



RAKENNUSTIETO >

Rakennusalan täyden palvelun tietotalo

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

Tutustu palveluihimme

> rakennustieto.fi/rk/palvelut

Rakentajain kalenterin artikkelit

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

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

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

Eristerapatun betoniseinän ilmaääneneristävyyttä

Jussi Rauhala, diplomi-insinööri
Akustiikkasuunnittelija, Helimäki Akustikat
jussi.rauhala@helimaki.fi

2

1 Johdanto

Betonielementtirakenteisen asuinkerrostalon rakennejärjestelmä on Suomessa ollut pitkään vakiintunut. Betonirakennusten rakenteita ja liitoksia koskevat Betonielementtistandardit julkaistiin vuonna 1970. Niiden osana oli asuntorakentamista varten kehitetty BES-järjestelmä, joka yhdenmukaisti kerrostaloelementtien rakennevahvuudet ja liitokset lähes 30 vuodeksi. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry:n vuonna 1967 julkaisemat ääneneristysnormit olivat asettaneet asuinkerrostalohuoneistojen väliselle ääneneristävyydelle vaatimustason, joka säilyi mittausmenetelmissä tapahtuneista muutoksista huolimatta käytännössä samana aina vuosituhannen vaihteeseen saakka [1, 2, 3 ja 4]. Rakennusten ääniolosuhteita koskevan Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C1 uudistus vuonna 1998 johti rakenteissa lähinnä välipohjan kantavan rakenteen massan ja rakennepaksuuden kasvamiseen vaaditun askelääneneristävyyden saavuttamiseksi [5 ja 6].

Massiivisten rakennusosien ääneneristyskyky perustuu niiden massaun, toisin sanoen betonin suureen tiheyteen ja rakennusosien paksuuteen. Ääni kulkee huoneistosta toiseen niitä erottavan rakenteen ja niitä sivuavien rakenteiden, kuten ulkoseinän, kautta. Äänen kulkemista tilasta toiseen muuta rakenteellista reittiä kuin tiloja erottavan rakenteen kautta sanotaan rakenteelliseksi sivutiesiirtymäksi. Betonielementtirakenteisessa rakennuksessa rakenteellinen sivutiesiirtymä riippuu sivuavien rakennusosien ääneneristävyydestä sekä niiden ja erottavien rakennusosien välisten liitosten jäykkyyydestä [7]. BES-järjestelmän mukaisesti virheetömästi rakennetussa asuinkerrostalossa on yleensä saavutettu asuinhuoneistojen väliseksi ilmaääneneristyslukuksi $R'_{w} 56\text{--}58\text{ dB}$ [8 ja 9].

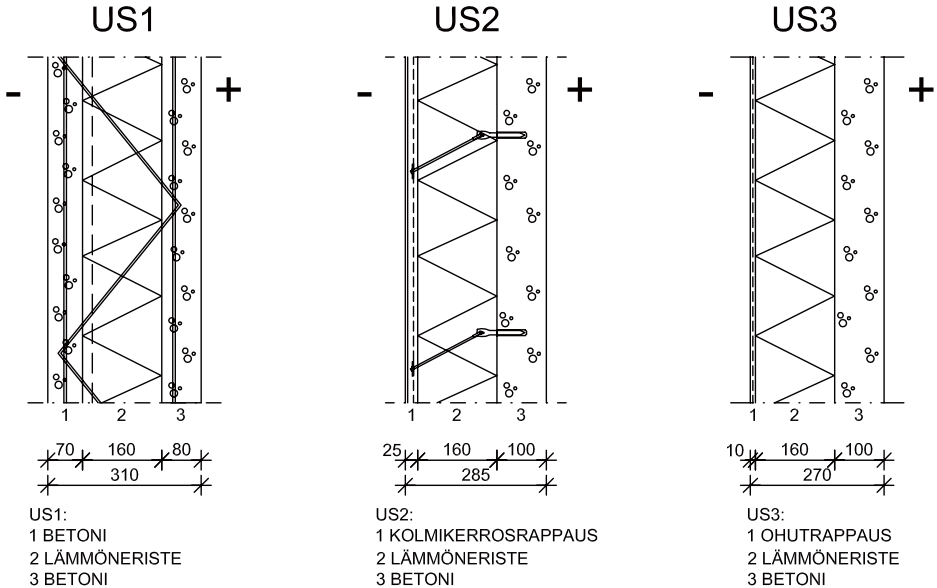
Uusissa asuinkerrostaloissa tehdään ääneneristysmittauksia esimerkiksi osana rakennuttajan edellyttämää laadunvalvontaa tai asukkaan tekemän valituksen perusteella. Viime vuosina näissä mittauksissa on havaittu, että Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C1 esitetyt

vaatimukset asuinhuoneistojen väliselle ilmaääneneristävyydelle eivät aina täyty [10].

Kuluneen vuosikymmenen aikana betonielementtirunkoisen asuinkerrostalon ulkoseinärakenteena on Suomessakin uudisrakentamisessa yleistynyt eristerapattu ulkoseinärakenne (kuva 1, US2 ja US3). Eristerappauksella tarkoitetaan ulkoseinän lämmöneristeen ja suoraan sen päälle tehdyn rappauksen yhdistelmää. Rappaus voidaan tehdä joko kolmikerros- tai ohutrappauksena. Kolmikerrosrappaukset tehdään yleensä eri seossuhteisilla kalkkisementtilaasteilla ja ohutrappauksissa käytetään yleensä polymeerimodifioituja sementtilaasteja. Lämmöneristeenä on Suomessa käytetty yleensä mineraalivillaa tai paisutettua polystyreeniä. Ulkoseinän sisäkuorena voi olla betonisisäkuori tai muurattu rakenne, johon lämmöneriste kiinnitetään liimamalla. Liimauksen lisäksi eriste voidaan kiinnittää alustaansa myös mekaanisin kiinnikkein. Kolmikerrosrappauksen yhteydessä mekaanisia kiinnikkeitä käytetään aina [11] ja ohutrappauksissa niitä suositellaan käytettäväksi ainakin seinän yläosassa rappauskerroksen jatkuvan murtumisen ehkäisemiseksi [12].

BES-järjestelmän mukaan rakennetun asuinkerrostalon ääneneristävyyttä perustuu rakennusosien massaun ja liitosten jäykkyuteen. Eikantavan betonisandwich-elementin massa muodostuu sisä- ja ulkokuoren betonikerroksista. Eristerapatussa seinässä rappauskerroksen ja eristerakroksen massa on mitätön verrattuna sisäkuoren massaun, joten eristerapatun seinän massa on suunnilleen puolet betonisandwich-elementin massaun. Näin ollen myös sen ilmaääneneristävyyttä on erilainen kuin betonisandwich-elementin. Yksi asuinhuoneistojen väliseen ilmaääneneristävyyteen mahdollisesti vaikuttava tekijä voi siten olla ulkoseinärakenteen vaihtuminen betonisandwich-elementistä eristerapatuksi rakenteeksi (kuva 1). Tämän muutoksen vaikutuksia asuinkerrostalohuoneistojen väliseen ääneneristävyyteen ja rakenteelliseen sivutiesiirtymään ei ole Suomessa aiemmin juuri tutkittu.

Eristerapattu ulkoseinärakenne eroaa betonisandwich-elementistä paitsi massaun myös



Kuva 1. Ei-kantavia ulkoseinärakenteita. Vasemmalla on betonisandwich-ulkoseinä, keskellä kolmikerrosrappattu ja oikealla ohutrappattu betoniulkoseinä. Kantavissa rakenteissa sisäkuoren paksuus on yleensä 150–160 mm.

akustisen toimintansa osalta. Sisäkuori, eriste ja rappaus muodostavat jousen välityksellä toisiinsa kytkeytyneiden kahden massan värähtelyjärjestelmän. Ulkomaaisissa tutkimuksissa on todettu, että tällaisen rakenteen ilmäääneristävyys voi olla pelkkään sisäkuoreen verrattuna joko parempi tai heikompi [13]. Eristerapattu seinä voi siten vaikuttaa asuinhuoneistojen välillä saavutettavaan ilmäääneristävyteen betonisandwich-elementtiin verrattuna pienemmän massansa lisäksi myös rakenteen akustisesta toiminnasta seuraavan ilmäääneristävyysten heikkenemisen vuoksi.

Liikennemelualueille rakennettaessa rakennuksen ulkovaipan ääneneristävydelle asetetaan asemakaavassa vaatimus, jonka perusteella rakennuksen ulkovaipan rakennusosat valitaan ja niiden ääneneristävydet mitoitetaan. Suomessa käytettävien eristerapattujen ulkoseinärakenteiden ilmäääneristävyksistä ei ole aikaisemmin ollut tietoa rakennusalan kirjallisuudessa. Koska eristerapatun ulkoseinärakenteen akustinen toiminta poikkeaa betonisandwich-elementistä, se voi vaikuttaa myös ulkovaipan ääneneristykseen suunnitteluun liikennemelualueilla ja ulkovaipan muiden rakennusosien valintaan.

Tämän artikkelin tarkoituksena on selvittää eristerapatun ulkoseinärakenteen akustista toi-

mintaa. Artikkelissa keskitytään asuinkestoaloihin, joissa seinän sisäkuori tavallisesti on 80–150 mm paksu betonielementti. Artikkelin tavoitteena on

- selvittää, mitkä tekijät vaikuttavat eristerapatun ulkoseinärakenteen ilmäääneristävyteen ja arvioida ilmäääneristävyksiä laskeutuksellisesti
- määrittää rakennuksen ulkovaipan ääneneristysmitoituksen lähtötiedoksi eristerapattujen ulkoseinärakenteiden ilmäääneristyslukuja liikennemelua vastaan
- arvioida ulkoseinärakenteen kautta tapahtuvaa sivutiesiirtymää ja laatia rakennesuunnittelua varten käytännöllinen ohje eristerapatun ulkoseinärakenteen valinnasta sivutiesiirtymästä johtuvien huoneistojen välisten ääneneristysongelmien välttämiseksi.

Artikkeli perustuu laajempaan tutkimukseen, jonka tulokset on esitetty lähteissä [14 ja 15].

2 Eristerapatun seinän ääneneristävyys

2.1 Ilmäääneristävyys

Rakennusosan ilmäääneristävyys R [dB] on määritelty standardissa ISO 140-3 [16]. Se ku-

vaa rakenteen kohdanneen ja sen kautta toiseen tilaan siirtyneen äänitehon suhdetta. Rakenteen kyky eristää ilmaääntä on sitä parempi, mitä suurempi ilmääneneristävyys R on. Kaikkien akustisten ilmiöiden tavoin ilmääneneristävyys on taajuusriippuvainen tavallisesti siten, että ilmääneneristävyys on sitä parempi, mitä suurempi äänen taajuus on. Tästä pääsäännöstä on kuitenkin lukuisia poikkeuksia, jotka riippuvat materiaalin ominaisuuksista ja rakenteen akustisesta toiminnasta. Käytännön suunnittelutyössä rakenteiden ilmääneneristyskyky esitetään tavallisesti yksilukuisena arvona eli ilmääneneristyslukuna R_w , joka lasketaan kolmannesosaaktaavikaistoittain määritetyistä ilmääneneristävyyksistä $R_{1/3}$ standardin ISO 717-1 [17] mukaisesti.

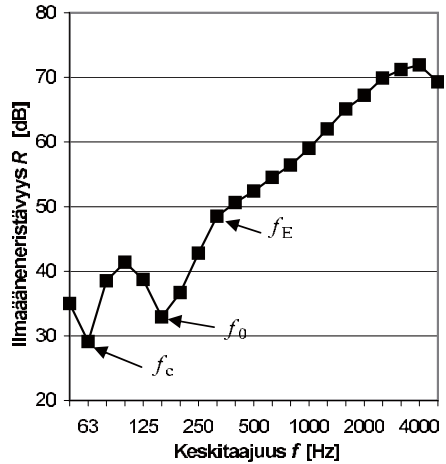
Rakennusosan ilmääneneristävyys R voidaan määrittää mittaamalla laboratoriossa tai laskennallisesti. Ilmääneneristävyuden laskennalliseksi määrittämiseksi on olemassa kaupallisia mallinnusohjelmistoja. Ongelmana on kuitenkin se, että yleensä niiden pohjana olevia teorioita ei ole dokumentoitu riittävän tarkasti [18], eikä näin ollen ole mahdollista tietää ja arvioida laskentatulosten tarkkuutta. Lisäksi eri laskentaohjelmistojen tuottamat tulokset poikkeavat toisistaan huomattavastikin [19 ja 20 liite 6]. Tässä artikkelissa tarkastellaan eristerapattuja ulkoseinä rakenteita laskennallisesti kirjallisuudessa esitettyjen laskentamallien mukaisesti.

2.2 Eristerapattun ulkoseinän akustinen toiminta

Eriesterapattu betonielementtiulkoseinä on massa-jousi-massasysteemi, jossa betonisisäkuoren ja rappauserroksen massat ovat kytkettyneet toisiinsa lämmöneristeen muodostaman jousen välityksellä. Rakenteen ääneneristävyuden perustana on massalaki, jonka mukaan rakenteen ilmääneneristävyys kasvaa 6 dB, kun taajuus tai massa kaksinkertaistuu. Ääneneristävyteen vaikuttaa lisäksi erityisesti kolme rajataajuutta (kuva 2), betonisisäkuoren koinsidenssin rajataajuus f_c ja rakenteen muodostaman massa-jousi-massasysteemin resonanssitaajuus f_0 eli dilataatioresonanssi sekä rajataajuus f_E [13].

Koinsidenssin rajataajuus aina heikentää rakenteen ääneneristävyttä massalakiin nähden. Betonisisäkuoren koinsidenssin rajataajuus vaihtelee sisäkuoren paksuuden ja materiaaliominaisuuksien mukaan. Sisäkuoripaksuuksilla 80–150 mm koinsidenssin rajataajuus vaihtelee välillä ~115–270 Hz ja on sitä korkeampi, mitä ohuempi sisäkuori on.

Dilataatioresonanssi riippuu rakenteen puoliskon massa sekä eristekerroksen dynaamisesta jäykkyydestä s' [MN/m^3]. Dilataatioresonanssi on vastaava ilmiö kuin kaksinkertai-



Kuva 2. Tyypillinen eristerapattun seinän ilmääneneristävyyskäyrä [21], jossa on nähtävillä rajataajuudet: sisäkuoren koinsidenssi f_c , dilataatioresonanssi f_0 ja rajataajuus f_E .

sen rakenteen muodostaman massa-ilma-massasysteemin resonanssi, mutta dilataatioresonanssi tulee sitä korkeammalle taajuudelle, mikä on yksinkertaisesti seuraus eristeen jäykkyydestä ilmaan verrattuna. Mitä pienempi eristeen dynaaminen jäykkyys on, sitä alhaisempi rakenteen dilataatioresonanssitaajuus on [18].

Dilataatioresonanssin jälkeen rakenteen ilmääneneristävyys paranee, mutta parannus pienenee rajataajuuden f_E jälkeen [13]. Kyseisen rajataajuus on riippuvainen eristeen dynaamisesta jäykkyydestä, tiheydestä sekä paksuudesta. Dynaamisen jäykkyyden pienentyminen tai paksuuden ja tiheyden kasvaminen pienentävät eristekerroksen seisovien aaltojen rajataajuutta.

Kuvassa 2 on esitetty laboratoriossa mitattu tyypillinen ilmääneneristävyyskäyrä eristerapattulle rakenteelle [21]. Eristerapattun seinän rakenteesta riippuen koinsidenssin rajataajuus ja dilataatioresonanssi voivat osua samalle taajuudelle, jolloin ilmääneneristävyyskäyrään syntyy syvä kuoppa. Rakenneyhdistelmissä tällaista tapausta onkin syytä välttää.

2.3 Eristerapattun seinän laskentamallit

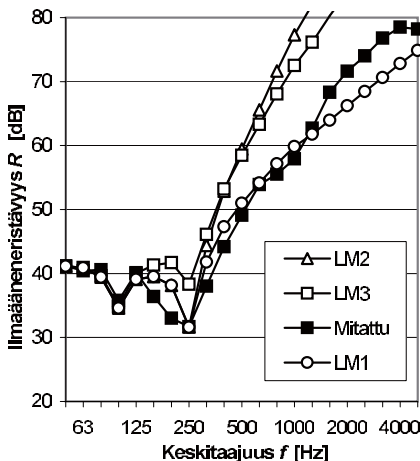
Eriesterapattun seinän ilmääneneristävyuden määrittämiseksi on tutkittu neljä laskentamallia. Kolmella malleista määritetään ilmääneneristävytyydet taajuuksittain ja yhdellä määritetään ilmääneneristysluku tieliikennemelua vastaan.

- Laskentamallissa 1 eristerapatun seinän il-
määneneristävyys lasketaan summaamalla ener-
geettisesti kuorien ja eristeen lasketut ilmä-
neneristävytydet, josta vähennetään dilataa-
tioresonanssin aiheuttama heikennys. Massa-
laki toisin sanoen asettaa rakenteen ilmä-
neneristävytydelle ylärajan [18 ja 22].
 - Laskentamallissa 2 eristerapatun seinän il-
määneneristävyys paranee laskentamallia 1
enemmän dilataatioresonanssin jälkeen jär-
jestelmän jousivaikutuksesta ja eristävytyden
kasvu hidastuu rajataajuuden f_E jälkeen [13].
 - Laskentamallissa 3 ajatellaan eristerapatun
seinän lämmöneristekerroksen toimivan tärin-
äneristimenä, jolloin lämmöneristekerrok-
sella on jousiominaisuuden lisäksi vaimen-
nusominaisuus. Eristävytyden kasvu hidastuu
rajataajuuden f_E jälkeen [18].
 - Saksalaisella yksinkertaisella laskentamallil-
la määritetään eristerapatun seinän yksilukui-
nen ilmääneneristysluku $R_w + C_{tr}$. Malli on em-
piirinen, se perustuu laajoihin laboratorio-
mittauksiin. Mallissa otetaan huomioon sisä-
kuoren ilmääneneristyskyky, lämmöneris-
teen tyyppi, rakenteen dilataatioresonanssi,
sisäkuoren ja eristekerroksen välinen lii-
mausala ja mekaanisten kiinnikkeiden käyttö [13].
- Laskentamallien kelpoisuutta tutkittiin vertaile-
malla niiden antamia ilmääneneristävytyksiä
vastaavien rakenteiden laboratoriomittauksilla
saatuihin arvoihin. Esimerkkirakenteissa pyri-
ttiin varioimaan mahdollisimman laajasti eris-
terapatujen seinien rakennekerroksia ja niiden
ominaisuuksia. Tutkituista lähteistä löytyi vain
yksi mittaustulos, jossa rakenteen sisäkuorena

oli betonirakenne, muissa esimerkkirakenteissa
sisäkuorena oli kalkkihiekkakivinen tiiliraken-
ne. Kuviissa 3 ja 4 on esitetty vertailuja laskenta-
mallien ja mittaustulosten välillä.

Toistaiseksi ei tarkalleen tiedetä mitä tapah-
tuu dilataatioresonanssin yläpuolisilla taajuuksilla.
Materiaaliominaisuuksia tai rakenneomi-
naisuuksia, jotka aiheuttavat ilmääneneristä-
vytyden vaihtelevan käyttäytymisen dilataa-
tioresonanssin jälkeen, ei tunneta. Laskentamal-
leissa 1, 2 ja 3 ei oteta huomioon mekaanisia
kiinnikkeitä eikä lii-
maus-
alaa, jotka ovat yksin-
kerta-
isessa mallissa mukana. Yksinkertainen
menetelmä on herkkä lähtötietoina vaadituille
materiaaliarvoille, erityisesti rakenteissa, joissa
lämmöneristeenä on mineraalivilla. Esimerkik-
si poikkivillalla ilmavirtausvastuksen vaihtelu-
välillä 10–40 kPa·s/m² laskentamallin mukaan
ero ilmääneneristysluvussa on 12 dB. Vaikka
laskentamalli 3 olisi luultavasti malleista kehitys-
kelpoisin, edellyttäisi sen kehittäminen luku-
isia laboratoriomittauksia ja tarkkoja materi-
aalitietoja, joiden perusteella laskentamallin va-
liditeettia voitaisiin laajasti tarkastella.

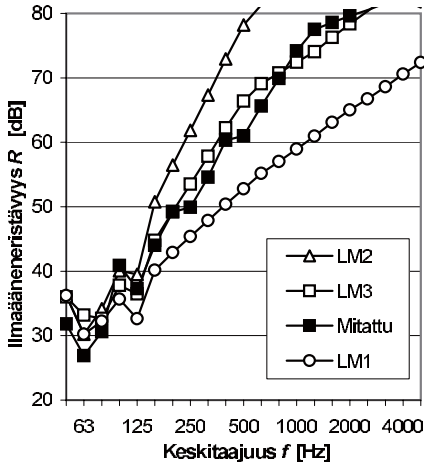
Koska liikennemelun äänenpainetasot ovat
suurimmillaan taajuusalueella, jolla eristerapatu-
jen seinien ilmääneneristävytydet ovat heikoim-
millaan, on eristerapatujen seinien ilmä-
äneneristävytydet turvallisinta määrittää las-
kentamallilla, joka määrittää tämän taajuusalu-
een tarkimmin. Testatuista menetelmistä on las-
kentamalli 1 tässä suhteessa luotettavin. Siksi
eristerapatujen ulkoseinien ilmääneneristys-
luvut määritetään rakennuksen ulkovaipan äänen-
eristystä varten luvussa 3.2. laskentamallilla 1.



ISO 717-1 mukaiset ilmääneneristysluvut:

	R_w	R_w+C	R_w+C_{tr}
Mitattu	49 dB	47 dB	43 dB
Laskentamalli 1	52 dB	49 dB	45 dB
Laskentamalli 2	54 dB	49 dB	45 dB
Laskentamalli 3	56 dB	54 dB	50 dB
Saksalainen LM			45 dB

Kuva 3. Esimerkkirakenne 1, mitattu [23] ja laskentamalleilla määritetyt ilmääneneristävytydet sekä niistä määritetyt ilmääneneristysluvut.



Kuva 4. Esimerkkirakenne 5, mitattu [24] ja laskentamalleilla määritetyt ilmääneneristävyydet sekä niistä määritetyt ilmääneneristysluvut.

3 Ulkovaipan mitoitus liikennemelualueilla

3.1 Ulkovaipan ääneneristystä koskevat määräykset

Rakennusten ulkoseinille ei ole Suomen rakentamismääräyskokoelmassa annettu erillisiä ääneneristysmääräyksiä. Melualueille rakennettaessa tulee kuitenkin ottaa huomioon, että melu ei kantaudu liaksi rakennuksen sisätiloihin heikentämään käyttäjien viihtyisyyttä tai vaarantamaan terveyttä. Ulkoseinät, ikkunat ja parveke-ovet yhdessä muiden rakennusosien kanssa muodostavat rakennuksen ulkovaipan, jonka ääneneristystä koskevat vaatimukset annetaan asemakaavassa kaavamääräyksinä. Asemakaavassa esitettävä äänitasoerovaatimus $\Delta L_{A,vaad}$ ei tarkoita ulkovaipan yksittäisten rakennusosien ilmääneneristyskykyä liikennemelua vastaan. Se määritetään liikenteen rakennuksen julkisivun pinnalle aiheuttaman keskiäänitason ja sisällä valtioneuvoston päätöksen mukaan sallitavan keskiäänitason erotuksena. Rakennuksen sisätilaan liikennemelusta muodostuva keskiäänitaso riippuu kaikkien tilaa rajaavien ulkovaipan rakennusosien ääneneristyskyvyn lisäksi näiden rakennusosien pinta-alasta ja sisätilan huonevaimennuksesta. Rakennuksen ulkovaipan ääneneristys suunnittelusta on kerrottu tarkemmin vuoden 2009 Rakentajain kalenterin artikkelissa [25].

ISO 717-1 mukaiset ilmääneneristysluvut:

	R_w	R_w+C	R_w+C_{tr}
Mitattu	62 dB	59 dB	54 dB
Laskentamalli 1	55 dB	54 dB	49 dB
Laskentamalli 2	69 dB	64 dB	59 dB
Laskentamalli 3	63 dB	60 dB	55 dB
Saksalainen LM			52 dB

2

3.2 Eristerapatun seinän ilmääneneristysluvut

Laskentamallilla 1 on laskettu eristerapatujen sisäkuorielementtirakenteiden ääneneristävyyksiä sekä niistä on määritetty rakennekohtaisesti ilmääneneristysluvut $R_w + C$ ja $R_w + C_{tr}$. Laskelmat on tehty neljällä eri sisäkuoren paksuudella, kahdella eri eristemateriaalilla, kolmella eri eristepaksuudella sekä kahdella eri rappauspaksuudella.

Laskelmissa käytetyt materiaaliarvot on esitetty taulukoissa 1 ja 2. Taulukossa 1 on kuorien eli betonin ja rappausten materiaaliarvot ja taulukossa 2 on lämmöneristekerrosten materiaaliarvot. Ohutrappauksissa käytetään yleensä polymeerimodifioituja sementtilaasteja (taulukko 1, rappaus (S)). Kolmikerroseristerappauksissa käytetään yleensä eri seossuhteisia kalkkise-

Taulukko 1. Laskelmissa käytetyt materiaaliarvot betonille ja rappaukselle.

Materiaali	Tiheys	Kimmo-moduuli	Poissonin vakio	Sisäinen-häviökerroin
	ρ [kg/m ³]	E [MPa]	ν	η_{int}
Betoni (K30)	2400	27400	0,2	0,01
Rappaus (S)	1500	15400	0,2	0,01
Rappaus (KS)	1650	7600	0,2	0,01

SUUNNITTELU

Taulukko 2. Laskelmissa käytetyt materiaaliarvot lämmöneristeille.

Materiaali	Tiheys ρ [kg/m ³]	Dynaaminen jäykkyys s' [MN/m ³] paksuudella		
		160 mm	250 mm	450 mm
EPS	17	38	24	13
Paroc FAL1	80	78	50	28
Paroc FAS4	130	14	9	5

menttilaasteja (taulukko 1, rappaus (KS)), niiden materiaaliominaisuudet vaihtelevat paljon seossuhteesta riippuen.

Paisutetun polystyreenin EPS dynaamiset jäykkyudet s' on laskettu 100 mm paksun eristeen arvosta 60 MN/m³. Mineraalivillan FAL1 eristepaksuuksia 250 mm ja 450 mm vastaavat dynaamiset jäykkyudet s' on laskettu 160 mm paksun eristeen arvosta ja mineraalivillan FAS4 dynaamiset jäykkyudet on laskettu 150 mm paksun eristeen arvosta.

Laskentamallilla 1 lasketuista ilmaääneneristävyyksistä eri rakennevariaatioille määritettyjä eristerapattujen seinien ilmaääneneristyslukuja on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Eristerapattujen seinien ilmaääneneristyslukuja.

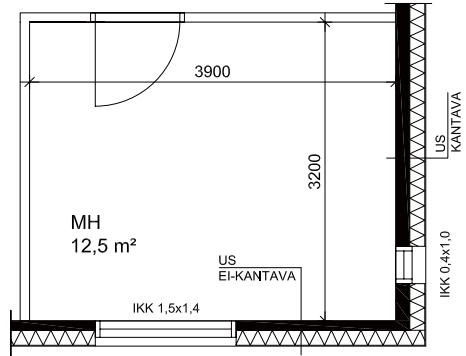
Eristerapatun seinän rakenne					Ilmaääneneristysluku			
Rappaus		Lämmöneriste		Betonisisäkuori	R _w + C [dB]	R _w + C _{tr} [dB]		
Paksuus	Tyyppi	Paksuus	Tyyppi	Paksuus				
10 mm	(S)	160 mm	EPS	80 mm	40	36		
				100 mm	43	39		
				120 mm	45	41		
				150 mm	49	45		
		250 mm	FAL1	80 mm	43	40		
				100 mm	45	43		
				120 mm	48	45		
				150 mm	51	48		
25 mm	(KS)	160 mm	EPS	80 mm	45	41		
				100 mm	45	41		
				120 mm	47	42		
				150 mm	50	45		
		250 mm	FAS4	80 mm	50	47		
				100 mm	52	48		
				120 mm	53	49		
				150 mm	56	52		
10 mm	(S)	250 mm	EPS	120 mm	45	40		
				150 mm	49	44		
				120 mm	48	44		
				150 mm	51	47		
		450 mm	FAL1	120 mm	48	44		
				150 mm	51	46		
				25 mm	EPS	120 mm	48	43
						150 mm	50	45
450 mm	FAS4	120 mm	55			51		
		150 mm	57			53		
10 mm	(S)	250 mm	EPS	120 mm	47	43		
				150 mm	50	45		
				120 mm	48	44		
				150 mm	51	46		
		450 mm	FAL1	120 mm	48	44		
				150 mm	51	46		
				25 mm	EPS	120 mm	52	48
						150 mm	55	51
450 mm	FAS4	120 mm	56			53		
		150 mm	58			55		

3.3 Ulkovaipan ääneneristykseen esimerkkilaskelmat

Ulkovaipan ääneneristys on tilakohtainen ilmiö, yhdellä esimerkkitapauksella ei ole mahdollista kattaa kaikkia laskentavariaatioita. Eri rakennusosien pinta-alojen muutokset, huoneen lattiapinta-alan muutos tai parvekeoven lisääminen saattavat oleellisesti muuttaa saavutettavaa kokonaisäänitasoeroa. Siksi käytännön rakennushankkeissa on aina osoitettava rakennuslupavaiheessa kaavamääräyksen toteutuminen huonekohtaisilla ulkovaipan ääneneristyslaskelmissa.

Kuvassa 5 on esitetty ulkovaipan ääneneristykseen esimerkkilaskelmissa käytetyn kerrostalon kulmahuoneen pohjakuva. Esimerkkihuoneen kokonaisäänitasoerot $\Delta L_{A,tot}$ on laskettu äänitasoeromenetelmällä [25]. Laskelmat on tehty kaikilla järkevillä ulkoseinien rakennevariaatioilla käyttämällä taulukon 3 mukaisia ulkoseinärakenteita. Asumismukavuuden vuoksi on suositeltavaa, että ikkunoiden ilmaääneneristysluku tieliikennemelua vastaan $R_w + C_{tr}$ on aina vähintään 37 dB, vaikka rakennuspaikan asemakaavassa ei olisi äänitasoerovaatimusta [25]. Laskelmat on tehty ikkunoiden ääneneristysarvoilla $R_w + C_{tr}$ 37 dB, 39 dB, 41 dB, 43 dB ja 45 dB.

Taulukoissa 4 ja 5 on esitetty eri äänitasoero-vaatimusten yhteydessä käytettäviksi suositeltavat eristerapatut ulkoseinärakenteet, taulukossa 4 ulkoseinärakenteiden rappaussena on ohutrapaus ja taulukossa 5 kolmikerrosterapaus.



Kuva 5. Pohjakuva ulkovaipan ääneneristyslaskelmien esimerkkihuoneesta. Huoneen lattiapinta-ala on 12,5 m² ja korkeus 2,6 m. Huoneen ikkunoiden yhteispinta-ala on 20 % huoneen pinta-alasta. Huoneen ulkovaipassa ei ole korvausilmaventtiilejä.

paus. Ei-kantavan ulkoseinän betonisisäkuoren suositeltava vähimmäispaksuus on 120 mm. Taulukoiden 4 ja 5 solujen arvo ”x” tarkoittaa, että rakennetta voidaan käyttää esitetyn äänitasoerovaatimuksen yhteydessä ja arvo ”-” tarkoittaa, että rakenne ei sovellu käytettäväksi esitetyn äänitasoerovaatimuksen yhteydessä, kun laskettavan huoneen pinta-alasuhteet ovat kuvan 5 esimerkkihuoneen mukaiset.

Taulukko 4. Eri äänitasoerovaatimusten yhteydessä käytettäviksi suositeltavat ohutrapatut ulkoseinärakenteet.

Äänitasoero-vaatimus $\Delta L_{A,vaad}$ [dB]	Ohutrapatut ulkoseinärakenteet								
	Rakennusosan $R_w + C_{tr}$ [dB]	Sijainti	Sisäkuori	Lämmöneristepaksuudella					
				160 mm		250 mm		450 mm	
				EPS	FAL1	EPS	FAL1	EPS	FAL1
30 ja 32	≥ 40	Ei-kantava	120 mm	x	x	x	x	x	x
			150 mm	x	x	x	x	x	x
	≥ 44	Kantava	150 mm	x	x	x	x	x	x
35	≥ 43	Ei-kantava	120 mm	-	x	-	x	x	x
			150 mm	x	x	x	x	x	x
	≥ 45	Kantava	150 mm	x	x	x	x	x	x
38	≥ 48	Ei-kantava	150 mm	-	x	-	-	-	-
	≥ 48	Kantava	150 mm	-	x	-	-	-	-
40	≥ 51	Ei-kantava		-	-	-	-	-	-
	≥ 52	Kantava		-	-	-	-	-	-

Taulukko 5. Eri äänitasoero vaatimusten yhteydessä käytettäviksi suositeltavat kolmikerroseristerapatut ulkoseinä rakenteet.

Äänitasoero-vaatimus $\Delta L_{A,vaad}$ [dB]	Kolmikerroseristerapatut ulkoseinä rakenteet								
	Rakennusosan R_w+C_{tr} [dB]	Sijainti	Sisäkuori	Lämmöneristepaksuudella					
				160 mm EPS		250 mm EPS		450 mm EPS	
				FAS4	FAS4	FAS4	FAS4	FAS4	FAS4
30 ja 32	≥ 40	Ei-kantava	120 mm	x	x	x	x	x	x
			150 mm	x	x	x	x	x	x
	≥ 44	Kantava	150 mm	x	x	x	x	x	x
35	≥ 43	Ei-kantava	120 mm	–	x	x	x	x	x
			150 mm	x	x	x	x	x	x
	≥ 45	Kantava	150 mm	x	x	x	x	x	x
38	≥ 48	Ei-kantava	120 mm	–	x	–	x	x	x
			150 mm	–	x	–	x	x	x
	≥ 48	Kantava	150 mm	–	x	–	x	x	x
40	≥ 51	Ei-kantava	120 mm	–	–	–	x	–	x
			150 mm	–	x	–	x	–	x
	≥ 52	Kantava	150 mm	–	x	–	x	–	x

4 Eristerapatun seinän vaikutus huoneistojen väliseen ilmastineneristykseen

4.1 Huoneistojen välinen ilmastineneristys

Asuinhuoneistojen väliselle ilmastineneristävyydelle on Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C1 [5] annettu määräyksenä pienin sallittu ilmastineneristysluku R'_w [dB]. Voimassa olevan, vuoden 1998 rakentamismääräyskokoelman osan C1 mukaan pienin sallittu ilmastineneristysluku R'_w asuinhuoneen ja sitä ympäröivien tilojen välillä yleensä on 55 dB. Määräyksen toteutuminen rakennuksessa voidaan osoittaa muun muassa laskentamenetelmillä tai mittaamalla. Tässä artikkelissa käytetään laskentamenetelmiä huoneistojen välisen ilmastineneristävyyden määrittämiseksi.

Rakennuksen huoneistojen välinen ilmastineneristysluku R'_w sisältää tiloja erottavan rakenteen ääneneristyskyvyn lisäksi sitä sivuavien rakenteiden, rakennusosien ja LVIS-järjestelmien kautta tapahtuvat sivutiesiirtymät, minkä vuoksi se on aina pienempi kuin vastaavan tiloja erottavan rakenteen laboratoriossa mitattu tai laskennallinen ilmastineneristysluku R_w . Kaikkien muiden reittien kuin huoneistojen erottavan rakenteen kautta tapahtuvaa äänen siirtymistä huoneistosta toiseen kutsutaan sivutiesiirtymäksi.

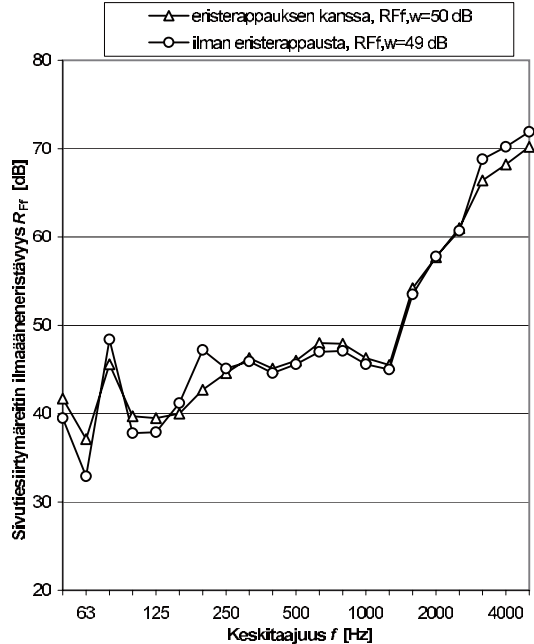
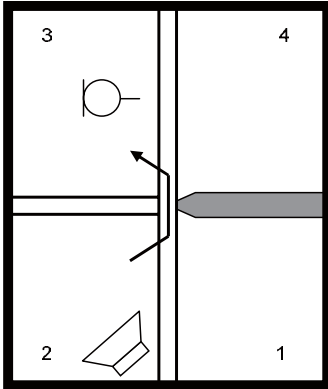
4.2 Eristerappauksen vaikutus sivutiesiirtymään

Saksassa on viime vuosina tutkittu laboratorio-olosuhteissa eristerappauksen vaikutusta massiivisen kiviseinän toimintaan rakenteellisenä sivutiesiirtymäreittinä [26]. Tutkimukset on tehty kolmella rakennevariatiolla, jotka kattavat yleisesti käytettävät rakenteet. Näiden perusteella on saatu edustavat tulokset yleisimpiin käytännön rakenteisiin. Vierekkäisten tilojen välillä mittaukset on tehty täysikokoisilla seinillä ja normaaleissa sivutiesiirtymäolosuhteissa, joten mittausten tarkkuus ja mittaustulosten soveltuvuus ovat erinomaiset.

Kuvassa 6 on esitetty ulkoseinän sivutiesiirtymäreitin F_f mitatut ilmastineneristävyydet $R_{FF,w}$ [dB], ilman eristerappausta sekä eristerappauksen kanssa [26]. Kuvasta nähdään, että eristerappaus ei juuri muuta pelkän sisäkuoren sivutiesiirtymäreitin ilmastineneristävyyksiä. Erot käyriässä ovat pääasiassa mittaustarkkuuden rajoissa [27].

Saksalaisten tutkimusten päätulokset olivat:

- Sivutiesiirtymiä eristerappauksen kautta ei yleensä tarvitse ottaa huomioon.
- Eristerappauksella ei ole merkittävää vaikutusta liitoseneristävyyteen.
- Eristerappauksen vaikutus sivutiesiirtymään johtuu pääasiassa siitä, että eristerapatut ulkoseinä rakenteen rakenteellinen jälkikäivunta-aika on lyhyempi kuin pelkän sisäkuorirakenteen (etenkin lähellä dilataatioresonanssia).



Kuva 6. Sivutiesiirtymäreitit mitatut ilmasteneristävyydet R_{Ff} [dB] pystyreikätiiliseinälle ilman eristerappausta ja eristerappauksen kanssa [26].

- Seinä eristää ääntä eri tavalla tasoaan vastaan kohtisuorassa suunnassa ja tasona suunnassa. Eristerappaus ei vaikuta huoneistojen väliseen ääneneristykseen.

4.3 Tilojen välisen ilmasteneristävyyden laskenta

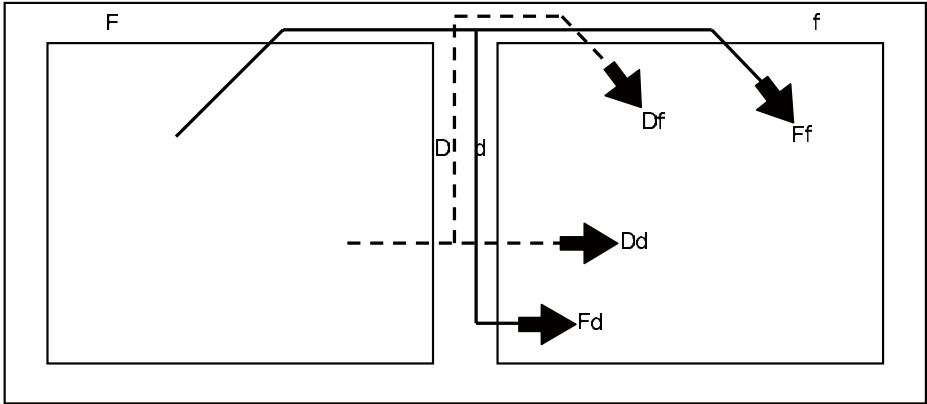
Rakennuksessa tilojen välillä toteutuvaa ilmasteneristävyyttä voidaan arvioida standardin EN 12354-1 [28] mukaisilla laskentamenetelmillä. Standardissa on esitetty sekä yksinkertaistettu että tarkka menetelmä ilmasteneristysluvun R'_w laskemiseksi rakennuksessa. Laskentamenetelmät perustuvat tiloja erottavan rakenteen ja tiloja sivuavien rakenteiden ilmasteneristyslukuihin R_w sekä rakennusosien liitosten välisiin liitoseristävyyksiin K_{ij} . Liitoseristävyydestä on käytetty kirjallisuudessa myös termejä liitoksen värähtelyeristävyys [29] sekä nurkkapiste-eristävyys [30]. Yksinkertaisessa menetelmässä ei oteta huomioon liitoseristävyyksien taajuusriippuvuutta, jolloin liitoseristävyydet riippuvat ainoastaan liittyvien rakennusosien liitostavasta ja massaista.

Rakennuksissa äänen kulkureittejä rinnakaisten tilojen välillä on äärettömän monta,

mutta laskennassa voidaan huomioida vain äärellinen määrä reittejä. Tavallisesti sivutiesiirtymistä tarkastellaan vain kuvan 7 mukaiset ensimmäisen kertaluvun sivutiesiirtymäreitit, joita on yleensä 12 kappaletta. Näiden lisäksi otetaan huomioon äänen kulkureitti suoraan erottavan rakenteen kautta. Jos laskennassa otetaan huomioon myös toisen ja sitä suuremman kertaluvun reitit, lisääntyy sivutiesiirtymien kautta kulkeutuva äänienergia yleensä vain noin yhden desibelin [29]. Sivutiesiirtymäreitit kertaluvun kasvaessa kasvaa äänen kulkemien liitosten lukumäärä, esimerkiksi kolmannen kertaluvun sivutiesiirtymäreitti kulkee kolmen liitoksen kautta.

Rakenteiden liitokset vaikuttavat oleellisesti rakenteellisen sivutiesiirtymän suuruuteen. Massiivisten yksinkertaisten kivirakenteiden liitoseristävyydet eivät ole juurikaan taajuusriippuvaisia, vaan ne perustuvat rakenteiden massaan ja liitosten jäykkyyteen. Liitoseristävyydet kasvavat liittyvien rakennusosien määrän ja/tai niiden pintamassojen suhteen kasvaessa.

Saksalaisten tutkimusten mukaisesti eristerapatun betonielementtiulkoseinän sivutiesiirtymän laskennassa rakenteesta otetaan huomioon pelkästään seinän sisäkuoren betonielementti,



Kuva 7. Kahden huoneen väliset äänen kulkureitit ij yhden sivuvaavan rakenteen ja erottavan rakenteen kautta.

Taulukko 6. Eristerapatun betonielementtiulkoseinän ja huoneistoja erottavan seinän jäykän T-liitoksen lasketut liitoseristävyydet.

Ulkoseinän sisäkuori		Väliseinä		Liitoseristävyydet [dB]	
paksuus [mm]	pintamassa m_1 [kg/m ²]	pintamassa m_2 [kg/m ²]	m_2/m_1	K_{13}	K_{12}, K_{23}
80	192	432	2,25	11,4	6,4
100	240	432	1,8	9,7	6,1
120	288	432	1,5	8,4	5,9
150	360	432	1,2	6,9	5,7

joten eristerapatun betonielementtiulkoseinän ja huoneistojen välisen seinän liitoseristävyyttä voidaan arvioida standardissa EN 12354-1 [28] esitetyn raskaiden rakenteiden jäykän T-liitoksen mukaisesti. Taulukossa 6 on esitetty nykyisillä sisäkuoripaksuuksilla saavutettavat liitoseristävyydet ulkoseinän ja huoneistoja erottavan seinän liitoksessa, kun huoneistoja erottava seinä on 180 mm paksu betoniseinä.

Arvioitaessa sivutiesiirtymää pelkkien liitoseristävyyksien perusteella voitaisiin helposti tehdä päätelmä, että mitä ohuempi ulkoseinän sisäkuori on, sitä parempi se on huoneistojen välisen sivutiesiirtymän kannalta. Asia ei kuitenkaan ole näin, koska sivuvaavan rakenteen ääneneristyskyky vaikuttaa sivutiesiirtymäreitin ilmaääneneristävyyteen jopa liitoseristävyyttä enemmän.

4.4 Sivutiesiirtymälaskelmat

Eristerapatun ulkoseinän kautta tapahtuvan sivutiesiirtymän riittävän alhaisen tason määrittämiseksi tehtiin tilojen välisiä ilmaääneneristyslaskelmia Bastian-tietokoneohjelmalla [24].

Ohjelmalla voidaan laskea tilojen välisiä äänen-eristävyyksiä standardin EN 12354 osien 1...3 mukaisesti. Ohjelma laskee standardin tarkan mallin mukaisesti, jolloin laskenta suoritetaan taajuusriippuvaisesti.

Vierekkäisiksi tiloiksi mallinnettiin esimerkkitapaus kerrostalon keskikerroksista. Vierekkäisten tilojen erottavana rakenteena käytettiin 180 mm ja 200 mm paksua betoniseinää. Toinen sivuvaivista seinistä oli ulkoseinä ja toinen oli huoneistojen sisäinen teräsrankainen levyseinä. Ulkoseinärakenteena käytettiin 80 mm, 100 mm, 120 mm ja 150 mm paksuja betoniseiniä. Tilojen lattiana ja kattona oli välipohjarakenne: 370 mm paksu ontelolaatasto tasoitteen kanssa, pintamassa 515 kg/m².

Päällekkäisiksi tiloiksi mallinnettiin esimerkkitapaus kerrostalon keskikerrosten kulumahuoneista, jolloin toinen kantava seinä oli väliseinä ja toinen ulkoseinä sekä välipohjalaattojen suuntainen ulkoseinä oli ei-kantava ja toinen välipohjalaattojen suuntainen seinä oli huoneistojen sisäinen teräsrankainen levyseinä. Päällekkäisten tilojen erottavana rakenteena käytet-

Taulukko 7. Lasketut vierekkäisten huoneiden väliset ilmaääneneristysluvat R'_w , kun huoneistoja erottavana seinänä on 180 mm paksu betoniseinä.

Huoneiden mitat			Huoneiden välinen ilmaääneneristysluku R'_w [dB], kun ulko-seinän sisäkuoren paksuus on				
Pituus [m]	Leveys [m]	Lattia-ala [m ²]	SW	150 mm	120 mm	100 mm	80 mm
4	3,6	14,4	57,1	57,0	56,0	55,1	54,1
	4,8	19,2	56,9	56,8	56,0	55,3	54,5
	6,0	24,0	56,8	56,6	56,0	55,4	54,7
	7,2	28,8	56,6	56,4	55,9	55,4	54,8
5	3,6	18,0	56,8	56,7	55,6	54,7	53,8
	4,8	24,0	56,7	56,6	55,7	55,0	54,2
	6,0	30,0	56,5	56,4	55,7	55,1	54,4
	7,2	36,0	56,3	56,2	55,6	55,1	54,5
6	3,6	21,6	56,6	56,5	55,4	54,5	53,5
	4,8	28,8	56,5	56,4	55,5	54,8	54,0
	6,0	36,0	56,3	56,2	55,5	54,9	54,2
	7,2	43,2	56,2	56,0	55,4	54,9	54,3
7	3,6	25,2	56,5	56,4	55,2	54,3	53,3
	4,8	33,6	56,4	56,2	55,3	54,6	53,8
	6,0	42,0	56,2	56,0	55,3	54,7	54,0
	7,2	50,4	56,0	55,8	55,3	54,7	54,2
10	3,6	36,0	56,2	56,1	54,9	53,9	53,0
	4,8	48,0	56,1	55,9	55,0	54,2	53,5
	6,0	60,0	55,9	55,7	55,0	54,4	53,7
	7,2	72,0	55,7	55,5	54,9	54,4	53,9
13	3,6	46,8	56,0	55,9	54,7	53,7	52,8
	4,8	62,4	55,9	55,8	54,8	54,0	53,3
	6,0	78,0	55,7	55,5	54,8	54,2	53,5
	7,2	93,6	55,6	55,3	54,7	54,2	53,7

tiin 370 mm paksua ontelolaatastoa tasoitteen kanssa. Kantavina seininä olivat 180 mm tai 200 mm paksu väliseinä ja 150 mm paksu ulkoseinä. Välipohjalaattojen suuntainen ulkoseinä oli 80 mm, 100 mm, 120 mm tai 150 mm paksu betoniseinä.

Taulukossa 7 on esitetty erikokoisten vierekkäisten huoneiden lasketut ilmaääneneristysluvat R'_w , kun ulkoseinä rakenteena on joko ei-kantava betonisandwich-elementti tai eripaksuiset sisäkuorielementit. Laskelmissa vierekkäiset tai päällekkäiset huoneet olivat aina mitoiltaan symmetrisiä. Huonekoon ollessa pienempi kuin pienin mallinnettu huone saadaan parempia tilojen välisiä ääneneristävyyksiä.

Bastianilla tehtyjen laskelmien perusteella huoneistojen välisen ilmaääneneristykseen kannalta vierekkäiset symmetriset huoneet tulevat

mitoitettavaksi tapaukseksi. Verrattaessa eristerapattuja ulkoseinä rakenteita ei-kantavaan betonisandwich-elementtiin havaitaan, että:

- Ulkoseinän kautta tapahtuva sivutiesiirtymä eristerapatuilla ulkoseinillä vastaa betonisandwich-elementtirakenteista ei-kantavaa ulkoseinää, kun eristerapatun ulkoseinän sisäkuoren paksuus on vähintään 150 mm.

Kun välipohjarakenteet ja huoneistojen sisäinen väliseinä sekä rakenteiden väliset liitokset ovat vakioina, ei-kantavan betonisandwich-elementtirakenteisen ulkoseinän ja 180 mm paksun huoneistojen erottavan betoniseinän kanssa saavutettava huoneistojen välinen ilmaääneneristävyyden on vastaava kuin rakenneyhdistelmillä:

- Eristerapattu ulkoseinä, jonka sisäkuoren paksuus on 150 mm, ja 180 mm paksu huoneistoja erottava betoniseinä.

- Eristerapattu ulkoseinä, jonka sisäkuoren paksuus on 120 mm, ja 200 mm paksu huoneistoja erottava betoniseinä.

5 Suositeltavat rakenteet

Sisäkuorielementtien suositeltavien vähimmäispaksuuksien tavoitteena on, että sivutiesiirtymä ulkoseinän kautta ei ratkaisevasti heikennä asuinhuoneistojen välistä ilmaääneneristävyyttä sekä että sisäkuorielementtitekniikalla toteutettu ulkoseinä olisi betonisandwich-elementin kanssa sivutiesiirtymäreittinä tasavertainen.

Sisäkuorien suositeltavat vähimmäispaksuudet perustuvat laskelmissa mallinnettuihin tilanteisiin, joissa ei-kantavan ulkoseinän lisäksi rakenteellisina sivutiesiirtymäreitteinä vierekkäisissä huoneistoissa ovat olleet katto- ja lattiarakenteena tasoitettu 370 mm paksu ontelolaatas-to sekä huoneistojen sisäinen kevytrakenteinen levyväliseinä, ja päällekkäisissä huoneistoissa kantavat ulkoseinä ja väliseinä sekä huoneistojen sisäisen kevytrakenteinen levyväliseinä.

Käytettäessä asuinkerrostalossa huoneistoja erottavana väliseinärakenteena 180 mm paksuja betoniseiniä tulee eristerapatun ulkoseinän sisäkuoren betonielementin olla vähintään 150 mm paksu. Vastaavia asuinhuoneistojen välisiä ilmaääneneristävyyksiä asuinkerrostalossa saadaan käytettäessä huoneistoja erottavana väliseinärakenteena 200 mm paksuja betoniseiniä ja vähintään 120 mm paksua eristerapatun ulkoseinän sisäkuorta. Kummassakaan tapauksessa sisäkuoren paksuuden kasvattaminen suuremmaksi kuin 180 mm ei ole ulkoseinän kautta tapahtuvan sivutiesiirtymän kannalta enää perusteltua.

Tarkasteltujen eristerapattujen ulkoseinärakenteiden käyttämistä teliikennemelualueilla rakennuksen ulkoseinärakenteena selvitetiin äänitasoeromenetelmällä esimerkiksihuoneella, jonka mittasuhteet ja ikkunapinta-ala valittiin äänitasoeromenetelmän perusolettamusten mukaisiksi. Ulkovaipan kokonaisäänitasoerot laskettiin ikkunoiden ääneneristysarvoilla $R_w + C_{tr}$ 37 dB, 39 dB, 41 dB, 43 dB ja 45 dB. Laskettuja kokonaisäänitasoeroja verrattiin asemakaavan äänitasoerovaatimukseen $\Delta L_{A,vaad}$ 30 dB, 32 dB, 35 dB, 38 dB ja 40 dB. Suositeltavien rakenteiden perusteena on vähintään 120 mm paksu sisäkuori, joissain tapauksissa vaaditaan vähintään 150 mm paksu sisäkuori.

Ohutrappuja betonisisäkuorellisia ulkoseinärakenteita voidaan käyttää lämmöneristepaksuudesta ja -materiaalista riippumatta tavanomaisen 35 dB äänitasoerovaatimuksen yhteydessä. 38 dB äänitasoerovaatimus saavutetaan, kun ulkoseinän betonisisäkuoren paksuus on 150 mm ja lämmöneristeenä 160 mm paksu

mineraalivilla FAL1. Tarkastelluilla ohutrappuilla ulkoseinärakenteilla ei saavuteta 40 dB äänitasoerovaatimusta.

Kolmikeroseristerapattuja betonisisäkuorellisia ulkoseinärakenteita voidaan käyttää lämmöneristepaksuudesta ja -materiaalista riippumatta tavanomaisen 35 dB äänitasoerovaatimuksen yhteydessä. 38 dB äänitasoerovaatimus saavutetaan, lämmöneristepaksuudesta riippumatta, kun lämmöneristeenä on mineraalivilla FAS4 ja kun lämmöneristeenä on 450 mm paksu EPS. 40 dB äänitasoerovaatimus saavutetaan lämmöneristepaksuudesta riippumatta, kun lämmöneristeenä on mineraalivilla FAS4.

Lähteet

- [1] RIL 55-1967. Ääneneristysnormit. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- [2] RIL 55b-1971. Ääneneristysnormit (1967), sovellutuksia (1971). Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- [3] Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C1: Ääneneristys – Määräykset. Sisäasianministeriö. 1975.
- [4] Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C1: Ääneneristys – Määräykset. Sisäasianministeriö. 1985.
- [5] Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C1: Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa – Määräykset ja ohjeet. Ympäristöministeriö. 1998.
- [6] Betonirakenteiden ääniteknikka. Rakennustuoteollisuus RTT ry. 2000.
- [7] Kylliäinen, M. Talonrakentamisen akustiikka. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikan laitos. Tutkimusraportti 137. 2006.
- [8] Halme, A. Asuinrakennusten ääneneristys. Akustiikkapäivä, Helsinki 20.10.1993. Akustinen Seura ry.
- [9] Sipari, P., Nykänen, E. & Heinonen, R. Betonirakenteisten kerrostalojen ääniolot. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto, Suomen ympäristö 777. 2004.
- [10] Suurissa asuinhuoneissa liikaa meteliä – Mittaukset paljastivat puutteita ääneneristyksessä. Rakennuslehti 9.10.2008.
- [11] Rappauskirja 2005, BY 46. Suomen Betoniyhdistys ry.
- [12] Pentti, M. & Suonketo, J. Paroc vuorivilla -ohutrappausjärjestelmän käyttö uudisrakentamisessa. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan osasto, Talonrakennustekniikan laboratorio, Lausunto nro:1279. 2003.
- [13] Weber, L. & Brandstetter, D. Einheitliche schalltechnische Bemessung von Wärmedämm-Verbundsystemen. Fraunhofer-Ins-

- tüt für Bauphysik, IBP-Bericht B-BA 6/2002.
- [14] Rauhala, J. Eristerapatun betonielementtiulkoseinän ilmaääneneristävyys. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetun ympäristön tiedekunta, Rakennustekniikan laitos. 2009.
- [15] Rauhala, J. & Kylliäinen, M. Eristerapatun betoniseinän ilmaääneneristävyys. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Tutkimusraportti 142. 2009.
- [16] ISO 140-3: 1995. Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements. International Organization for Standardization.
- [17] ISO 717-1: 1996. Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation. International Organization for Standardization.
- [18] Hongisto, V. Monikerroksisen seinärakenteen ilmaääneneristävyypä ennustemalli. Työterveyslaitos, Työympäristötutkimuksen raporttisarja 2. 2003.
- [19] Cambridge, J. An evaluation of various sound insulation software and their applications in the design of Silent Rooms. Master's Thesis. Chalmers University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Applied Acoustics, Vibroacoustics Group. 2006.
- [20] Hongisto, V. Airborne sound insulation of wall structures – measurement and prediction methods. Teknillinen korkeakoulu, Akustiikan ja äänenkäsitelytekniikan laboratorio, Raportti 56. 2000.
- [21] Füreder, S., Kloimstein, H. & Müller, M. Die Auswirkungen von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) auf die Schalldämmung von Ziegelwänden. HTL1 Bau und Design, Höhere technische Bundeslehranstalt. 2007.
- [22] Kristensen, J. & Rindel, J. Bygningakustik. Teori og praksis. Statens Byggeforskningsinstitut, SBI-anvisning 166. 1989.
- [23] Bygga med prefab. Betongvaruindustrin, Internet- ja pdf-julkaisu, [viitattu 21.11.2008]. Saatavissa: <http://www.betongvaruindustrin.se/sv/Bygga-med-prefab/>
- [24] Simmons, C. Bastian-tietokoneohjelma, versio 2.3.88 (32 Bit), lisenssi Insinööri-tiimistö Heikki Helimäki Oy. Datakustik GmbH.
- [25] Kylliäinen, M. Rakennuksen ulkovaipan ääneneristyksen suunnittelu. Rakennustieto Oy, Rakentajain kalenteri 2009.
- [26] Weber, L. & Zhang, Y. & Brandstetter, D. Untersuchung der Schall-Längsdämmung von Außenwänden mit Wärmedämm-Verbundsystemen. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, IBP-Bericht B-BA 4/2002.
- [27] ISO 140-2: 1991. Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Determination, verification and application of precision data. International Organization for Standardization.
- [28] EN 12354-1: 2000. Building Acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings – Part 1: Airborne sound insulation between rooms. European Committee for Standardization.
- [29] Kylliäinen M. & Hongisto V. Rakennusten akustinen suunnittelu: akustiikan perusteet. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry, RIL 243-1-2007.
- [30] Halme-Salo, E. Sivutiesiirtymäilmiöistä rakennuksissa. Teknillinen korkeakoulu, Arkkitehtiosasto, Rakennesuunnittelun laitos. Julkaisu C 56/1983.