämpöä huonommin kuin mineraalivillat. Selkeästi paras lämmöneristyskyky on polyuretaanieristeillä.

Rakenteen U-arvo lasketaan kaavalla

$$U = 1 / R_T,$$

missä  $R_T$  on rakenteen pintojen välinen kokonaislämmönvastus. Kokonaislämmönvastus lasketaan kaavalla

$$R_T = R_{si} + \sum R_i + R_{se},$$

missä  $R_i = d / \lambda_i$ ,  $i = 1 \dots m$

$d$  = rakenteen  $i$  ainekerroksen paksuus

$\lambda_i$  = ainekerroksen  $i$  lämmönjohtavuus

$R_{si}$  = rakenteen sisäpuolinen lämmönvastus

$R_{se}$  = rakenteen ulkopuolinen lämmönvastus

$\sum R_i$  = rakenteen rakennekerrosten kokonaislämmönvastus

Rakenteen sisäpuolisena lämmönvastuksena käytetään arvoa 0,13 m<sup>2</sup>K/W ja ulkopuolisena lämmönvastuksena arvoa 0,04 m<sup>2</sup>K/W. Laskutavan lähtöoletuksina ovat riittävän tasapaksut ja homogeeniset ainekerrokset sekä lämmön siirtyminen ainekerrokseen nähden kohtisuorassa. Esimerkiksi sandwich-elementtien lämmöneristekerroksen läpi kulkevat ansaat aiheuttavat poikkeamaa laskennallisesti saaduista arvoista. Tällaiset tyyppilliset rakenteessa toistuvat kylmäsiljat huomioidaan lisäämällä rakenteiden U-arvovaatimusta kylmäsiltojen aiheuttaman vaatimuksen verran.

### 3.3 Kosteustekninen toiminta

Yleisimmät ulkoseinään kohdistuvat kosteusrasitukset ovat seinälle satavat vesi ja lumi, sisä- ja ulkoilman kosteus, rakennuskosteus sekä rakennuksen käytöstä aiheutuva kosteusrasitus. Ormiskankaan (2009, s. 18) mukaan kosteusrasituksen muodostavista tekijöistä merkittävimpiä ovat viistosade, sisäilman kosteus ja rakennuskosteus. Paikallisesti varsinkin seinän alimpiin osiin voi kohdistua kosteusrasitusta myös pohjavedestä, pintavesistä, roiske- ja vuotovesistä sekä maaperän kosteudesta. Ormiskangas (2009, s. 18) toteaa myös, että rakenteen kosteustekniseen toimintaan vaikuttavia tekijöitä ovat mm. tuuli, lämpötilat rakenteen eri puolilla, auringon säteily, painovoima sekä rakenteen yli vaikuttavat paine-erot.

Kasvavien U-arvovaatimusten myötä myös betonisandwich -julkisivujen eristepaksuudet kasvavat. Paksumpi eristekerros kuivuu hitaammin, mikä tulee huomioida erityisesti käytettäessä muovipohjaisia eristemateriaaleja, koska eristeen tiivyyden takia rakenne pääsee kuivumaan ainoastaan rakennuksen sisäilmaan. Rakenteiden kuivumisajalla on myös merkittävä vaikutus rakennushankkeiden aikataulunhallintaan ja samalla myös rakennuskustannuksiin. Rakenteille tulee varata riittävästi kuivumisaikaa mekaanisten ominaisuuksien varmistamiseksi, ja esimerkiksi pinnoitetöitä ei voida aloittaa ennen kuin rakenne on ehtinyt kuivua riittävästi. (Lahdensivu et al. 2012, s. 12, 39)

Kerrosrakenteissa määrääväksi tekijäksi muodostuu usein diffuusion ja konvektion aiheuttaman kosteusrasituksen hallinta. Sandwich-rakenteen kosteustekniset ominaisuudet määräytyvät käytettyjen eristeiden vesihöyryn läpäisevyyden mukaan. Mineraalivillat ovat selkeästi muita eristevaihtoehtoja alttiimpia vesihöyryn imeytymiselle rakenteeseen johtuen niiden kuitumaisesta rakenteesta. Tämän takia elementtien kuivuminen tulee varmistaa mineraalivillallaan tehtävällä tuuletusurituksella, jolla kostea ilma kuljetetaan tulo- ja poistoilma-aukoille. Muovipohjaisilla eristemateriaaleilla solurakenne muodostaa tehokkaan vesihöyryn kulkeutumisen estävän suljetun rakenteen, minkä vuoksi ne eivät vaadi erillistä tuuletusuritusta. (Suutarinen 2008, s. 23)

Betonisandwich -elementeissä käytettävien eristeiden vesihöyrynläpäisevyyksien Suutarisen (2008, s. 47) esittämiä arvoja on esitetty taulukossa 2.

**Taulukko 2.** Eristemateriaalien vesihöyrynläpäisevydet.

Eriste	Vesihöyrynläpäisevyys (*10 <sup>-12</sup> kg/msPa)
Lasivilla	150
Kivivilla	150
EPS	3-7
XPS	1,5
Polyuretaani	0,1-1,2

Taulukossa 2 esitetyistä arvoista nähdään, että muovipohjaisten lämmöneristeiden vesihöyrynläpäisevyys on jopa tuhatkertaisesti mineraalivillojen vesihöyrynläpäisevyyttä pienempi.

### 3.4 Palonkestävyys

Rakennuksen paloluokka määrittää betonisandwich-elementeissä käytettävän eristeen paloluokituksen. Sandwich-elementit ovat tiiviitä rakenteita, joten niissä voidaan tapauskohtaisesti käyttää palavia lämmöneristeitä. Palotekniset vaatimukset lämmöneristemateriaaleille määräytyvät rakennuskohteen kerrosluvun sekä aukko- ja liitosdetaljien mukaan. Käytetyistä eristemateriaaleista mineraalivilloilla on parhaat palotekniset ominaisuudet, ja ne kuuluvat paloluokkaan A1 tai A2-s1, mikä tarkoittaa, että ne osallistuvat paloon erittäin rajoitetusti tai eivät ollenkaan. Palotekniset vaatimukset ovat usein betonisandwich -elementin suunnittelussa se tekijä, jonka takia muovipohjaisen eristeen sijaan valitaan mineraalivilla. (Suutarinen 2008, s. 26, 47-49)

Umpisoluiset eristemateriaalit puolestaan ovat selkeästi heikompia paloteknisiltä ominaisuuksiltaan. Ne kuuluvat eristelaadun mukaan paloluokkiin D tai E ja osallistuvat paloon paloluokituksen mukaan rajoitetusti tai hyväksytysti. Tämä edellyttää, että EPS- ja polyuretaanieristeitä käytettäessä palon leviäminen estetään rakennuksesta tai palo-osastosta toiseen rakenteellisesti käyttämällä palamattomasta materiaalista valmistettuja palokatkoja. (Suutarinen 2008, s. 26, 47-49)

Uusi rakennus suunnitellaan käyttäen paloluokkia P1, P2 ja P3, kun rakennusta ei suunnitella oleellisilta osin tai kokonaan käyttäen oletettuun palonkehitykseen perustuvaa menettelyä. Paloluokkaan P1 kuuluvien rakennusten kantavat rakenteet mitoitetaan kestämään palotilanne sortumatta, ja P1-luokan ulkoseinien tulee olla pääosin rakennettu vähintään A2-s1, d0 -luokan tarvikkeista. P2-paloluokkaan kuuluvien rakennusten palotekniset ominaisuudet ovat P1-luokan rakennuksia heikompia, ja riittävään paloturvallisuuden luokassa P2 voidaan päästä esimerkiksi rajoittamalla rakennuksen kokoa ja henki-

lömää. Yli 2-kerroksisen P2-paloluokkaan kuuluvan rakennuksen ulkoseinän lämmöneristeen tulee olla vähintään A2-s1, d0 -luokkaa. Paloluokan P3 rakennuksen kantaville rakenteille ei ole asetettu erityisvaatimuksia palonkeston suhteen, ja kyseisessä luokassa rakennuksen kokoa, ja henkilömäärää on rajoitettu voimakkaasti. (Ympäritöministeriö, 848/2017)

### 3.5 Ääneneristävyys

Betonisandwich-rakenteiden tehtävä on usein yläpuolisten rakenteiden kannattelun ja lämmöneristyksen lisäksi estää rakennuksen ulkopuolisen melun siirtyminen rakennuksen sisälle. Kyky estää haitallisen äänitason siirtymistä perustuu rakenteen massaun, ilmatiiivyyteen ja rakennekerrosten resonanssiin. Tyypiltään erilaiset eristeet vaimentavat paremmin äänen eri taajuuksia, mutta yleinen lähtökohta rakenteen ääneneristystä tarkasteltaessa on, että painava ja massiivinen rakenne eristää ääntä hyvin. Näin ollen sandwich-elementin kyky eristää ääntä perustuu pitkälti betonikuorten massaun, mutta eristemateriaalilla ja kuorten kiinnitystavalla on myös vaikutusta.

Ääntä eristävän rakenneosan kyky vaimentaa ääntä kasvaa sen massan kasvaessa, koska massa absorboi itseensä äänen energiaan. Betonisandwich-elementin ääneneristävyttä voidaan siis parantaa oikean eristevalinnan lisäksi kasvattamalla betonikuorien paksuutta ja siten massaa. Tämän vuoksi kantavilla betonisandwich -elementeillä ääneneristyskyky on niiden paksun sisäkuoren vuoksi parempi kuin ei-kantavilla elementeillä.

Suutarisen (2008, s. 26) mukaan elementtirakenteen ääneneristävydessä nähdään parannusta, kun seinäpuoliskojen eli betonikuorten välissä oleva materiaali on joustavaa ja betonikuoret ovat kauempana toisistaan. Tyypillisesti mineraalivillaeristeisten sandwich-rakenteiden kyky toimia ääntä eristävänä rakenteena on parempi kuin elementeillä, joissa käytetään umpisoluisia lämmöneristemateriaalia. Tämä johtuu mineraalivillan joustavuudesta verrattuna jäykempisiin muovipohjaisiin eristeisiin.

### 3.6 Vaikutus radioaaltoihin

Ilmastokeskustelun kiihdyttämä pyrkimys energiatehokkaampiin rakenteisiin on johtanut lämmöneristyskyvyltään parempien ulkoseinärakenteiden suunnitteluun ja käyttöön. Tämä on kuitenkin lisännyt metallisten rakennusosien ja pinnoitteiden käyttöä ulkoseinärakenteissa. Betonisandwich -rakenteiden eristemateriaaleista esimerkiksi polyuretaanin pinnalla käytetään yleisesti höyrynsulkuna alumiinipaperia. Metalliset rakennusosat häiritsevät rakenteiden läpi kulkevia langattoman viestinnän radiosignaaleja, joita käyttävien

matkaviestintälaitteiden merkitys kasvaa koko ajan. Radiosignaaleita hyödyntävät matkaviestintälaitteiden lisäksi myös esimerkiksi erilaiset taloautomaatiojärjestelmät. (Rakennustietosäätiö 2017, s. 1-3)

Radiosignaalien pääsy rakennukseen riippuu vähiten radiosignaalien kulkua rajoittavan rakenteen kautta. Radiosignaalien toiminta on siis heikkoa rakennuksissa, joiden koko ulkokuori sisältää radiosignaalien kulkua vaimentavia rakenteita. Tällaisia rakenteita ovat paksut kivi- ja betoniseinät sekä erityisesti metallipintaiset materiaalit. Radiosignaalien kuuluvuusongelmia voidaan ratkaista esimerkiksi kaapeloinnilla tehtävällä sisäantenniverkoilla, erilaisilla rakenneratkaisuilla kuten seinäelementtien optimaalisella sijoittelulla ja radiosignaaleja läpäisevillä aukoilla sekä betonisandwich -rakenteissa eristeen materiaalin muutoksella. Eristeen materiaalin muutoksen yhteydessä tulee kuitenkin huomioida mahdollinen vaikutus eristeen ja koko sandwich-rakenteen lämmöneristyskykyyn, minkä johdosta eristepaksuutta saatetaan joutua kasvattamaan. (Rakennustietosäätiö 2017, s. 2-3)

### **3.7 Mekaaniset ominaisuudet**

Lämmöneristeen lujuusominaisuudet vaikuttavat sen muodonmuutoskäyttäytymiseen, mikä edelleen vaikuttaa sandwich-elementin lopulliseen toimintakykyyn. Suurin yksittäinen lujuusominaisuuksiin vaikuttava tekijä on eristemateriaalin tiheys. Mineraalivillojen lujuusominaisuuksien kannalta myös kuitujen suunta ja koko ovat huomionarvoisia tekijöitä.

Mineraalivillat ovat selkeästi muovipohjaisia eristeitä kimmoisampia sekä puristus- ja vetolujuudeltaan heikompia. Pienen vetolujuuden takia villaeristeet vaativat tapauskohtaisesti kokonaisrakenteen lämmöneristystä heikentävän lamellirakenteen. Kuormitettuna mineraalivilla puristuu suuremmilla eristepaksuuksilla kokoon enemmän, ja tämä muodonmuutos tulee huomioida eristekerroksen paksuuden valinnassa. Mineraalivillaeristeet säilyttävät lujuusominaisuutensa lämpötilan noustessa, kun esimerkiksi EPS-eristeet menettävät lujuutensa nopeasti lämpötilan noustessa yli 80°C:n. (Suutarinen 2008, s. 47-48, 52)

EPS-eristeet ovat selkeästi mineraalivilloja lujempia. Tästä huolimatta ne puristuvat kokoon suhteellisen pienelle kuormitukselle altistettuna ja eivät palaudu takaisin alkuperäiseen muotoonsa. EPS-kerroksen paksuutta määritettäessä tulee myös ottaa huomioon materiaalin kutistuminen pentaanin korvautuessa sen solurakenteesta ilmalla. Yleensä

tästä huolehditaan yksinkertaisesti suorittamalla sandwich-elementin materiaalien kiinnitys toisiinsa vasta muodonmuutoksen tapahduttua. (Suutarinen 2008, s. 53)

### 3.8 Kustannustehokkuus

U-arvovaatimuksen ja muiden betonisandwich-rakenteen vaadittujen ominaisuuksien täyttämiseksi pyritään löytämään hinnaltaan mahdollisimman edullinen ratkaisu. Lämmöneristemateriaalin valinnan määrää useimmissa tapauksissa eristevalinnan kustannusvaikutus elementin kokonaishintaan. Taulukossa 3 on lueteltu Pentti et al. (2010, s. 5) esittämät eristepaksuudet, jotka täyttävät eri U-arvovaatimukset.

**Taulukko 3.** Eri U-arvovaatimukset täyttävät eristepaksuudet. (Pentti et al. 2010)

Eriste	$\lambda_{\text{design}}$	Ansastus	Eri U-arvovaatimukset täyttävät eristepaksuudet			
			2007	2010	Matalaenerergia	Passiivitalo
			0,24	0,17	0,14	0,09
Vaadittavat eristepaksuudet (mm)						
Mineraalivilla	0,037	diag. K600	160	230	280	430
EPS	0,036	diag. K600	150	220	260	410
		pistokas 4kpl/m <sup>2</sup>	150	210	260	410
	0,031	diag. K600	130	190	230	360
		pistokas 4kpl/m <sup>2</sup>	130	190	230	350
XPS	0,037	diag. K600	160	220	270	420
		pistokas 4kpl/m <sup>2</sup>	150	220	270	420
PUR/PIR	0,026	diag. K600	110	160	190	300
		pistokas 4kpl/m <sup>2</sup>	110	160	190	300
	0,023	diag. K600	100	140	170	270
		pistokas 4kpl/m <sup>2</sup>	100	140	170	270

Pelkkien lämmöneristemateriaalien keskinäisissä materiaalikustannuksissa on suuri vaihtelu, mutta niiden lisäksi kustannuksiin vaikuttavat mm. käytetyn ansastuksen tyyppi, tehtaalla suoritettujen siirtojen tarve ja siihen tarvittava nostokalusto sekä elementtien kuljetuskustannukset. Mineraalivilla on materiaalikustannuksiltaan selkeästi muovipohjaisia eristeitä edullisempaa. Johtuen sen suuremmasta eristepaksuusvaatimuksesta, sen käyttö kuitenkin aiheuttaa enemmän lisäkustannuksia kuin EPS-, XPS- ja PUR-eristeiden käyttö.

Paksumpien eristekerrosten käyttö vaatii suurempien valumuottien käyttämistä. Tämän lisäksi se kasvattaa tehtaalla tapahtuvien siirtojen määrää ja elementtien kuljetuksesta aiheutuvia kustannuksia. Suutarisen (2008, s. 113) mukaan edullisin eristeratkaisu tulee lisäkustannusten huomioidun jälkeen olemaan edelleen mineraalivilla EPS- ja XPS-eristeratkaisujen ollessa noin 20 % ja polyuretaaniratkaisujen noin 50 % kalliimpia. Taulukossa 4. on esitetty Suutarisen (2008, s.113) ilmoittamat betonisandwich -elementtien eristekustannukset ilman ansaiden materiaalihintoja. Seinärakenteen nykyinen U-arvolle

maksimiarvo Ympäristöministeriö RakMK C3 (2010) mukaan on 0,17. Suutarinen (2008) on käyttänyt laskelmissaan U-arvoa 0,16. Tarkastelemalla U-arvolla 0,16 saatuja tuloksia, voidaan verrata eri eristeratkaisujen kustannuseroja siinä eristepaksuusluokassa, jolla seinärakenteen lämmöneristysvaatimukset täyttyvät.

**Taulukko 4.** Sandwich-elementin eristekustannukset. Taulukossa ilmoitetut ne-liöhinnat sisältävät ansaiden ja lämmöneristeen asennuskustannukset sekä lämmöneristeen materiaalihinnan.

Betonisandwich, Sisäkuori 80mm, Ulkokuori 70mm					
U-arvo		0,24	0,16	0,14	0,10
Ansastus	Eristeratkaisu	€/m <sup>2</sup>	€/m <sup>2</sup>	€/m <sup>2</sup>	€/m <sup>2</sup>
diagonaali	vuorivilla	23	35	41	60
diagonaali	lasivilla	22	32	38	53
diagonaali	EPS	30	44	51	74
pistokas	EPS	30	42	47	67
diagonaali	XPS	30	40	49	69
pistokas	XPS	30	39	45	63
diagonaali	PUR	36	52	60	89
pistokas	PUR	36	49	57	82
	PUR 70mm ja min.villa		44	49	68
	PUR 90mm ja min.villa		47	52	71
	PUR 120mm ja min.villa		50	55	74
	PUR 160mm ja min.villa			60	77
	PUR 180mm ja min.villa				79

Suutarisen (2008, s. 114) mukaan kuljetuskustannukset voivat kuitenkin eristemateriaalista ja eristepaksuudesta riippuen kasvaa jopa 2-kertaiseksi. Tästä johtuen halvin eristevaihtoehto ei ole läheskään aina yksiselitteisesti mineraalivilla, vaan riippuu monista rakennuskohdekohtaisista tekijöistä. Suutarisen (2008, s.117) mukaan, Esimerkiksi asuinkerrostalon julkisivuelementtien osuus koko rakennushankkeen kustannuksista on vain keskimäärin 5 % luokkaa joten monesti betonisandwich-elementtien hinnan nousu paremman toiminnallisuuden saavuttamiseksi on perusteltua.

## 4. ERISTEEN VALINTAMENETTELY

Betonisandwich-rakenteen suunnittelussa rakennesuunnittelija pyrkii löytämään halutun toiminnallisuuden riittävällä varmuudella saavuttavan rakenteen, jonka kustannukset ovat mahdollisimman edulliset. Lämmöneristeen valinnassa määräävä materiaaliominaisuus on luonnollisesti usein ulkoseinärakenteena toimiville sandwich-rakenteille lämmöneristävyys. Tämän lisäksi suunnittelijan on varmistettava, että rakenne täyttää muut käyttökohteen asettamat erityisvaatimukset, kuten riittävän palonkeston, kosteudenkestävyyden ja ääneneristävyys.

Korkeampaa palonkestävyyttä vaativat kohteet edellyttävät lähes aina mineraalivillaeristeratkaisun käyttöä, koska muovipohjaiset eristeet ovat palavia materiaaleja. Mineraalivillan käyttö betonisandwich -elementin eristevaihtoehtona on myös selkeästi suotavampaa, kun elementin ääneneristävyydelle asetetaan korkeampia vaatimuksia. Yleisesti samat lämmöneristysvaatimukset saavutetaan pienemmillä kustannuksilla, jos elementin lämmöneristys järjestetään mineraalivillalla muovipohjaisen eristeratkaisun sijaan.

Muovipohjaiset eristeet ovat kuitenkin mineraalivilloja parempia lämmöneristävydeltään, tiiveydeltään ja kosteudenkestävyydeltään. Näin ollen niiden käyttö on suotavaa esimerkiksi maanvastaisissa rakenteissa. EPS-, XPS- ja polyuretaanieristeratkaisujen mekaaninen kestävyys on mineraalivilloja parempi, ja se voi puoltaa kovempien eristeiden käyttöä. Myös pienen tilavaatimuksen ollessa elementin ominaisuuksia määrittävä tekijä, päädytään usein valitsemaan mineraalivillan sijasta muovipohjainen eriste. Tämän lisäksi tiiviimpien eristeiden käyttö voi olla kustannustehokkaampaa joissakin tapauksissa edullisempien kuljetus-, muotti- ja nostokustannusten takia.

## 5. YHTEENVETO

Tutkimuksessa selvitettiin Suomessa käytössä olevien betonisandwich-elementtien lämmöneristysvaihtoehtoja ja niiden ominaisuuksia. Eristevaihtoehtojen rakennusfysikaalisia ja mekaanisia ominaisuuksia ja niiden vaikutuksia rakenteen toimintaan ja rakentamisen vaikutukseen kuvailtiin, jotta saataisiin muodostettua riittävän kattava pohja eristeen valintamenettelyyn elementtien suunnitteluprosessissa.

Luonnollisesti tärkein lämmöneristeen ominaisuus on kyky estää lämmön epäsuotuisaa kulkeutumista rakenteiden läpi, ja eristeen mitoitus perustetaan pitkälti lämmöneristävyyden ympärille. Se ei kuitenkaan ole ainoa materiaaliominaisuus, jonka perusteella betonisandwich-elementtien eristemateriaali valitaan ja mitoitetaan.

Tilavuuteen suhteutetulta lämmöneristävyydeltään muovipohjaiset eristemateriaalit ovat tehokkaampia kuin mineraalivillaeristeet. Mineraalivillat ovat kuitenkin merkittävästi muovipohjaisia eristeitä hinnaltaan edullisempia materiaaleja, ja sama betonisandwich-rakenteen lämmöneristävyys saavutetaan mineraalivilloja käytettäessä huomattavasti edullisemmin. Tämän lisäksi mineraalivillat ovat palamattomia materiaaleja, ja palotekniset vaatimukset usein puoltavat niiden käyttöä.

Rakennesuunnittelussa tulee kuitenkin vastaan tilanteita, joissa esimerkiksi tilantarve tai varmuus kosteudenkestävyydelle ohjaavat suunnittelijan perustellusti valitsemaan EPS-, XPS- tai PUR/PIR -eristeen. Muovipohjaisten eristeiden ohuempi paksuus antaa etuja elementtien liitoskohdissa, kiinnike- ja nostojärjestelmissä sekä valmistustyön ja kuljetuksen kustannuksia vertailtaessa.

Tämän kirjallisuuskatsauksena tehdyn tutkimuksen tulos vastaa lähtötietoa siitä, että yleisesti käytetyin eristemateriaali Suomessa on selkeästi mineraalivilla. Muovipohjaisille eristemateriaaleille löytyy kuitenkin käyttökohteita, joissa niiden ominaisuudet ovat villoja suotuisampia, ja niiden käyttö on kokonaiskustannusten kannalta järkevämpää.

## LÄHTEET

Kianta, H. (2017) Lämpötilan vaikutus eristemateriaalien lämmönjohtavuuteen. Diplomityö. 78 s.

Niemelä, J., Asp, A. & Sydorov, Y. 2012. Radiosignaalin vaimennusmittauksia nykykäsissä asuintaloissa. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto. Tietotekniikan laitos, Tutkimusraportti 2012:1. 65 s.

Ormiskangas, P. (2009) Betonisandwich-elementin kosteustekninen toiminta paksuilla eristeillä. Diplomityö. 134 s.

Pentti, M., Lahdensvu, J., Vaarala, M., & Pakkala, T. (2010). BES 2010 – OSA C, 3. Lämpö- ja kosteustekniikka, Suunnitteluohjeistuksen uusinta – lyhennetty versio. Tampereen teknillinen yliopisto. Tutkimusselostus TRT/1864/2010. 20 s.

Rakennustietosäätö. (2017). RT-11252, Matkaviestinkuuluvuus rakennuksissa.

Matkaviestinkuuluvuus rakennuksissa, Rakennustietosäätö, RT-11252, 2017. 8 s.

Suikka, A. (2010) Betonisandwich -elementit. Elementtisuunnittelu.fi

Suikka, A. (2009) Matalaenergiatalon betonijulkisivut. Julkisivuyhdistys 2009. Elementtisuunnittelu.fi

Suutarinen, M. (2008) Matalaenergiarakentamiseen soveltuvat betonijulkisivuelementit asuinrakennuksissa. Diplomityö. 125 s.

Ympäristöministeriö. (2017) 848/2017. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta. Suomen rakentamismääräyskokoelma. 23 s.

Ympäristöministeriö. (2017) 1010/2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Suomen rakentamismääräyskokoelma.

Betonyhdistys ry. (2011). Ulkoseinäelementtien suunnitteluohjeet. Saatavissa (viitattu 10.6.2020) [www.elementtisuunnittelu.fi](http://www.elementtisuunnittelu.fi)

Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lahdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa, A. & Palolahti, T. (2013) Ilmastomuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Rakennetekniikka. Tutkimusraportti 159. 405 s.

Lahdensivu, J., Suonketo, J., Vinha, J., Lindbeg, R., Manelius, E., Kuhno, V., Saastamoinen, K., Salminen, K. & Lahdesmäki, K. (2012). Matalaenergia- ja passiivitalojen rakenteiden ja liitosten suunnittelu- ja toteutusohjeita. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Tutkimusraportti 160. 131 s.