



RAKENTEELLINEN ENERGIATEHOKKUUS

Opas

Kimmo Lylykangas
Albert Andersson
Jari Kiuru
Jyri Nieminen
Juha Päätaalo

8.9.2015

tiivistelmä

Pohjoiseurooppalaisessa ilmastossa tilojen lämmitystarpeen vähentäminen on ollut ja säilyy jatkossakin energiatehokkaan rakentamisen kulmakivenä, vaikka energiatehokkuuden keinovalikoima onkin ajan kuluessa laajentunut käsittämään mm. monet uudet talotekniikan ratkaisut ja uusiutuvan omavaraisenergian. Tämä opas keskittyy rakenteellisen energiatehokkuuden ratkaisuihin lähes nollaenergiarakentamisessa, erityisesti asuinrakennusten hanke- ja arkkitehtisuunnittelussa, rakennesuunnittelussa ja toteutuksessa. Kun rakentamismääräysten (2012) vertailuarvojen mukaisia ratkaisuja ja tavanomaisia suunnittelu- ja toteutustapoja verrataan parhaisiin käytäntöihin, voidaan todeta että rakenteellisen energiatehokkuuden kaikkea energiansäästöpotentiaalia ei suinkaan vielä ole hyödynnetty.

Energiatehokkaan rakentamisen monia parhaita käytäntöjä tuottanut passiivirakentaminen perustuu rakenteelliseen energiatehokkuuteen. Rakenteellisella energiatehokkuudella tarkoitetaan rakennuksen tilojen lämmitystarpeen pienentämistä rakenteellisin ja arkkitehtuurin keinoin. Rakenteellisen energiatehokkuuden ratkaisut eivät riipu säädöstä tai käyttäjistä, eivätkä ne edellytä erityistä käytön opastusta.

Arkkitehtisuunnittelulla vaikutetaan merkittävästi rakennuksen energiantarpeeseen. Vaihtoehtoisten ratkaisumallien vaikutusta tilojen lämmitystarpeeseen voidaan verrata jo suunnittelun alkuvaiheessa ns. painotetulla muotokertoimella. Painotettu muotokerroin huomioi tilankäytön tehokkuuden ja rakennusosien erilaiset painoarvot lämpöhäviöiden ja tilojen lämmitystarpeen suhteen saman tilaohjelman ratkaisuvaihtoehtojen puitteissa.

Ikkunapinta-alan suurentaminen kasvattaa ulkovaipan lämpöhäviötä. Ikkuna-aukotuksen suunnittelussa energiatehokkuutta koskevien tarkastelujen vastapainona voidaan tarkastella sisätilojen luonnovalo-olosuhteita laskennallisten tunnuslukujen ja sisätilojen päivänvalosimuloinnin avulla. Hyvät luonnonvalo-olosuhteet ovat kestävän rakentamisen periaatteiden mukaisen asuinrakennuksen oleellinen laatutekijä.

Tavanomaista suuremman ikkunapinta-alan vaikutus voidaan kääntää energiatehokkuuden hyväksi hyödyntämällä lämmityskaudella aurinkoenergiaa passiivisesti ja varmistamalla riittävä kesäajan aurinkosuojaus. Aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen edellyttää suunnitteluyhteistyötä ja -osaamista, ja suomalaisia esimerkkejä ja mittaustuloksia on näiltä osin toistaiseksi vähän.

Hyvin lämmöneristetyllä ulkovaipalla pienennetään energiankulutusta ja varmistetaan hyvä lämpöviihtyvyys sisätiloissa. Rakenteellisen energiatehokkuuden ratkaisuista asuinrakennuksen lämpöviihtyvyyteen vaikuttavat huoneen ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden lisäksi myös ympäröivien rakenteiden pintalämpötilat. Vedon tunteen voi aiheuttaa rakenteiden vuotokohdista sisälle tuleva ilma tai alhaisista pintalämpötiloista johtuva ilman liike ja lämpösäteily.

Rakentamismääräysten vertailuarvoja paremman lämmöneristyksen on toisinaan arvioitu lisäävän rakennuksen jäähdytystarvetta. Herkkyystarkastelu kuitenkin osoittaa, että rakennuksen lämmöneristystason vaikutus jäähdytystarpeeseen on pieni verrattuna ikkunoihin liittyviin suunnitteluratkaisuihin sekä aurinkosuojaukseen, joiden vaikutus yllämpenemiseen on ratkaiseva. Yllämpenemistä ei siis hallita lämmöneristystasojen valinnalla vaan aurinkosuojauksella.

Rakentamismääräysten vertailuarvoja paremman lämmöneristyksen on myös pelätty heikentävän oleellisesti vaipparakenteiden vikasietoisuutta. Tämän oppaan kirjoittamisen yhteydessä analysoitiin 27 esimerkkirakenteen kosteusteknistä toimivuutta VTT-TTY-homeindeksimallin avulla. Tarkasteltujen rakenteiden lämmöneristystasot ovat

US 0,12...0,14 W/m²K

YP 0,07 W/m²K

AP 0,10 W/m²K.

Tarkastelut eivät tuoneet esille sellaista ongelmakohtaa, joka ei ratkeaisi rakenteiden asianmukaisella suunnittelulla ja huolellisella toteutuksella. Kosteudenhallinnan käytäntöjen sekä siihen liittyvän osaamisen kehittäminen suunnittelussa ja toteutuksessa on kuitenkin välttämätöntä lämmöneristystasoista riippumatta.

Matalaenergia- ja passiivitaloja on rakennettu jo parin vuosikymmenen ajan, hyvin lämmöneristettyjen rakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta on siis jo olemassa verrattain pitkäaikaista seurantatietoa. Parhaissa käytännöissä ennakoidaan muuttuvaa ilmastoa ja sen tulevaisuudessa aiheuttamaa säärasitusta.

Monikerrosrakenteet on tarkoitettu ilmanpitäviksi eristystasosta riippumatta. Rakennuksen ilmapuotoluvun systemaattinen mittaaminen parantaa osaamista sekä toimii yhtenä kosteusteknisen toimivuuden varmistusmenettelynä ja rakentamisen laadun mittarina.

Kylmäsilta-analyysin avulla rakennusosien liitosten kylmäsiltavaikutus voidaan minimoida. Kylmäsiltojen analysointi lisää ymmärrystä liitoskohtien kosteusteknisestä toimivuudesta ja oikeista toteutustavoista. Kun käytetään vakioituja rakenteita ja detaljeja, kylmäsilta-analyysia ei tarvitse tehdä hankekohtaisesti. Riskien ja rakennusvirheiden välttämisen näkökulmasta vakioitujen rakenneratkaisujen käyttämisellä on merkittäviä etuja hankekohtaiseen optimointiin ja jatkuvasti vaihtuviin rakenneratkaisuihin verrattuna.

Rakentamismääräysten vertailuarvoja paremman lämmöneristyksen kustannuksista on esitetty erilaisia arvioita. Taloudelliseen kannattavuuteen ja investoinnin takaisinmaksuaikaan vaikuttavat olennaisesti korkoa ja energian hintakehitystä koskevat oletukset, joihin liittyy suuria epävarmuustekijöitä.

Kestävän rakentamisen periaatteiden mukaisesti rakennuksen rungon ja ulkovaipan täytyy kestää rakennuksen koko käyttöiän ajan. Täydentäviä rakennusosia ja teknisiä järjestelmiä voidaan päivittää niiden käyttöiän päättyessä ja tasokorottaa tekniikan kehittyessä ja, mutta vuonna 2018 rakennettavan lähes nollaenergiatalon ulkovaippa on todennäköisesti käytössä sellaisenaan vuonna 2050, jolle on asetettu kunnianhimoisia ilmastotavoitteita – sekä vielä vuosikymmeniä sen jälkeenkin. Kun rakennuskannan halutaan tulevaisuudessa toimivan energiatehokkaasti ja vähäpäästöisesti, pitkäikäisimmissä rakennusosissa on syytä ennakoida tulevaa.

RAKENTEELLINEN ENERGIA TEHOKKUUS – OPAS

korjattu versio

17.9.2015

sisällysluettelo

1.	Johdanto	7
2.	Rakenteellinen energiatehokkuus	8
3.	Energiatehokkaan rakennuksen suunnittelu	10
3.1	Energiatehokkuustavoitteen asettaminen	10
3.1.1	Laskennallisena kulutuksena asetettava energiatehokkuustavoite	10
3.1.2	Rakennusosien ominaisuuksiin perustuva tavoitteenasettelu	10
3.1.3	Energiatehokkaan rakentamisen konseptit ja määritelmät	11
3.1.4	E-luku ja tavoite-energiankulutus	13
3.1.5	Elinkaaren hiilijalanjälki	13
3.1.6	Energiankäytön tai ylläpidon kustannukset	13
3.1.7	Ympäristöluokitukseen perustuva energiatehokkuustavoite	14
3.1.8	Tavoitteen asettaminen toteutuvalle energiankulutukselle	14
3.2	Suunnitteluprosessi	15
3.2.1	Suunnittelua tukeva energialaskenta	15
3.2.2	Energiatehokkuustavoite hankinta-asiakirjoissa	16
3.2.3	Rakenteiden toimivuutta koskevat selvitykset	17
3.2.4	Parhaat käytännöt	17
3.3	Laskentamenetelmät ja –työkalut	18
3.3.1	Rakennuksen energiankulutus	18
3.3.2	Uusiutuva omavaraisenergia	19
3.3.3	Hiilijalanjälki	20
3.3.4	Parhaat käytännöt	21
4.	Energiatehokkuus arkkitehtisuunnittelussa	22
4.1	Mitoitus - Tilaohjelma ja käyttöaste	23
4.2	Sijoittelu - suuntaus ja pienilmasto	24
4.2.1	Suuntaus	24
4.2.2	Pienilmasto	25
4.2.3	Parhaat käytännöt	27
4.3	Tehokas tilankäyttö	28
4.3.1	Tilankäytön tehokkuus	28
4.3.2	Parhaat käytännöt	28
4.4	Rakennuksen muoto	29
4.4.1	Muodon vaikutus energiankulutukseen	29
4.4.2	Muotokerroin luonnossuunnittelun apuvälineenä	29
4.4.3	Parhaat käytännöt	31

4.5	Ikkuna-aukotus	32
4.5.1	Ikkuna- ja ovipinta-alan vaikutus energiatehokkuuteen	32
4.5.2	Luonnonvalo-olosuhteet	33
4.5.3	Parhaat käytännöt	35
4.6	Aurinkosuojaus ja auringon passiivinen hyödyntäminen	37
4.6.1	Aurinkosuojaus	37
4.6.2	Aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen	38
4.6.3	Parhaat käytännöt	46
5.	Energiatehokas ulkovaippa	49
5.1	Lämmöneristys	49
5.1.1	Lämmöneristys energiatehokkuuden kulmakivenä	49
5.1.2	Lämpöviihtyvyys	50
5.1.3	Lämmöneristystason vaikutus sisätilan yllälämpenemiseen	51
5.1.4	Radiosignaalin läpäisevyys	52
5.1.5	Parhaat käytännöt	53
5.2	Ovet ja ikkunat	55
5.2.1	Energiatehokkaat ikkunat	55
5.2.2	Auringon säteilyn kokonaisläpäisevyys	56
5.2.3	Parhaat käytännöt	56
5.3	Kylmäsillat	58
5.3.1	Kylmäsillan määritelmä	58
5.3.2	Kylmäsiltojen merkitys	58
5.3.3	Kylmäsiltojen laskeminen	60
5.3.4	Kylmäsillat tyypillisissä rakenteissa – ongelmat ja ratkaisut	63
5.3.5	Parhaat käytännöt	72
5.4	Ulkovaipan ilmanpitävyys	73
5.4.1	Ulkovaipan ilmanpitävyyden merkitys	73
5.4.2	Ilmavuotoluvun mittaaminen	74
5.4.3	Parhaat käytännöt	75
5.5	Varaava massa	77
6.	Rakennusfysikaalinen toimivuus ja kosteudenhallinta	78
6.1	Rakenteiden kosteus- ja homeriskit ja niiden arviointi	78
6.1.1	Rakenteiden vikasietoisuus ja homeriskit	78
6.1.2	Kosteus- ja homeriskien laskennallinen tarkastelu	78
6.1.3	Ulkoilmaston merkitys	83

6.2	Rakenteiden toimivuus	86
6.2.1	Johtopäätöksiä laskentatuloksista	86
6.2.2	Parhaat käytännöt	87
6.3	Kosteudenhallinta	88
6.3.1	Kosteudenhallinnan laatutavoitteet	88
6.3.2	Kosteusriskien arviointi	89
6.3.3	Kosteudenhallintasuunnitelma	89
6.3.4	Työmaa-aikainen kosteudenhallinta	90
6.3.5	Käytön ja ylläpidon ohjeistus	91
6.3.6	Parhaat käytännöt	92
7.	Rakenteellisen energiatehokkuuden taloudellinen kannattavuus	93
7.1	Lämmöneristämisen kustannusvaikutukset	93
7.1.1	Vaikutus elinkaarikustannuksiin	93
7.1.2	Parhaat käytännöt	94
8.	Uusiutuvan energiantuotannon integrointi	98
8.1	Aurinkosähkö	99
8.2	Aurinkolämpö	99
8.3	Pientuulivoima	100
8.4	Pien- ja mikro-CHP	100
	LÄHTEET	101
	Standardit	101
	Rakentamismääräykset ja direktiivit	101
	Muut lähteet	102
	Internet-sivustot	105
	Kuvalähteet	105
	Taulukot, lähteet	107
	KÄSITTEITÄ	109
	LIITTEET	111
LIITE 1:	Oppaassa tarkastellut rakennetyypit	112
LIITE 2:	Kosteusteknisen toimivuuden tarkastelut, yläpohjarakenteet	140
LIITE 3:	Kosteusteknisen toimivuuden tarkastelut, ulkoseinärakenteet	158
LIITE 4:	Kosteusteknisen toimivuuden tarkastelut, alapohjarakenteet	172
LIITE 5:	Vantaa 2007 ja Vantaa 2030 säätiedot	188

1. Johdanto

Tämän oppaan tarkoituksena on kuvata rakenteellisen energiatehokkuuden parhaita käytäntöjä. Rakenteellisella energiatehokkuudella tarkoitetaan rakennuksen ulkovaipan ratkaisujen vaikutusta energiankulutukseen ja tässä yhteydessä erityisesti tilojen lämmitystarpeeseen. Oppaan painopiste on arkkitehtisuunnittelun energiatehokkuusratkaisuissa sekä hyvän ulkovaipan lämmöneristyksen ja ilmanpitävyyden suunnittelussa ja toteutuksessa. Ohjeistus keskittyy asuinrakennuksiin, joissa tilojen lämmitysenergia on tyypillisesti suurin energiankulutuksen osatekijä uusissakin rakennuksissa.

Energiatehokkuutta koskevien rakentamismääräysten nopea kehitys on herättänyt monenlaisia huolia. Yksi tämän ohjeen tavoitteista on jakaa kokemuksia ja raportoida seurantatuloksia toteutetuista energiatehokkaista rakennuskohteista. Oppaaseen kootun tiedon valossa monet rakenteellista energiatehokkuutta koskevat huolet vaikuttavat aiheettomilta. Samassa yhteydessä on kuitenkin todettava, että uusien ratkaisujen jatkuva kriittinen arviointi on tervetullutta ja jopa välttämätöntä, jotta koerakentamisesta yleiseen käyttöön valikoituvat ratkaisut tiedetään turallisiksi ja terveellisiksi.

Oppaan keskeistä sisältöä on 27 erilaisen rakennetyypin kosteusteknisen toimivuuden analysointi. Tarkasteluun valitut rakennetyypit ovat lämmöneristävyydeltään rakentamismääräysten vertailuarvoja selvästi parempia, mutta vielä kaukana parhaista arvoista, joita suomalaisissa toteutetuissa rakennuksissa on jo käytössä.

Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden analysointiin on käytetty VTT:n kehittämää homeindeksitarkastelua. Rakennushankkeen kosteudenhallinnan menettelyjen osalta tässä oppaassa tukeudutaan ohjeen RIL 250-2011 kuvaamiin menettelytapoihin. Oppaassa hyödynnetään myös aiemmin julkaistuja tutkimustuloksia. Lisäksi opas pyrkii kokemusperäisen tiedon, seurantatulosten ja energi-asimuloinnin avulla kuvaamaan parhaita käytäntöjä sekä energiatehokkuutta tukevia suunnitteluratkaisuja, joiden vaikuttavuudesta Suomen ilmastossa on tähän saakka ollut niukasti tietoa (esimerkiksi aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen). Uusiutuvan oma-varaisenergian ja talotekniikan tarkastelu rajataan tilatarpeisiin ja rakenteellisiin vaikutuksiin, koska ne eivät varsinaisesti kuulu tämän ohjeen aihepiiriin.

Opas on suunnattu rakentamisen ja rakennuttamisen ammattilaisille. Oppaan kuvaamat suunnitteluratkaisut on tarkoitettu vapaasti käytettäväksi, mutta niiden soveltuvuus, toteutettavuus ja taloudellinen kannattavuus on arvioitava hankekohtaisesti.

Luvut 6 ja 7¹ ovat olennaisilta osiltaan kirjoittaneet Jyri Nieminen ja Albert Andersson, Sweco Rakennetekniikka Oy. He ovat myös toteuttaneet rakennetyypien kosteusteknisen toimivuuden analyysit (liitteet 2–4). Luvun 5.3 on kirjoittanut Juha Päätaalo, joka on tehnyt detaljien kylmäsilta-analyysit. Muilta osin tekstin on kirjoittanut Kimmo Lylykangas yhteistyössä muiden kirjoittajien kanssa. Oppaan taiton ja kuvien käsittelyn on tehnyt Jari Kiuru.

Opas on laadittu RTT Eristeellisuuden ja ympäristöministeriön toimeksiannosta vuonna 2015. Työtä ohjasi ohjausryhmä, jonka jäseniä olivat:

Ari Ilomäki (puheenjohtaja)

Asso Erävuoma

Jussi Jokinen

Pekka Kalliomäki

Jyrki Kauppinen

Tapio Kilpeläinen

Tuuli Kunnas

Jarek Kurnitski

Pasi Käkelä

Juha Luhanka

Susanna Tykkä

Pasi Typpö

Antti Viitanen

Tero Virrantuomi

Mika Vuolle.

¹ Poislukien parhaita käytäntöjä koskevat luvut (6.1.4, 6.2.2, 6.3.6 ja 7.1.2), jotka on kirjoittanut Kimmo Lylykangas.

Lisäksi haluamme kiittää oppaan päärahoittajaa, Rakennustuotteiden Laatu Säätiötä.

2. Rakenteellinen energiatehokkuus

Suomalaisia uudisrakennuksia on toteutettu ja toteutetaan koko ajan huomattavasti rakentamismääräysten vertailuarvoja paremmin lämmöneristettyinä ja vertailuarvoa paremmalla ilmanpitävyydellä. Moni ammattirakennuttaja käyttää kaikessa uudisrakentamisessa rakentamismääräysten vertailuarvoja parempia ulkovaipan ratkaisuja, koska on kokemustensa perusteella arvioinut sen taloudellisesti kannattavaksi².

Tilojen lämmitystarpeen pienentämistä pidetään pohjoiseurooppalaisessa ilmastossa yleisesti hyvän energiatehokkuuden lähtökohdaksi. Energiantarpeen pienentäminen on ensimmäinen toimenpide ns. Kioton kolmion (Kioton pyramidin tai energiakolmion) esittämässä mallissa (kuva 1), jossa esitetään suositus energiatehokkuutta parantavien toimenpiteiden toteutusjärjestyksestä.

Energiatehokkaan rakentamisen monia parhaita käytäntöjä tuottanut passiivirakentaminen perustuu lähtökohtaisesti tilojen lämmitystarpeen pienentämiseen. Myös nettonollaenergiatalojen toteutus on perustunut tyypillisesti passiivitalotasoiseen ulkovaippaan ja talotekniikkaan, johon lisätään tarpeellinen määrä uusiutuvan omavaraisenergian tuotantoa vuotuisen energiantuotannon ja -kulutuksen nettonollataseen saavuttamiseksi.

Vaikka rakennusten energiatehokkuusdirektiivin (EPBD) mukainen energiatehokkuustavoite, lähes nollaenergiarakentaminen, on tuonut energiatehokkuuskeskusteluun keskiöön uusiutuvan omavaraisenergian, ulkovaipan ratkaisut säilyvät edelleen energiatehokkaan rakentamisen kulmakivenä.

Rakennuksen energiatehokkuutta parantavien keinojen priorisointia pohdittaessa on syytä kiinnittää huomiota rakennusosien suunnittelukäyttöikänsä. Ensimmäiset, vuonna 2018 valmistuvat lähes nollaenergiarakennukset ovat vuonna 2050 hieman yli 30 vuotta vanhoja (kuva 2). Rakennuksen eristyslasit, mahdollinen aurinkosähköjärjestelmä ja valtaosa talotekniikasta on siihen mennessä uusittu vähintään yhden kerran. Tämä uusiminen on tarjonnut mahdollisuuden näiden rakennusosien energiatehokkuuden ja ympäristöominaisuuksien tasokorotukseen, mikä onkin välttämätöntä jos vuodelle 2050 asetetut kunnianhimoiset ilmastotavoitteet halutaan toteuttaa. Vuonna 2018 valmistuneen rakennuksen rungolla ja ulkovaipalla sen sijaan on vuoden 2050 jälkeen vielä pitkä käyttöikä jäljellä, ja sen ulkovaipan rakennekerroksista uusimista kaipaavat todennäköisesti ainoastaan vesikatto ja pintakäsittelyt.

Korjausrakentamisesta tiedämme, että rakennusosia ei pääsääntöisesti ole kannattavaa uusia pelkästään energiatehokkuuden vuoksi, jos teknistä korjaustarvetta ei muuten ole. Edellä kuvattu esimerkki osoittaa, että energiatehokkuusratkaisuissa tulevaa kannattaa ennakoita erityisesti pitkäikäisimmissä rakennusosissa ja ulkovaipan rakenteissa.

Kuva 1. Kioton kolmio.



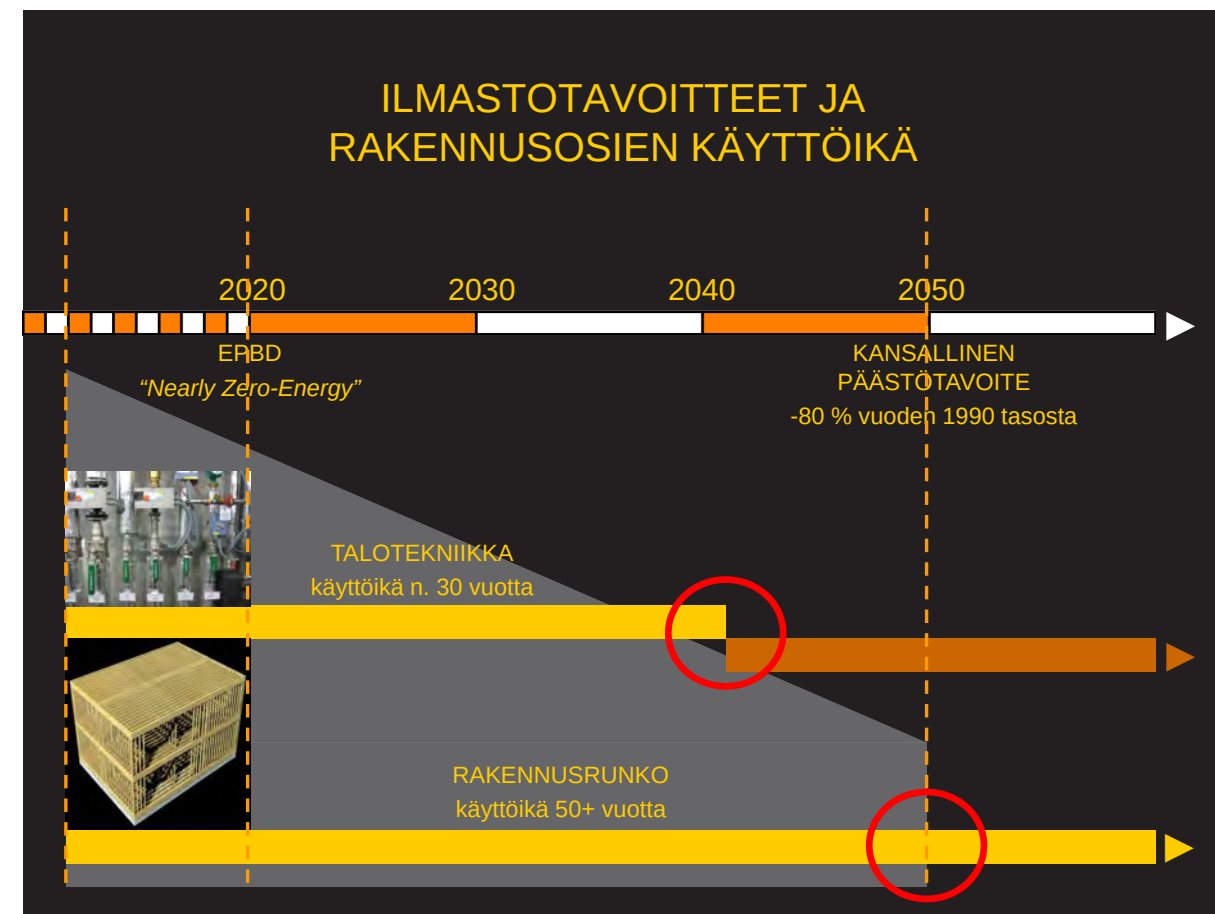
² Esimerkiksi Rakennusliike Reponen, TA-Asunnot Oy Oulun seudulla.

Monimutkaistuvat talotekniikkajärjestelmät haastavat kehittämään käyttöönoton ja ylläpidon menettelytapoja, jotta järjestelmät saadaan toiminaan keskenään yhteensopivasti ja säädöt pidettyä kohdallaan koko rakennuksen elinkaaren ajan. Rakenteellisen energiatehokkuuden ratkaisut eivät vaadi käyttäjän opastusta tai säätämistä. Kun tilojen lämmitystarve pienenee, lämmitysjärjestelmä voidaan mitoittaa pienemmäksi ja parhaassa tapauksessa yksinkertaisemmaksi.

Kasvihuonekaasupäästöjen leikkaamiseksi ominaisenergiankulutuksen rinnalla on tarkasteltava energiaverkkojen huippukuormia ja mahdollisuuksia niiden leikkaamiseen. Energiatehokkaan rakennuksen lämmitystehontarve on tyypillisesti olennaisesti tavanomaista rakennusta pienempi, vaikka lämmitystehon ero onkin pienempi kuin tilojen lämmitysenergiankulutuksen ero (Airaksinen & Vuolle 2013, 245).

Viimeaikaisten tutkimusten valossa vähäpäästöisimmät asuinrakennukset ovat hyvin lämmöneristettyjä uudisrakennuksia. *Suomen Ilmastoystävällisin kerrostalo 2013* -kilpailussa verrattiin asuinkerrostalojen elinkaaren hiilijalanjälkeä. Vertailussa menestyneille kohteille on yhteistä rakentamismääräysten vertailutasoa paremmin lämmöneristetty ulkovaippa. Vähäpäästöisimmiksi arvioitiin kaksi matalaenergiakerrostaloa: Järvenpään kaupungin vuokra-asuntoyhtiön rakennuttama betonirakenteinen Mestaritorppa sekä Rakennusliike Reposen Vantaan asuntomessuille rakentama puukerrostalokortteli (<http://figbc.fi/haaste2013/voittajat/>).

Pekka Hänninen tarkasteli vuonna 2014 julkaistussa tutkimuksessaan (Hänninen 2014) 13 omakotitalon ympäristövaikutuksia ja erityisesti materiaalivalmistuksen ja energiankäytön hiilijalanjälkeä. Energiankäytön kasvihuonekaasupäästöt laskettiin käyttäen saatavilla olevaa, mitattua tietoa energiankulutuksesta. Vuoden 2014 energiamuotojen CO₂e-päästökertoimilla vertailun vähäpäästöisimmäksi osoittautui Littoisiin vuonna 2009 valmistunut passiivitalo (Hänninen 2014, 28), jossa energiatehokkuustoimenpiteiden tavoitteena on ollut tilojen lämmitysenergian tarpeen minimoiminen.



Kuva 2. Ulkovaipan rakenteiden suunnittelukäyttöikä on pitkä, ja siksi ratkaisuissa on syytä ennakoida vuodelle 2050 asetetut ilmastotavoitteet ja alati paraneva rakennusten energiatehokkuus.

3. Energiatehokkaan rakennuksen suunnittelu

3.1 ENERGIATEHOKKUUSTAVOITTEEN ASETTAMINEN

Rakennushankkeen energiatehokkuustavoite on asetettava jo hankesuunnitteluvaiheessa. Rakennuttaja sitoutuu toteuttamaan asetetun tavoitteen ja sitouttaa edelleen pääsuunnittelijan ja muut suunnittelijat yhteiseen tavoitteeseen. On olemassa useita esimerkkejä rakennushankkeista, joissa energiatehokkuustavoite on asetettu kesken suunnitteluprosessin. Tästä lähtökohdasta tavoitteen saavuttaminen on vaikeaa ja epäonnistuu helposti. Energiatehokkuustavoitteen toteutettavuus tulee hankesuunnitteluvaiheessa tarkistaa laskennallisesti.

Energiatehokkuustavoitteen muuttaminen suunnitteluprosessin aikana aiheuttaa ylimääräistä työtä. Tämän vuoksi hankkeen energiatehokkuustavoite kannattaa kirjata konsulttisopimukseen. Sen voi olla esimerkiksi kaikkiin sopimuksiin liitettävä asiakirja, jossa suunnittelulle asetettava tavoite ja sen todentamistapa kuvataan yksiselitteisin tunnusluvin.

Kaikissa asuntorakennushankkeissa ei lainkaan tehdä hankesuunnitelmaa. Hankesuunnitelman laatiminen olisi kuitenkin erittäin suositeltavaa myös suunnittelunohjauksen ja kustannustenhallinnan näkökulmasta.

Energiatehokkaan rakennuksen suunnittelu rinnastuu *”design to cost”* -periaatteeseen, jossa suunnittelua ohjaa olennaisesti tavoitteeksi asetettu kustannustaso. Vaativalla energiatehokkuustavoitteella on vastaavanlainen, eri suunnittelijoiden työtä ohjaava vaikutus. Tavoitetason saavuttaminen tarkoituksenmukaisin ratkaisuin ja kustannustehokkaasti edellyttää suunnitteluyhteistyötä.

3.1.1 Laskennallisena kulutuksena asetettava energiatehokkuustavoite

Rakennushankkeen energiatehokkuustavoite voidaan asettaa esimerkiksi

- rakennusosien ja talotekniikkajärjestelmien ominaisuuksille
- E-luvulle
- tavoite-energiankulutukselle
- energiankäytön kasvihuonekaasupäästöille
- rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljelle
- energiankäytön kustannuksille tai ylläpitokustannuksille.

3.1.2 Rakennusosien ominaisuuksiin perustuva tavoitteenasettelu

Energiatehokkuustavoite voidaan määritellä asettamalla hankekohtaisesti voimassa olevaa määräystasoa paremmat vaatimukset ulkovaipan rakennusosien lämmöneristävyydelle ja ilmanpitävyydelle. Esimerkiksi talotehtaiden ratkaisuissa tämä menettely mahdollistaa rakennetyyppien ja liitosdetaljien vakioimisen.

Tässä tapauksessa rakennuksen lämmitystarve, E-luku ja tavoite-energiankulutus riippuvat muista suunnitteluratkaisuista, mm. rakennuksen koosta, ulkovaipan muodosta sekä ovi- ja ikkunapinta-alasta. Menettelyn etuna on se, että käytettävien rakennusfysikaalinen toimivuus voidaan tutkia ja rakenteiden toteutustapa optimoida. Toistuvat ratkaisut opitaan tekemään nopeasti ja luotettavasti.

Kokonaisenergiatarkastelun tultua suomalaisiin rakentamismääräyksiin ennalta määriteltyihin U-arvoihin ja toistettaviin rakennustyyppeihin perustuvaa lähestymistapaa alettiin pitää vanhanaikaisena. Riskien ja rakennusvirheiden välttämisen näkökulmasta vakioitujen rakennratkaisujen käyttämisellä on kuitenkin merkittäviä etuja hankekohtaiseen optimointiin ja jatkuvasti vaihtuviin rakennratkaisuihin verrattuna.

3.1.3 Energiatehokkaan rakentamisen konseptit ja määritelmät

Energiatehokkuustavoitteen asettamisessa voidaan viitata rakennuskonsepteihin tai määritelmiin, jotka kuvaavat yhdellä nimityksellä tavoitetasoa, esimerkiksi

- passiivitalo (kansainvälinen passiivitalomääritelmä tai suomalainen passiivitalomääritelmä)
- active house
- nettonollaenergiatalo

Määritelmissä on erilaisia painotuksia ja vaihtelua, jonka vuoksi tavoitetaso on syytä purkaa vielä tunnusluvuiksi tai muiksi indikaattoreiksi, joiden avulla asetetun tavoitteen toteutuminen voidaan osoittaa suunnitelmista ja/tai työmaamittauksin.

Saksalaisen Passivhaus Institutin asettama *kansainvälinen passiivitalomääritelmä* määrittelee tavoitetasojen lisäksi tarkasti myös energiatehokkuustavoitteen todentamiskäytännöt. Laskentatyökaluna on käytettävä PHPP-laskentaohjelmaa, ja käytettävät lähtötiedot on ohjeistettu yksityiskohtaisesti. Energiankulutus lasketaan todellisen sijaintipaikan mukaan, mikä merkitsee käytännössä sitä, että tilojen lämmitystarpeelle tai lämmitysteholle asetettu kriteeri on sitä vaikeampi saavuttaa, mitä pohjoisempana rakennetaan. Koska määritelmä on asetettu lattiapinta-alaa (*treated floor area*, vastaa pääpiirteissään huonealojen summaa) kohti, lämmitysenergiaa tai -tehoa koskeva kriteeri on sitä haastavampi, mitä pienempi rakennus on (esim. Rongen 2008). Vuonna 2015 Passivhaus Institut lanseerasi passiivitaloille lisämääreet *Classic*, *Plus* ja *Premium*, joissa asetetaan aiempien kriteerien lisäksi vaatimustasoja uusiutuvan energian osuudelle primäärienergiana ilmoitettuna.

Suomalainen passiivitalomääritelmä on väljemmin asetettu, ja se sallii erilaisten laskentaohjelmien käytön. Siinä ilmastovyöhykkeeseen sidottu tavoitetaso tilojen lämmitysenergiantarpeelle kuvaa suuruusluokan tasolla rakennuksen, jota meidän ilmastossamme voitaisiin kutsua passiivitaloksi. Yleisimmin käytettyä suomalaista passiivitalomääritelmää ei ole dokumentoitu mihinkään viralliseen asiakirjaan, vaan se on muodollisesti yhä tutkijoiden ehdotus saksalaisperäisen energiatehokkuustavoitteen lokalisoinnista. Tilojen lämmitysenergiantarpeelle asetettu tavoitetaso lasketaan bruttoneliömetriä kohti.

Kansainvälisen ja suomalaisen passiivitalomääritelmän eroja ja yhtäläisyyksiä on esitetty kuvassa 3.

Active house kokoaa yhteen rakennuksen sisäolosuhteisiin, energiankulutukseen ja ympäristöominaisuuksiin liittyviä tavoitetasoja. Määritelmän tunnettuutta ja käyttöä edistää voittoa tavoittelematon, tanskalaislähtöinen organisaatio, The Active House Alliance.

Nettonollaenergiatalo voidaan määritellä usealla eri tavalla. Yhteistä erilaisille määritelmille on se, että niissä laskennallisen vuotuisen energiataseen (taserajan yli rakennukseen ja rakennuksesta vietävän energian määrä) tulee olla nolla. Eroja määritelmiin syntyy mm. tarkasteltavasta energiasta, erilaisista laskentatavoista ja taserajan määrittelystä.

	KANSAINVÄLINEN PASSIIVITALO- MÄÄRITELMÄ	SUOMALAINEN PASSIIVITALO- MÄÄRITELMÄ
		ETELÄ KESKI POHJ.
TILOJEN LÄMMITYSENERGIAN TARVE kWh/(m²a)	max. 15	max. 20 max. 25 max. 30
KOKONAISPRIMÄÄRIENERGIAN TARVE kWh/(m²a)	max. 120	max. 130 max. 135 max. 140
ILMANVUOTOLUKU	max. 0.6	max. 0.6 max. 0.6 max. 0.6
KÄYTETTÄVÄ PINTA-ALA	nettolattiapinta-ala	bruttoala
LASKENTAMENETELMÄ	PHPP	vapaasti valittavissa

Kuva 3. Kansainvälinen ja suomalainen passiivitalomääritelmä.

Lähes nollaenergiatalo viittaa tulevaan rakentamismääräysten energiatehokkuusvaatimukseen uudisrakentamisessa. Lähes nollaenergiatalo määritellään Euroopan Unionin maissa eri tavoin. Yhteistä määritelmille on se, että ne perustuvat rakennusten energiatehokkuusdirektiiviin (EPBD). Lähes nollaenergiatalolla tarkoitetaan rakennuksia, joiden energiatehokkuus on erittäin korkea, ja joiden tarvitsema vähäinen energia katetaan hyvin laajalti uusiutuvalla energialla (<http://www.ym.fi/lahesnollaenergiarakentaminen>). EPBD:n mukaisesti implementoituina uudet energiatehokkuusvaatimukset koskevat vuoden 2018 jälkeen viranomaisten käytössä ja omistuksessa olevia uusia rakennuksia ja vuoden 2020 loppuun mennessä kaikkia uudisrakennuksia. Ennen määräysten voimaantulusta lähes nollaenergiatalo merkitsee siis energiatehokkuustavoitteena tulevien määräysten vähimmäisvaatimuksen ennakoimista.

Matalaenergiatalo ymmärretään eri yhteyksissä eri tavoin. Usein sillä tarkoitetaan yleisesti energiatehokkuudeltaan rakentamismääräysten vertailuarvojen mukaista tasoa parempaa rakennusta. Joissakin yhteyksissä matalaenergiarakentamista on käytetty erilaisia energiatehokkuustasoja kuvaavassa luokittelussa, esimerkiksi normitaso (määräysten vertailuarvojen mukainen toteutus) – matalaenergiatalo – passiivitalo. Silloin kun matalaenergiatalolla viitataan määräystasoa (tai vertailuarvoja) parempaan energiatehokkuuteen, määritelmä muuttuu käytännössä aina kansallisten energiatehokkuusvaatimusten päivittyessä. Matalaenergiarakentamiseen viittaava määritelmä esiintyy Maankäyttö- ja rakennuslain kohdassa, jonka mukaan asemakaavamääräystä kaukolämpöön liittymisestä ei sovelleta ”rakennukseen, jonka laskennallinen lämpöhäviö on enintään 60 % rakennukselle määritetystä vertailulämpöhäviöstä” (MRL 57a§).

3.1.4 E-luku ja tavoite-energiankulutus

Rakennuksen laskennallista ominaisenergiankulutusta pääkaupunkiseudun ilmastossa kuvaava E-luku huomioi käytetyt energiamuodot Valtioneuvoston asetuksessa määriteltyjen kertoimien avulla (Valtioneuvoston asetus 9/2013). E-luku mahdollistaa suunnitteluratkaisujen energiatehokkuuden vertailun samaa rakennustyyppiä edustavien kohteiden välillä sijaintipaikasta ja käytöstä riippumatta. E-lukuun perustuva energiatehokkuustavoite voi viitata rakennusten energiatehokkuusluokitukseen tai määritellä numeerisesti tavoitetason. E-luku ja rakennuksen tavoite-energiankulutus ovat kuitenkin kaksi eri asiaa. E-luvun ensisijainen käyttötarkoitus on määräystenmukaisuuden todentaminen ja rakennusten vertailu.

Tavoite-energiankulutuksen laskennassa pyritään ennakoimaan toteutuvaa energiankulutusta mahdollisimman totuudenmukaisesti, jolloin laskennassa asetettavien lähtötietojen ja oletusarvojen tulee vastata mahdollisimman tarkkaan ennakoitua käyttöä ja toteutuvia ratkaisuja. Energiankäytön kustannukset ja elinkaaren hiilijalanjälki on tarkoituksenmukaista arvioida tavoite-energiankulutuksen avulla.

3.1.5 Elinkaaren hiilijalanjälki

Energiankäytön ympäristövaikutuksilla viitataan yleensä kasvihuonekaasupäästöihin. Rakennuksen suunnittelulle asetettava ympäristötavoite voidaan asettaa rakennuksen energiankäytön CO₂e-päästöinä tai rakennuksen koko elinkaaren hiilijalanjälkenä, jonka vaiheet on määritelty standardissa EN 15804.

Suomalaisen rakentamisen näkökulmasta relevantein ohjeistus rakennuksen energiankäytön hiilijalanjäljen laskentaan on esitetty standardissa EN 15978. EN-standardien mukaista tarkastelua on sovellettu mm. GBC Finlandin Rakennusten elinkaarimittareissa. Esimerkiksi verkkosähkön käytön CO₂e-päästö tulevaisuudessa on arvioitava kansallisten päästökehitysskenaarioiden avulla.

3.1.6 Energiankäytön tai ylläpidon kustannukset

Rakennusten energiatehokkuustavoitteen asettaminen perustuu tyypillisesti ylläpitokustannusten pienentämiseen. Tavoitetta ei kuitenkaan yleensä aseteta euromääräisesti.

Energiansäästötoimenpiteitä sen sijaan arvioidaan usein takaisinmaksuajan tai tuottokertoimen avulla. Molemmissa tunnusluvuissa investointivaiheen lisäkustannus suhteutetaan ylläpitokustannuksissa saavutettaviin säästöihin. Merkittäviä epävarmuustekijöitä liittyy mm. energian hintakehitykseen.

3.1.7 Ympäristöluokitukseen perustuva energiatehokkuustavoite

Energiatehokkuustavoite voi myös määrittää hankkeelle asetetun muun vaatimustason kautta, esimerkiksi ympäristöluokitustavoitteen (BREEAM, LEED, DGNB tms.) kautta. Esimerkiksi BREEAM- ja LEED-ympäristöluokituksissa energiatehokkuutta pisteytetään vertaamalla suunnitteluratkaisun simuloitua energiankulutusta laskennallisesti määriteltävään vertailutasoon.

3.1.8 Tavoitteen asettaminen toteutuvalle energiankulutukselle

Hankkeen energiatehokkuustavoite määritellään harvoin todellisuudessa toteutuvan energiankulutuksen enimmäisarvona. Tämä johtuu siitä, että säätilan ja käytön vaihtelut voivat suuresti vaikuttaa toteutuvaan energiankulutukseen. Esimerkiksi asuntoa asuvan ruokakunnan koko vaikuttaa toteutuvaan energiankulutukseen ratkaisevasti.

Energiaverkoista riippumattomiksi suunniteltavat *off-grid* -rakennukset on suunniteltava epäedullisimman tilanteen perusteella, joka koskee kohteen energiantuottoratkaisuja, energian varastointikapasiteettia ja energiankulutusta. Mikäli energiankäyttö on tavanomaista eikä jousta saatavuuden mukaan (esimerkiksi loma-asumisen tapaan), energiaomavaraisen rakennuksen investoinnit nousevat helposti suuriksi akku- tai varavoimaratkaisujen vuoksi – tai vaihtoehtoisesti oma energiantuotanto on pääosan ajasta ylimitoitettua.

3.2 SUUNNITTELUPROSESSI

3.2.1 Suunnittelua tukeva energialaskenta

Energiatehokkaan rakennuksen suunnittelu onnistuu parhaiten tiivissä suunnitteluyhteistyössä. Rakennussuunnitelmat laaditaan vuorovaikutteisessa suunnitteluprosessissa, jossa energialaskentaa hyödynnetään suunnitteluratkaisujen kehittämiseen. Pääsuunnittelijan rooli suunnitteluryhmän vetäjänä ja riittävän vuorovaikutuksen ja tiedonsiirron varmistajana korostuu.

Energialaskenta on syytä aloittaa mahdollisimman varhaisessa vaiheessa suunnitteluprosessia. Useassa eri yhteydessä on todettu, että rakennuksen energiatehokkuuteen voidaan vaikuttaa erityisesti suunnittelun alkuvaiheessa (esim. Lappalainen 2010, 9).

Suunnittelua ohjaavat myös monet muut tekijät kuin energiatehokkuustavoite. Energialaskennan avulla suunnittelun aikana voidaan aktiivisesti seurata, onko energiatehokkuustavoite toteutumassa valituilla ratkaisuilla, vai edellyttääkö suunnitelma kehittämistä. Energiatehokkuutta parantavia suunnitteluratkaisuja arvioidaan tyypillisesti niiden vaikuttavuudella suhteessa investointi- ja ylläpitokustannuksiin.

Energialaskennan tuloksiin vaikuttavat kaikkien suunnittelualojen ratkaisut. Kukin suunnittelija voi ehdottaa energiantarvetta pienentäviä muutoksia. Energialaskija arvioi muutosten vaikuttavuuden ja riittävyyden tavoitteeseen nähden. Tässä suhteessa prosessi muistuttaa suunnittelun aikana toteutettavaa, tavoitteellista kustannuslaskentaa. Tyypillisiä muutoksia ostoenergian ominaiskulutuksen pienentämiseksi ovat esimerkiksi ikkunapinta-alan pienentäminen, lämmöneristystason parantaminen, tehokkaamman lämmönlämmittimen valitseminen tai käytettävän energiamuodon vaihtaminen. Suunnitteluprosessin tuloksena valmiita pääpiirustuksia vastaavan energialaskelman tulisi täyttää asetetut tavoitteet riittävällä marginaalilla. Esimerkki suunnitteluratkaisujen kehittämisestä energiatehokkuustavoitteen saavuttamiseksi on kuvattu taulukossa 1.

Pääsuunnittelijan on varmistettava, että energialaskijalla on käytettävissä viimeisimmän suunnitelmaversion mukaiset lähtötiedot laskentaa varten. Energialaskijan on hyvä liittää tuloslaskelmaansa laskennan lähtötiedot.

Ensimmäisten energialaskelmien tulos ei välttämättä heti täytä asetettuja tavoitteita. Tämä ei merkitse sitä, että suunnittelussa olisi puutteita tai virheitä, mutta suunnitelmia on aktiivisesti kehitettävä energiantarpeen pienentämiseksi. Tämä edellyttää eri suunnittelualojen yhteistyötä.

Valitettavan usein energialaskenta tehdään vasta valmiista suunnitelmista esimerkiksi energiatodistusta varten. Silloin laskennan suunnittelua ohjaava vaikutus jää kokonaan hyödyntämättä. Merkittävien muutosten tekeminen suunnitelmaan saattaa olla hankalaa tai mahdotonta suunnitelmien ollessa jo pitkällä.

Mikäli suunnitteluratkaisuja joudutaan myöhemmässä vaiheessa muuttamaan, energialaskelma on päivitettävä. Pääsuunnittelija vastaa siitä, että energialaskenta on ajan tasalla ja että valmis suunnitelma täyttää asetetun energiatehokkuustavoitteen.

Taulukko 1. Esimerkki energialaskennan hyödyntämisestä energiatehokkaan pientalon suunnittelussa. Eri suunnittelualojen ratkaisuja koskevien muutosten yhteisvaikutuksesta suunnitelma täyttää lopulta tilojen lämmitystarpeelle asetetun energiatehokkuustavoitteen riittävällä marginaalilla (Lylykangas 2009, 33-34).

LASKENTATAPAUSET	BRUTTOALA	TILOJEN LÄMMITYSENERGIANTARVE			
		TILAT	ILMANVAIHTO	YHTEENSÄ	kWh/(m²a)
LUONNOS LÄHTÖTILANTEESSA	178,7	3711,1	1117	4828,1	27,0
US U → 0,08 W/m²K ja YP U → 0,07 W/m²K	178,7	3282	1111	4393	24,6
pohjoisjulkisivun iso ikkuna, muutos - 6 m² muut ikkunat, muutos -1 m²	178,7	2958,2	1110,1	4068,3	22,8
ikkunat, lasi U → 0,5 W/m²K	178,7	2539,2	1110,1	3649,3	20,4
korkean tilan huonekorkeus: 3,6 m → 3,2 m	178,7	2410,9	1109,9	3520,8	19,7
kotona-poissa -kytkin: IV 50 % klo 9-15	178,7	2356,4	959,7	3316,1	18,6

3.2.2 Energiatehokkuustavoite hankinta-asiakirjoissa

Hankintavaiheessa energialaskennan lähtötietoja käytetään hankintakriteereinä. Rakennuksen energiatehokkuuden kannalta keskeisiä hankintakriteereitä ovat tyypillisesti esimerkiksi rakennusosien U-arvot ja lämpöpumppujen hyötysuhdevaatimukset. On suositeltavaa käyttää suunnitteluvaiheen energialaskennassa ainoastaan sellaisia lähtötietoja, joita vastaavat hankinnat ovat kilpailutettavissa. Vaatimukset täyttäviä ratkaisuja tulisi siis löytyä vähintään kolmelta eri toimittajalta.

Kaikki energialaskennan tuloksiin vaikuttavat lähtötiedot on kirjattava hankinta-asiakirjoihin, jotta voidaan varmistaa lopputuloksen täyttävän asetetun energiatehokkuustavoitteen.

Rakennuksen ominaisuuksia koskevien tavoitteiden toteutuminen voidaan vastuuttaa osittain tai kokonaan urakoitsijalle. Näin on yleensä tehtävä esimerkiksi ilmavuotolukutavoitteen suhteen. Hankinta-asiakirjoissa yksilöidään mittausmenetelmä ja ilmavuotoluksuaatimus sekä määritellään mittauksen lukumäärä ja toteutustapa. Riittävän ilmanpitävyyden edellyttämät korjaustoimenpiteet työmaalla voidaan määritellä tilaajan tai urakoitsijan kustannuksiksi. Mittaustyö on selkeästi määriteltävä joko urakoitsijan tai tilaajan hankinnaksi. Hyvän ilmatiiviyn edellytykset luodaan rakenneratkaisuilla ja detaljisuunnitelmilla, jotka tekevät ilmatiiviin kerroksen toteuttamisen työmaalla helpoksi.

3.2.3 Rakenteiden toimivuutta koskevat selvitykset

Jos energiatehokkuustavoitteen saavuttamiseksi tai muusta syystä käytetään rakennetyyppejä tai liitosdetaljeja, joiden kosteusteknisestä toimivuudesta ei ole varmuutta, pääsuunnittelijan tulee esittää kosteusteknisen toimivuuden selvittämistä. Näin on menetelty esimerkiksi tavanomaista suurempia lämmöneristedimensioita käytettäessä.

Ennen kosteusteknisen toimivuuden analysointia on syytä tarkistaa, onko vastaavanlaisen rakenteen toimivuutta jo selvitetty jossain toisessa yhteydessä. Koerakennushankkeissa ja materiaalivalmistajien toimesta on selvitetty verrattain monen erilaisen matalaenergiarakenteen toimivuus. Useassa tapauksessa rakenteen toimivuudesta on myös seuranta- ja mittaustuloksia.

Kosteusteknisen toimivuuden analysoinnin voi tehdä rakennesuunnittelija tai ulkopuolinen konsultti. Tämä on rakennuttajan lisäkustannus, joka ei sisälly tavanomaisiin suunnittelijoiden tehtäviin. Kosteusteknisen toimivuuden analysoinnissa on syytä tarkastella rakennetyypin lisäksi esimerkiksi erilaisten ulkoseinätyyppien liitoskohtia ja ulkonurkkaa, jossa uloimpien rakennekerrosten lämpötilat ovat tyypillisesti alhaisemmat kuin suoralla seinäosuudella.

3.2.4 Parhaat käytännöt

Integroiduksi suunnitteluksi tai *integroivaksi* suunnitteluksi kutsutaan työtapaa, jossa hankkeen erilaisia tavoitteita lähestytään kokonaisvaltaisesti ja monialaista suunnittelua toteutetaan tiiviissä yhteistyössä.

Big Room -työskentelyssä hankekohtaisesti kootulle suunnittelutiimille järjestetään yhteinen työtila, jossa keskeiset suunnitteluratkaisut tehdään tiiviissä yhteistyössä. Tila voi sijaita rakennuskohteessa. Eri alojen suunnittelijat, urakoitsijat, tilaaja, rakennuttaja ja käyttäjän edustajat osallistuvat tasa-arvoisesti työskentelyyn. Big Room parantaa tiedonkulkua, suunnitelmien yhteensovittamista, parhaiden käytäntöjen jakamista sekä suunnittelijoiden muuta vuorovaikutusta, joka suunnitteluaikeiden paineessa jää helposti heikoksi. Tavoitteena on tehostaa suunnittelu- ja rakentamisprosessia kokonaisuutena. Big Room -työskentelytapa soveltuu erinomaisesti hankkeeseen, jossa on asetettu vaativa energiatehokkuustavoite.

Keskieuropalaisen passiivitalomääritelmän kriteerit täyttävän rakennuksen suunnittelu energialaskentaa hyödyntäen on dokumentoitu lukuisissa konferenssipapereissa. Riippumatta siitä, pidetäänkö valittua energiatehokkuustavoitetta kaikissa tapauksissa taloudellisesti tai ympäristön kannalta perusteltuna, passiivitalohankkeissa toistuva optimointi on hyvä malli suunnitteluprosessista, jossa energialaskenta auttaa leikkaamaan tarpeetonta energiankulutusta. Passivhaus Institutin asettamat kriteerit ovat osoittautuneet keskieuropalaisessa ilmastossa siinä mielessä sopivaksi energiatehokkuustavoitteeksi, että ne on voitu yleensä saavuttaa pienissäkin rakennuksissa suunnitteluratkaisuja kehittämällä ja kohtuullisin kustannuksin. Optimointiin on kannustanut myös excel-pohjaisen PHPP-laskentaohjelman edullinen hinta ja pelinomainen luonne: kun yksityiskohtaiset lähtötiedot on kerran saatu syötettyä ohjelmaan, erilaisten suunnitelmamuutosten vaikutusta lopputulokseen on helppo testata lukuarvoja vaihtamalla.

3.3 LASKENTAMENETELMÄT JA –TYÖKALUT

3.3.1 Rakennuksen energiankulutus

Rakennuksen energiankulutuksen laskentaan on kehitetty suuri määrä erilaisia laskentatyökaluja. Suomen rakentamismääräykset sallivat erilaisten laskentatyökalujen käyttämisen määräystenmukaisuuden osoittamisessa.

Energialaskennan taustalla on useita EN-standardeja, joilla harmonisoidaan energiankulutuksen laskentamenetelmiä. Laskentamenetelmien luotettavuus voidaan osoittaa erilaisilla validoinneilla. Eri ohjelmien antamissa laskentatuloksissa on voitu enimmillään osoittaa jopa 15 %:n ero (Kalema et al. 2006, 76–77).

Määräystenmukaisuuden osoittamisessa käytettävät lähtötiedot ovat erkaantumassa tavoite-energiankulutuksen laskennasta, jolla pyritään osoittamaan toteutuva energiankulutus mahdollisimman realistisesti. Mikäli suunnittelua keskeisesti ohjaava E-luku määritellään tulevaisuudessa taserajan yli myytävän ja ostettavan energian vuositaseeksi, E-luku etääntyy yhä enemmän rakennuttajalle hyödyllisistä tunnusluvuista³. Tämä kehitys on jo nykyisin johtanut kaksinkertaiseen energialaskentaan. Toisaalta E-luvun laskentatapa tekee tuloksista vertailukelpoisia, kun esimerkiksi maantieteellisen sijainnin vaikutus energiankulutukseen on eliminoitu.

Jos energiatehokkuustavoite asetetaan E-lukuna, on johdonmukaista noudattaa hankekohtaisen energiatehokkuustavoitteen toteutumista osoitettaessa systemaattisesti Suomen Rakentamismääräyskokoelman mukaisia lähtötietoja⁴ ja laskentatapoja. Tavoite-energiankulutuksen laskennassa periaatteena voi pitää suunnitellun käyttötilanteen mahdollisimman totuudenmukaista mallintamista.

Tarkimmat tiedot rakennuksen ennakoidusta energiankäytöstä ja sisäolosuhteista saadaan käyttämällä dynaamista simulointiohjelmia. Dynaamiset simulointiohjelmistot laskevat energiankulutuksen tuntitasoisesti tai vieläkin pienemmällä aikaresoluutiolla. Tuntitason tietoa tarvitaan esimerkiksi silloin, kun lasketaan rakennuskohtaisista uusiutuvan energian tuottojärjestelmistä hyödyksi saatavaa osuutta. Suomessa käytettäviä dynaamisia simulointiohjelmistoja ovat esimerkiksi Consolis Energy, IDA Indoor Climate and Energy, SciaQPro, TASE, VIP, Riuska ja VTT Tallo.

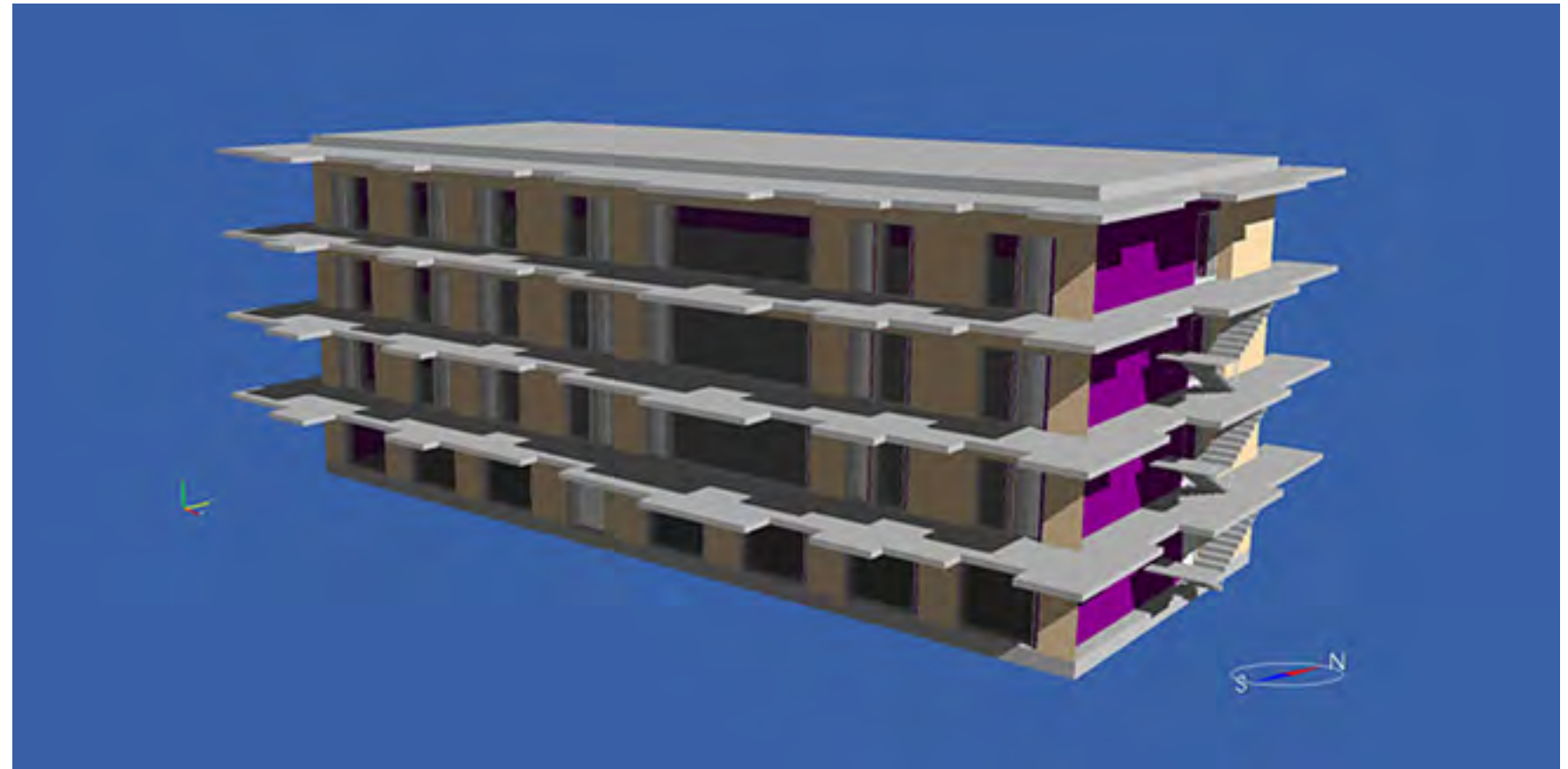
Energiasimulointiohjelmat voivat yleensä hyödyntää rakennuksen 3D-mallia. Tiedonsiirto onnistuu yleensä sujuvimmin yksinkertaistetun mallin avulla (kuva 4). Mallin mukana energialaskentaohjelmaan voidaan viedä tieto rakennuksen muodosta, tilajaosta, aukoksesta, suuntauksesta, rakenteista, varjostuksista ja ikkunoiden ominaisuuksista.

Yksinkertaistetussa laskennassa koko sisätila tai asuinkerros voi muodostaa yhden lämpövyöhykkeen. Yksityiskohtaisemmassa mallinnuksessa kukin tila muodostaa oman lämpövyöhykkeensä. TkT Miimu Airaksinen ja TkL Mika Vuolle ovat osoittaneet, että tehoa laskettaessa monivyöhykemalli antaa tarkemman tuloksen kuin yhdellä vyöhykkeellä laskettaessa (Airaksinen & Vuolle 2013, 242). Esimerkiksi ylälämpenemistä koskevissa tarkasteluissa tarvitaan tilakohtaista tarkastelua. Aurinkoenergian passiivista hyödyntämistä tarkasteltaessa ohjelman tulee huomioida myös tilojen välinen lämmönsiirtyminen.

Kuukausitason laskentaohjelmilla voidaan laskea luotettavasti vuotuinen energiankulutus ja osoittaa suunnitelman määräystenmukaisuus. Passiivitalojen energialaskentaan kehitetyllä PHPP-ohjelmalla voidaan tarkastella myös aurinkoenergian passiivista hyödyntämistä sekä sisätilojen ylälämpenemistä karkealla tasolla.

³ Energiataseeseen perustuva tunnusluku ei korreloi energiankulutuksen kustannusten tai EN 15978-standardin mukaan laskettavan hiilijalanjäljen kanssa, kun verkkoon myydään energiaa.

⁴ Energiamuotojen kertoimet on asetettu Valtioneuvoston asetuksessa.



Kuva 4. Malli energialaskentaohjelmassa.

3.3.2 Uusiutuva omavaraisenergia

Lähes nollaenergiarakentamisessa energiatehokkuuteen sisällytetään myös rakennuskohtainen uusiutuvan omavaraisenergian tuotanto. Uusiutuvan omavaraisenergian ratkaisuja käsitellään kuitenkin tässä ohjeessä lähinnä tilavarausten ja ulkovaippaan integroinnin näkökulmasta.

Uusiutuvan omavaraisenergian osalta laskentamenettelyt ovat vielä joiltakin osin vakiintumattomia:

- Rakentamismääräyksiin liittyvissä ohjeissa kuvatut yksinkertaistetut laskentamallit antavat tyypillisesti aurinkosähkön tuotto-potentiaalista liian optimistisen ja aurinkolämmön tuottopotentialista liian negatiivisen kuvan.
- Ympäristön varjostuksen vaikutuksen laskemiselle ei ole vakiintunutta menettelyä.
- Pientuulivoiman tuotto-odotuksen laskennalle ei ole yleistä ohjeistusta, vaan se on tehtävä esimerkiksi turbiinivalmistajan antamien tietojen perusteella. Sijoituspaikan tuulisuuden luotettava arviointi edellyttäisi puolen vuoden tai mieluiten vuoden kestävästä mittauksesta, jonka kustannus voi viedä koko investoinnin kannattavuuden.
- Tuuli- ja aurinkosähkön tuotosta tulee määritellä rakennuksessa käytettävä osuus, jolle ei ole vakiintunutta menettelyä. Suomalaisissa laskentaohjeissa ei ole määritetty tuntitason kulutusprofiilia lämpimälle käyttövedelle tai kuluttajalaitteiden sähkönkulutukselle. Rakennuksessa käytettävä osuus on laskettu tyypillisesti vertaamalla tuntitason tarkastelussa tavoite-energiankulutusta ja tuotto-odotuslaskelmaa.

Aurinkopaneelien ja -keräinten luontevan rakennusintegroinnin haasteena ovat yleensä suuntaus ja ympäristön varjostava vaikutus. Etelästä poikkeava suuntaus ja ympäristön varjostava vaikutus heikentävät järjestelmän tuotto-odotusta ja vaikuttavat olennaisesti kannattavuuteen. Rakennukseen integroitavissa laajoissa aurinkolämpö- ja aurinkosähköjärjestelmissä joudutaan usein tekemään kompromisseja energiantuoton kannalta optimaalisen sijoittelun ja suuntauksen sekä arkkitehtonisten ja kaupunkikuvallisten tavoitteiden välillä.

Etelästä poikkeavan suuntauksen vaikutus tuotto-odotukseen on helposti laskettavissa myös yksinkertaistetuissa laskentamalleissa. Ympäristön varjostavan vaikutuksen selvittämiseksi on mallinnettava tai kuvattava vähintään karkealla tasolla ympäröivät rakennukset ja varjostava puusto. Aurinkosähköjärjestelmän tuotto voidaan laskea esimerkiksi paikkatieta hyödyntävällä PVgis-ohjelmalla, jossa esitetään asennuspaikkaa ympäröivien varjostavien tekijöiden korkeus sektoreihin jaettuna. Aurinkosähkö- ja aurinkolämpöjärjestelmien tuotto voidaan laskea myös monissa simulointiohjelmistoissa, joissa ympäristön varjostavat tekijät mallinnetaan yksinkertaistettusti.

3.3.3 Hiilijalanjälki

Rakennuksen energiatehokkuutta voi ohjata suunnittelussa myös rakennuksen hiilijalanjäljelle asetettu tavoite. Relevantein ohjeistus kasvihuonekaasupäästöjen laskennalle löytyy CEN/TC 350 -työryhmän⁵ valmistelemista eurooppalaisista standardeista. EN-standardien mukaan hiilijalanjälkilaskenta tulisi toteuttaa aina koko rakennuksen elinkaarelle. Energiankäytön tai materiaalivalmistuksen hiilijalanjälkeä ei siis tulisi tarkastella kokonaisuudesta irrotettuna.

Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen laskentamenettely on kuvattu standardissa EN 15978. Energialaskennan osalta se on yhdenmukainen rakennusten energiatehokkuusdirektiivin (EPBD) kanssa.

Standardin EN 15978 ja EPBD-direktiivin mukaisessa laskennassa pistorasiaan kytkettävien kuluttajalaitteiden sähkö jätetään tarkastelun ulkopuolelle. Suomalaisessa E-lukulaskennassa kuluttajalaitteiden sähkönkulutus sisällytetään tarkasteluun. Suomalainen tarkastelutapa on siinä mielessä perusteltu, että rakennuksessa tuotettavaa tuuli- tai aurinkosähköä käytetään esimerkiksi omakotitaloissa myös pistoraisaan kytkettävien kuluttajalaitteiden ostosähkön vähentämiseen. Toisaalta useimmissa kerrostaloyhtiöissä osakkailla on omat, erilliset sähkösopimuksensa, ja asunto-osakeyhtiön oman energiantuoton käyttäminen suoraan asunnoissa edellyttää monimutkaisempia mittaus- ja sopimusjärjestelyjä.

Eri energiamuodoille käytettävien päästökertoimien määrittelyssä on vielä vaihtelevia käytäntöjä. Tyypillisesti erot liittyvät tilojen lämmitykseen käytettävän verkkosähkön päästökertoimeen sekä puupohjaisten polttoaineiden päästökertoimeen. Kaukolämmön päästökertoimet vaihtelevat paikkakunnittain merkittävästi, ja täsmällisimmän tiedon ominaispäästöistä saa kaukolämpöyhtiöltä.

Tilojen lämmitystarpeen pienentäminen vähentää rakennuksen energiankulutuksen kasvihuonekaasupäästöjä sitä enemmän, mitä korkeampi on lämmitykseen käytettävän energian ominaispäästökerroin. Energiankulutus vaikuttaa rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen sitä enemmän, mitä pidemmäksi rakennuksen elinkaari oletetaan.

EN-standardin mukainen rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkilaskenta on kuvattu mm. Green Building Council Finlandin ohjeessa *Rakennusten elinkaarimittarit* (2013). Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen laskentaan käytetään Suomessa mm. VTT:n ylläpitämää Ilmari-laskentapalvelua sekä Bionovan kehittämää 360optimi-ohjelmistoa.

⁵ TC = technical committee.

3.3.4 Parhaat käytännöt

Energialaskennalla voidaan perustella merkittäviä investointeja. Lähtötietoja syötetään verrattain suuri määrä, ja yksittäinen virhe lähtötiedoissa voi vaikuttaa olennaisesti tulokseen. Energialaskenta on siis syytä tarkastaa, jotta mahdolliset virheet havaitaan riittävän ajoissa.

Laskentatuloksen tarkistaminen ei kuitenkaan tarkoita laskentamenetelmien kyseenalaistamista. Hyvä käytäntö on raportoida laskentaohjelmaan syötetyt lähtötiedot tuloksen ilmoittamisen yhteydessä. Laskentatuloksen tarkistaminen on käytännössä lähtötietojen tarkistamista.

Parhaassa tapauksessa laskennassa voidaan tehdä myös joitakin herkkyystarkasteluja, joilla osoitetaan ne suunnitteluratkaisut, jotka ovat olennaisia energiatehokkuustavoitteen toteutumisen kannalta.

Kun energiatehokkuustavoite asetetaan ympäristösyistä ja tavoitteena on asuinrakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen pienentäminen, on perusteltua tarkastella asukasta kohti laskettua hiilijalanjälkeä. Siten laskentatuloksessa ilmenee myös asumisväljyyden merkitys, ja vältetään se väärä johtopäätös, että vähäpäästöisenä ratkaisuna pidettäisiin esimerkiksi energiatehokasta, suurta omakotitaloa, jossa asuu vain yksi henkilö.

4. Energiatehokkuus arkkitehtisuunnittelussa

Arkkitehtisuunnittelu voi luoda suotuisat tai epäedulliset lähtökohdat hankekohtaisesti asetetun energiatehokkuustavoitteen toteuttamiseen. Arkkitehtisuunnittelu vaikuttaa erityisesti *tilojen lämmitystarpeeseen (lämmitysenergiantarpeeseen)*. Tilojen lämmitystarvetta määrittää arkkitehtisuunnittelun ratkaisujen lisäksi lämmöneristystaso, lämmön talteenotto ilmanvaihdosta sekä ulkovaipan ilmanpitävyys. Tilojen lämmitystarpeeseen ei sisällytetä lämmönjakojärjestelmän höytysuhdetta tai lämmitysmuodon vaikutusta, jotka kuitenkin vaikuttavat tilojen lämmityksen ostoenergiaan.

Energiatehokkuutta parantavien suunnitteluratkaisujen vaikutusta kuvataan usein prosenttilukuina. Silloin on syytä täsmentää, tarkoitetaanko prosenttiluvulla säästöä tilojen lämmitystarpeessa, tilojen lämmityksen ostoenergiassa vai rakennuksen yhteenlasketussa ostoenergiankulutuksessa, johon sisältyy myös käyttöveden lämmitys, mahdollinen jäähdytys ja kaikki sähköenergiankulutus.

Laskennalliseen ja toteutuvaan tilojen lämmitysenergiankäyttöön vaikutetaan olennaisesti monella päätöksellä suunnittelun eri vaiheissa. Asuinrakennuksen osalta näitä päätöksiä ovat

- tilaohjelma
 - asumisväljyys (m^2/asukas)
 - lämmitettävien tilojen määrittely (esim. lämmitettävä autotalli vai lämmittämätön autosuoja, tuulikaappi vai lämmittämätön lasikuisti, porrashuone vai lämmittämätön sivukäytävä jne.)
- tilojen käyttöasteeseen vaikuttavat päätökset (esim. huoneistosauna vai asuinkerrostalon yhteiskäyttöinen saunaosasto)
- pohjaratkaisun tehokkuus ($A_{\text{suunnitelma}}/\text{ohjelma-ala}$) ja muuntojoustavuus
- ulkovaipan pinta-ala
- ikkuna- ja ovipinta-alan osuus ulkovaipasta.

Arkkitehti voi vaikuttaa lisäksi tilojen lämmitystarpeeseen

- lämmittämättömillä lasitetuilla puskurivyöhykkeillä (lasikuistit, lasitetut parvekkeet ja viherhuoneet)
- aurinkoenergian passiivisella hyödyntämisellä ikkunoiden kautta
- lähiympäristön pienilmasto-olosuhteisiin vaikuttamalla
- ilmatiiviin ulkovaipan toteutusta tukevalla detaljisuunnittelulla
- kylmäsiltojen minimoinnilla detaljisuunnittelussa.

Lämmöneristystasot määritellään yhteistyössä tilaajan ja rakennesuunnittelijan kanssa, eikä tätä päätöstä voida siten pitää pelkästään arkkitehtisuunnittelun valintana. Arkkitehtisuunnittelussa energiatehokkuuteen merkittävimmin vaikuttavat valinnat liittyvät tilankäytön tehokkuuteen, ulkovaipan pinta-alaan ja ikkunapinta-alaan.

Tilojen lämmitystarvetta määrittävät arkkitehtisuunnittelun ratkaisut tehdään suunnittelun alkuvaiheessa. Mitä varhaisemmassa vaiheessa suunnittelua voidaan tehdä alustavia energialaskelmia, sitä pienempi on riski siitä, että arkkitehtonista konseptia joudutaan myöhemmin muuttamaan energiatehokkuustavoitteen takia. Pääpiirustusvaiheessa on käytännössä erittäin työlästä tehdä olennaisesti energiatehokkuutta parantavia muutoksia arkkitehtisuunnitelmiin. Lupavaiheen energialaskenta tapahtuu siis aivan liian myöhään ollakseen luonteeltaan suunnittelua ohjaavaa.

4.1 MITOITUS - TILAOHJELMA JA KÄYTTÖASTE

Energiatehokkuuteen vaikuttavia ratkaisuja tehdään jo siinä vaiheessa, kun päätetään rakennustyyppistä. Asuinkerrostalossa tilojen ominaisenergiankulutus neliometriä ja asukasta kohti laskettuna muodostuu tyypillisesti omakotitaloa pienemmäksi. Kerrostalossa lämpöhäviötä aiheuttavaa ulkovaippaa on asuinneliometriä kohti vähemmän kuin omakotitalossa. Myös keskimääräinen asumisväljyys on kerrostalossa pienempi, mutta toisaalta varsinaisten asuintilojen lisäksi rakennetaan erilaisia lämmitettäviä yhteistiloja ja por-rashuoneita.

Energiankulutusta tai sen kasvihuonekaasupäästöjä ei yleensä tarkastella asukasta tai käyttäjää kohti, vaikka ympäristövaikutusten kannalta tämä olisi tarkoituksenmukaisempaa kuin lattianeliometriä kohti laskettavan ominaiskulutuksen käyttäminen tunnusluku-na. Asumisväljyyttä ei siis yleisesti sisällytetä energiatehokkuuden käsitteeseen. Energiatehokkaana rakennuksena pidetään pienen ominaisenergiankulutuksen omavaa omakotitaloa riippumatta siitä, asuuko sitä yksi henkilö vai monihenkinen perhe.

Tehokkaan energian- ja resurssienkäytön näkökulmasta ratkaisevaa on, minkälaiseksi asukasmäärä ja asumisväljyys muodostuvat sen koko elinkaaren ajan. Tarkoituksenmukaisen asumisväljyyden mahdollistamiseksi voidaan tarkastella esimerkiksi asunnon makuu-huoneiden ja makuuhuoneeksi muutettavissa olevien huonetilojen lukumäärää suhteessa asunnon kokonaispinta-alaan.

Rakennusta suunniteltaessa on haastavaa ennakoida sen tulevien asukkaiden lukumäärää, tarpeita ja elämäntilanteita. Rakennus todennäköisesti palvelee joustavammin asukkaitaan, jos sen suunnittelussa varaudutaan muuntojoustoon tai mahdollistetaan esi-merkiksi sivuasunnon erottaminen.

Vastaavasti tilojen käyttöaste jää energiatehokkuuden arvioinnissa usein huomioimatta.

Energiankäytön kustannuksiin ja kasvihuonekaasupäästöihin voidaan vaikuttaa suunnittelemalla lämmitettäviksi tiloiksi vain ne tilat, joissa välttämättä tarvitaan tasaista sisälämpötilaa. Esimerkiksi avoimen autosuojan rakentaminen lämmitettävän autotallin sijasta johtaa luonnollisesti pienempään energiankulutukseen kiinteistössä.

4.2 SIJOITTELU - SUUNTAUS JA PIENILMASTO

4.2.1 Suuntaus

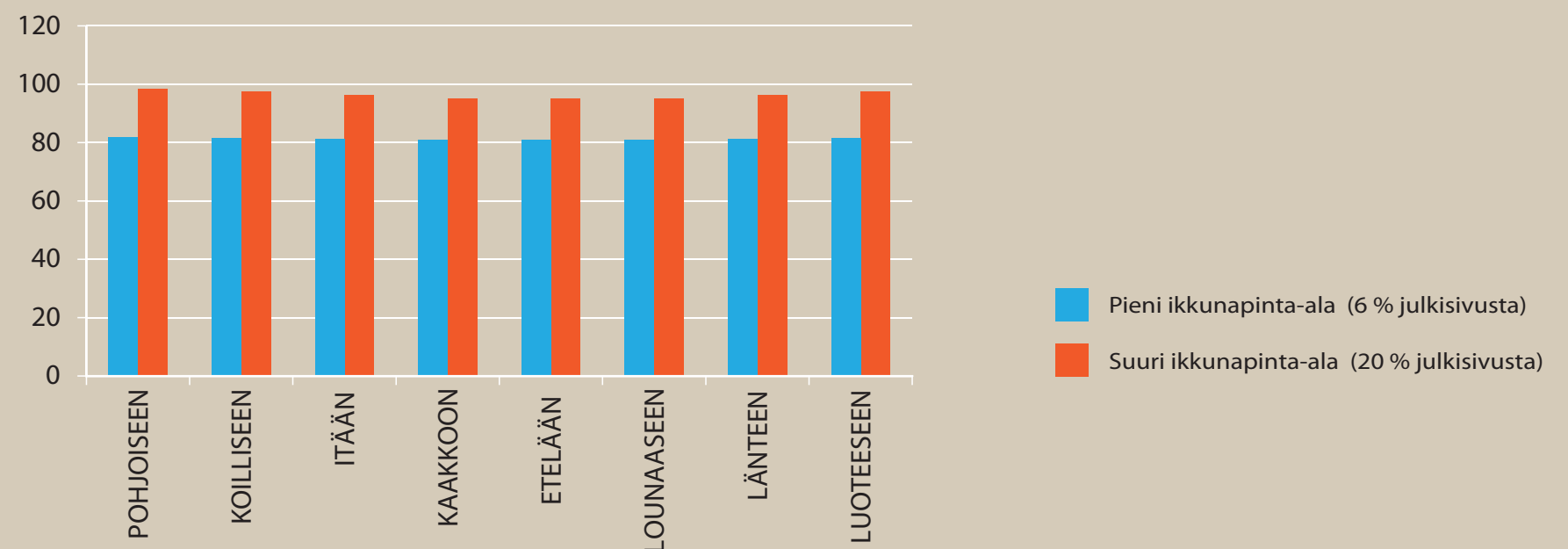
Tavanomaisessa omakotitalossa rakennuksen suuntaus ei vaikuta merkittävästi tilojen lämmitystarpeeseen, koska rakennuksen ikkunapinta-ala jakautuu yleensä melko tasaisesti eri ilmansuuntiin ja ikkunalasien g-arvo (auringonsäteilyn kokonaisläpäisevyys) on tyypillisesti matala. Tilanne muuttuu, kun rakennus suunnitellaan systemaattisesti hyödyntämään auringonsäteilyä passiivisesti.

Kuvassa 5 on esitetty rakennuksen suuntauksen vaikutus tilojen lämmitystarpeeseen, kun ikkunan lasiosan g-arvo on 0,35 ja 35 % ikkunapinta-alasta on pihajulkisivussa. Pihajulkisivun kääntäminen etelästä pohjoiseen lisää tilojen lämmitystarvetta eristystasoltaan tavanomaisessa rakennuksessa n. 1–4 % ja passiivitalossa n. 2–6 % ikkunapinta-alasta riippuen.

Esimerkkitalossa

- on kaksi kerrosta
- nettolattia-ala on n. 140 m²
- ikkunapinta-alasta 35 % on pihajulkisivussa
- ikkunan lasiosien auringonvalon läpäisevyys on matala ($g \leq 0.35$).

Tulokset on laskettu dynaamisella simulointiohjelmalla Oulun ilmastossa. Kun ikkunapinta-ala on erittäin pieni, rakennuksen suuntaus ei vaikuta käytännössä lainkaan tilojen lämmitystarpeeseen. Kun ikkunapinta-ala on suurempi, rakennuksen suuntaus vaikuttaa energiankulutukseen erittäin vähän.



Kuva 5. Kaksikerroksisen omakotitalon suuntauksen vaikutus tilojen lämmitystarpeeseen Oulun ilmastossa. (Lylykangas et al: Aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen, Oulun rakennusvalvontavirasto 2014)

Sivukäytävätaloissa ja rivitaloissa ikkunapinta-ala painottuu tyypillisesti pihajulkisivuun rakennustyyppistä johtuen. Ikkunalasien ominaisuudet ja varjostavat rakenteet (terassit, parvekkeet) ratkaisevat sen, onko rakennuksen tilojen lämmitystarve olennaisesti riippuvainen pihajulkisivun suuntauksesta. Jos ulkovaipan ratkaisulla päästetään auringonsäteily sisätiloihin, auringon säteilyenergia voi pienentää energiantarvetta lämmityskaudella, mutta vastaavasti myös aiheuttaa sisätilojen yllälämpenemistä. Tätä problematiikkaa on käsitelty tarkemmin luvussa 4.6 *Aurinkosuojaus ja aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen*.

Auringon lämpökuorma voidaan huomioida myös tilojen sijoittelussa rakennusrungon sisällä. Lämpökuormien hallinta on haastavaa itään ja länteen suuntautuvissa tiloissa, joissa ikkunapinta-ala on suuri tilan kokoon nähden. Auringonsäteily on parhaiten käännettävissä hyödyksi ilmaisenä lämmitysenergiana verrattain suurissa, etelään suuntautuvissa tiloissa tai tilakokonaisuuksissa.

4.2.2 Pienilmasto

Rakennusten sijoittelulla ja kasvillisuudella vaikutetaan rakennuspaikan ja piha-alueiden aurinkoisuuteen ja tuulisuuteen, joiden yhteisvaikutus määrittelee ulko-oleskelualueiden pienilmaston viihtyisyyden.

Kylmässä ilmastossa tuuli vaikuttaa yleensä negatiivisesti paikalliseen viihtyvyyteen. *Tuuliviihtyvyys* on määriteltävissä seuraavasti: tuuliolosuhteiden oletetaan olevan viihtyisät tuulen ollessa niin heikko ja niin harvoin puuskainen, että alueella oleskelevat ihmiset eivät häiriinny tuulen virtauksista.

Ilmatieteenlaitos on tutkinut eri ulkoilmaolosuhteiden vaikutusta rakennusten energiankulutukseen. Tuulisuus lisää rakennuksen ulkovaipan lämpöhäviötä erityisesti silloin, kun ulkovaipan tuulenpitävyys on heikko. Tuulen ja ulkoilman kosteuden vaikutus rakennusten energiankulutukseen on pienempi kuin lämpötilan ja auringonsäteilyn, kun tuuli ei pääse läpäisemään ulkovaipparakenteen tuulensuojaa (Jylhä, Kirsti et al. 2011, 63). Tuulen merkitys lämpöhäviöihin on huomioitu rakennusmääräyskokoelmien pintavastuskertoimissa.

Ilmavirtaukset vaikuttavat myös julkisivuun kohdistuviin säärasituksiin.

Rakennuksen lähiympäristön tuuliolosuhteita voidaan tarkastella pienoismallin avulla tai tietokoneavusteisesti tuulisuussimuloinilla. Pienilmastoanalyysin ja tuulisimulaatioiden tuloksiin voidaan reagoida tehokkaasti vain silloin, kun tiedot ovat käytettävissä suunnittelun alkuvaiheessa. Havaittuihin ongelmakohtiin reagoidaan tyypillisesti rakennusten sijoittelua ja muotoa muuttamalla tai lisäämällä ilmavirtauksia ohjaavaa tai vaimentavaa kasvillisuutta.

Tuulisuussimuloinneissa keskitytään yleensä tuulennopeuden muutoksiin eri geometrioiden ympärillä. Tuulennopeus saattaa kiihtyä taikka hidastua geometrisista muodoista ja mitoista riippuen. Tuulen nopeus kasvaa helposti esimerkiksi kapeissa, rakennusten väliin jäävissä tiloissa sekä korkeiden rakennusten juurella.

Tuulen virtaussimuloinneissa, joissa selvitetään ulkotilojen mukavuutta, on lähtötietona selvitettävä kolme seikkaa:

- alueen tilastollinen tuulidata
- maaston geometria ja rosoisuus sekä
- mukavuuden raja-arvot.

Vallitsevia tuuliolosuhteita kuvaavaa tilastotietoa on tarkasteltava vuodenajoittain jaoteltuna, jotta saadaan käsitys tuuliolosuhteiden vaikutuksesta eri lämpötiloissa. Kylmänä vuodenaikana tuulisuus laskee koettua lämpötilaa.

Suurimmalle hyväksyttävälle tuulen nopeudelle määritellään raja-arvot erilaisten toimintojen mukaan jaoteltuna. Kynnysarvoja tuulennopeuden ja tuuliviihtyvyyden suhteelle on esitetty kansainvälisissä julkaisuissa ja kirjallisuudessa. Numeerisesti asetetuissa raja-arvoissa on merkittävää vaihtelua, mutta esitettyjä kynnysarvoja yhdistävät seuraavat periaatteet:

- Tuuliviihtyvyys on verrannollinen tuulennopeuteen.
- Jos alueella on suurempi aktiivisuus, sallitaan korkeammat tuulennopeudet.

Taulukossa 2 on esitetty esimerkkejä tuulennopeuksien raja-arvoille.

HYVÄKSYTTÄVÄN VUOTUISEN TUULEN KESKINOPEUDEN RAJA-ARVOT (M/S)
JALANKULKIJAN ERI ULKOTOIMINTOJEN LUOKILLE

PAC	kylmä ja lauhkea ilmasto	
	Hyvä	Siedettävä
A	1,5	2,0
B	3,0	3,5
C	4,0	4,5
D	4,5	5,0

A	ISTUMINEN: katukahvila, terassi, allasalue, lastentarhan piha
B	SEISOMINEN: bussipysäkki, pelikenttä, kävelykatu, koulun piha
C	KÄVELY: kävelyreitit, rakennusten sisäänkäynnit
D	REIPAS KÄVELY: kevyen liikenteen väylät, paikoitusalueet
PAC	pedestrian activity category = jalankulkijan toiminnan luokka

Taulukko 2. Esimerkkejä tuulennopeuksien raja-arvoille (Kuismanen 2008, 260⁶). Raja-arvojen määrittämiselle ei ole yhtä ainoaa standardia tai yleisesti käytettävää normia.

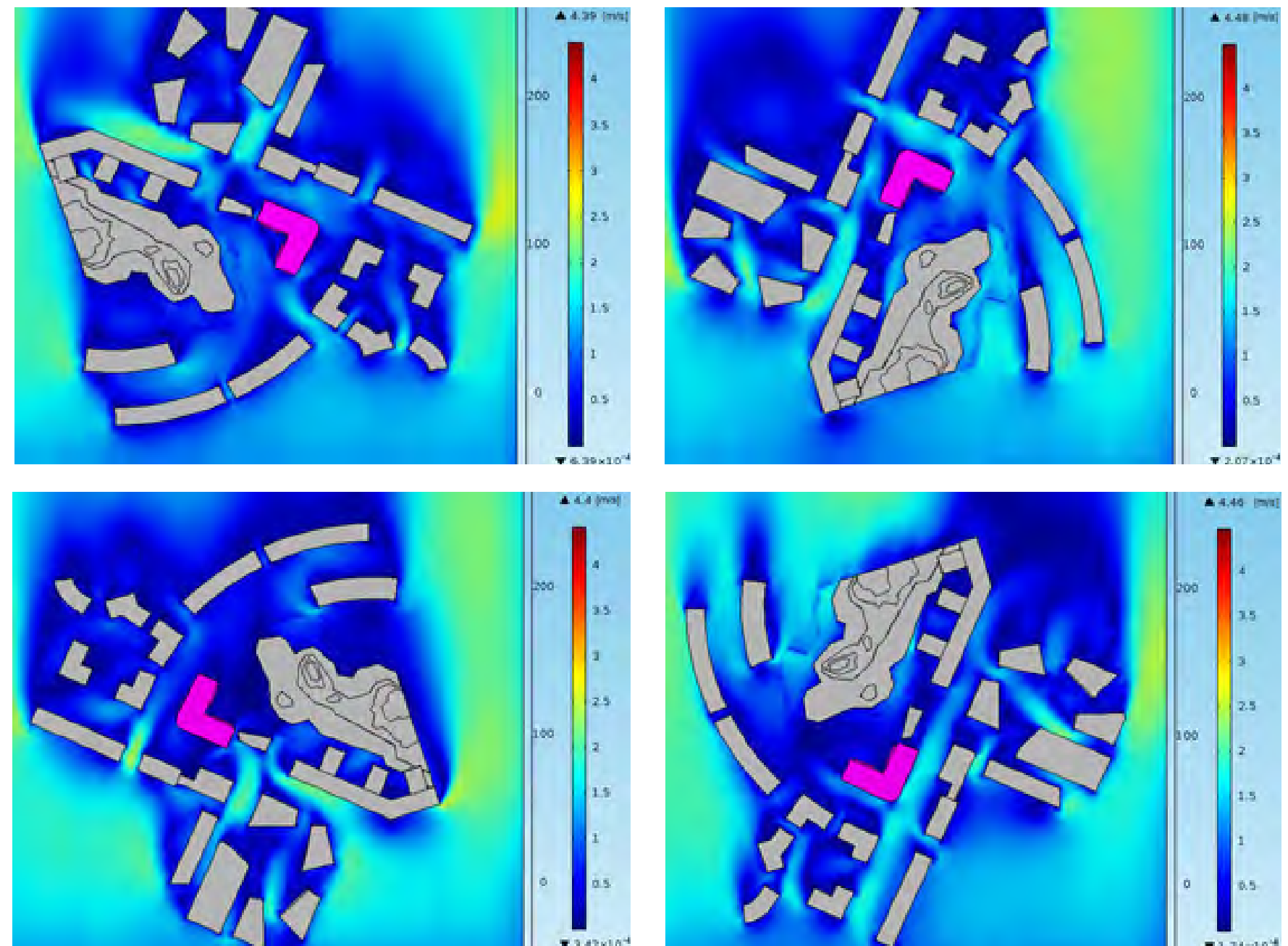
⁶ Alkuperäisteoksesta kääntänyt Kimmo Kuismanen, 2014.

4.2.3 Parhaat käytännöt

Ilmastotietoinen suunnittelu on Suomessa jäänyt marginaaliseksi, vaikka menetelmät rakennuspaikan olosuhteiden analysointiin ovat koko ajan kehittyneet.

TkT Kimmo Kuismanen kehitti ja kuvasi väitöskirjassaan (Kuismanen 2008) CASE-metodin, jonka tavoitteena on pienilmasto-olosuhteiden nykyistä parempi ymmärtäminen ja huomioiminen rakennussuunnittelussa. Kuismanen osoittaa, että pienilmasto on olennaisesti sekä viihtyvyyteen että turvallisuuteen vaikuttava tekijä.

Kuvassa 6 on esitetty Vantaalle rakennettavan päiväkodin esisuunnittelussa toteutetun tuulisuussimulaation tulokset.



Kuva 6. Tuulisimulaatio COMSOL Multiphysics -ohjelmistolla, Sweco Rakennetekniikka Oy. Tuulisuus pääilmansuunnittain mitoitustuulennopeudella 5,89 m/s. Vantaan Leinelän II päiväkodin esisuunnitelma (Lylykangas et al. 2014, Vantaan lähes nollaenergiapäiväkotikonsepti, liite 5b).

4.3 TEHOKAS TILANKÄYTTÖ

4.3.1 Tilankäytön tehokkuus

Tehokas tilankäyttö jää usein energiatehokkuutta koskevien tarkastelujen ulkopuolelle, koska energiatehokkuutta arvioidaan lattianeliömetriä kohti laskettavana ominaisenergiankulutuksena. Tarpeettoman tilan rakentaminen lisää turhaan investointi- ja ylläpito-kustannuksia sekä ympäristökuormaa. Tilan tarpeellisuutta ei toisaalta pidä arvioida väärin kriteerein. Sopiva väljyys mitoituksessa voi parantaa kalustettavuutta, monikäyttöisyyttä, muunneltavuutta ja laadun kokemusta, joka vaikuttaa kiinteistön arvoon.

Pohjaratkaisun tehokkuutta arvioidaan tyypillisesti ohjelma-alan ja bruttoalan suhdelukuna tai ns. liikennetilojen määrällä. Kun liikenneala on mahdollisimman pieni, asunto on tilankäytöltään tehokas.

Omakotitalojen pohjaratkaisut eivät ole reagoineet viime vuosikymmenten kuluessa tapahtuneeseen perhetyyppien ja ruokakuntien kokojaukauman muutoksiin. Lisäksi ruokakunnan koon luonnollinen vaihtelu eri elämänvaiheissa johtaa helposti tilanteeseen, jossa suurelle perheelle mitoitettua omakotitaloa asuukin vain yksi tai kaksi henkeä. Ruokakunnan koon ja tilatarpeiden vaihtelun vaikutus asumisväljyyteen ja edelleen yhden asukkaan energiankulutukseen ja asumisen kasvihuonekaasupäästöihin voi olla erittäin suuri. Asunnon muuntojoustavuudella ja erityisesti mahdollisuudella laajentamiseen tai sivuasunnon erottamiseen voidaan siten vaikuttaa olennaisesti myös järkevään energiankäyttöön (Köymäri 2015).

4.3.2 Parhaat käytännöt

Oulun rakennusvalvonta on systematisoinut asunnon pohjaratkaisun tehokkuuden arviointia ja kehittänyt arvioinnissa tarvittavaa terminologiaa. Pientalon pohjaratkaisun tehokkuutta opastetaan Oulussa arvioimaan liikennealojen minimoinnin avulla sekä laske-malla huoneistoalan suhde huoneluukuun ja todellisen liikennealan suhde huoneluukuun (Jääskeläinen 2010).

Oulun rakennusvalvonnan ohjeistuksessa *todellinen liikenneala* tarkoittaa jatkuvasti liikkumiseen ja työskentelyyn tarvittavaa vapaata tilaa, ja se muodostuu ensisijaisesta ja toissijaisesta liikennealasta. Todelliseen liikennealaan kuulumattomien huonealojen summa on asunnon *tehollista hyötyalaa*.

Ensisijainen liikenneala tarkoittaa pinta-alaa, joka tarvitaan kujettaessa ulko-ovelta asumisen kannalta välttämättömiin tiloihin eli keittiöön, olohuoneeseen, yhteen makuuhuoneeseen ja yhteen wc-tilaan.

Toissijainen liikenneala tarkoittaa edellisen lisäksi tarvittavaa pinta-alaa kuljettaessa muihin makuuhuoneisiin, wc-tiloihin, kylpytiloihin ja kodinhoitotiloihin sekä mahdollisille terasseille ja parvekkeille.

Huoneen sisäinen liikenneala tarkoittaa huoneen ovella tarvittavaa kulkutilaa ja reittejä siitä säilytyskalusteille. Lisäksi huoneen sisäistä liikennealaa ovat kulkureitit mahdollisiin vaatehuoneisiin ja wc-tiloihin. Huoneiden sisäisten liikennetilojen suuruutta ohjaa pääasias-sa kiintokalusteiden sijoittelu. Huoneiden läpikuljettavuus vaatii aina vapaana olevaa liikennealaa, jolloin huonetilan kalustettavuus usein kärsii. Läpikuljettavien tilojen luonne tulee myös ottaa huomioon.

4.4 RAKENNUKSEN MUOTO

4.4.1 Muodon vaikutus energiankulutukseen

Rakennuksen muodolla viitataan ulkovaipan pinta-alaan, jonka läpi ulkovaipan lämpöhäviöt tapahtuvat. Mitä suurempi pinta-ala on, sitä suuremmat ovat lämpöhäviöt ja tilojen lämmitystarve. Kun arkkitehtisuunnittelussa tavoitellaan muodoltaan kompaktia rakennusta, on tarkasteltava lämmöneristetyin tilan muotoa sekä pohjapiirustuksessa että poikkileikkauksessa.

Energiatehokkuutta parantavia suunnitteluratkaisuja voidaan vertailla niiden kustannusvaikutuksen avulla. Useimmat ostoenergiankulutusta pienentävät ratkaisut nostavat investointikustannuksia, ja niiden kannattavuutta arvioidaan suhteessa käytönaikaisiin säästöihin. Rakennuksen lämmöneristetyin vaipan muodon yksinkertaistaminen sen sijaan merkitsee tyypillisesti sekä investointikustannusten että ylläpitokustannusten pienemistä.

Energiatehokkuustavoitteen ei tule antaa yksinomaisesti määrittellä rakennuksen muotoa, koska se saattaa olennaisesti heikentää rakennuksen laadullisia, ei-mitattavia ominaisuuksia, joilla määrittävät monella tapaa rakennuksen arvoa. Tavanomaista parempi energiatehokkuus tai energiankäytön keskimääräistä pienemmät kasvihuonekaasupäästöt on saavutettu myös monissa rakennuksissa, joiden lämmöneristetty ulkovaippa on muodoltaan monimutkainen ja ikkunapinta-ala verrattain suuri. Näissä tapauksissa energiatehokkuus on toteutettu muilla keinoin kuin arkkitehtisuunnittelun avulla.

4.4.2 Muotokerroin luonnossuunnittelun apuvälineenä

Energialaskennan tekeminen luonnossuunnittelun alkuvaiheessa on usein hankalaa, koska suunnitteluratkaisut eivät ole yleensä vielä siinä määrin täsmentyneet, että laskennan edellyttämät täsmälliset tunnusluvut voitaisiin helposti määrittellä luonnoksista. Erilaisien ratkaisuvaihtoehtojen energiatehokkuusvaikutusten vertailuun rakennuksen muodon suhteen on käytetty muotokerrointa, joka voidaan laskea yksinkertaisten tunnuslukujen avulla luonnossuunnitelmista. Tätä rakennuksen ominaisuutta on kuvattu myös vaippasuhteella (esim. Lappalainen 2010, 27).

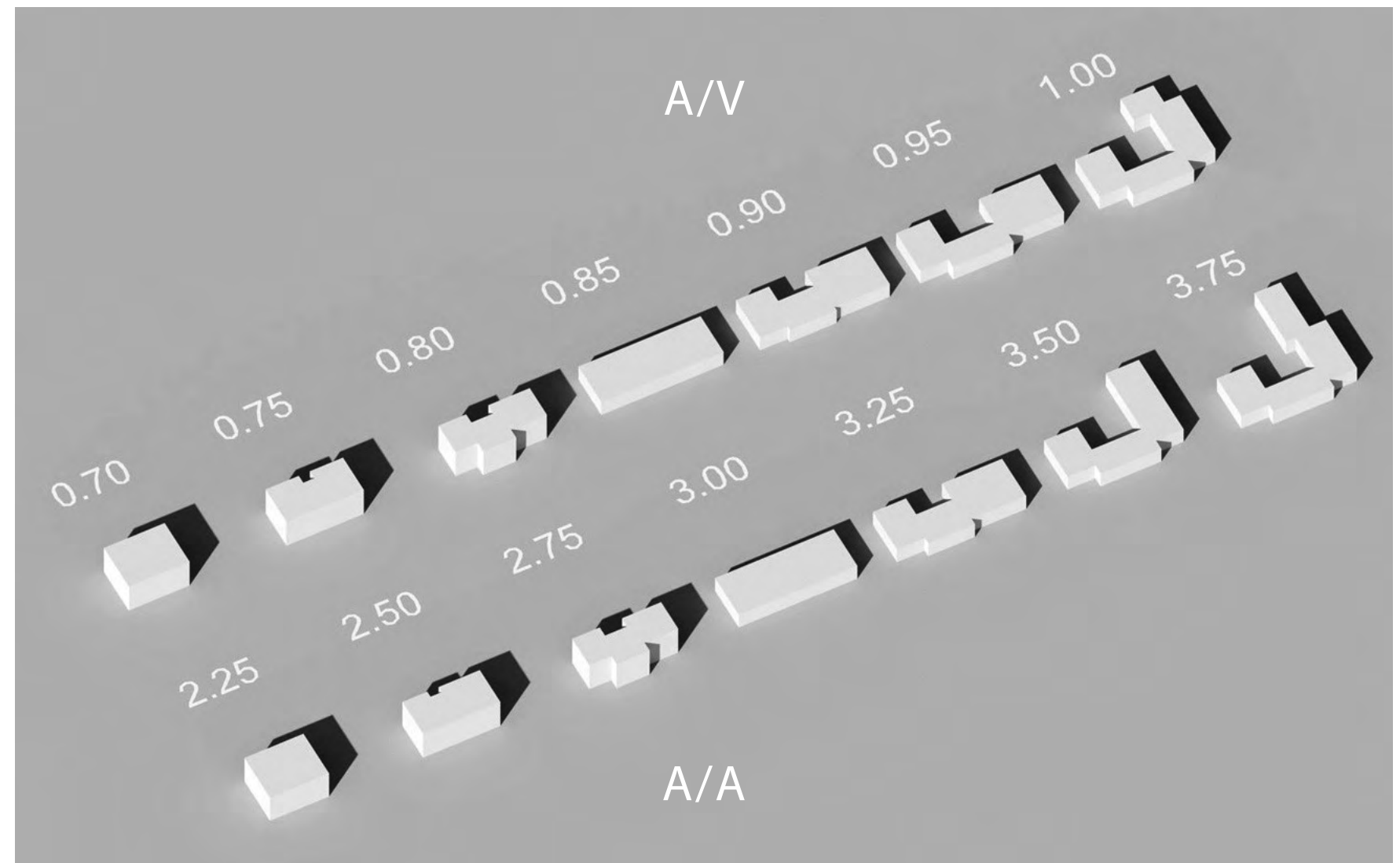
Saksankielisissä Euroopan maissa on kuvattu rakennuksen muodon tehokkuutta muotokertoimella A/V , jossa ulkovaipan pinta-ala suhteutetaan lämmitettävään tilavuuteen. Tunnusluku ei kuitenkaan huomioi sitä, kuinka paljon lattiapinta-alaa ratkaisulla on saatu aikaiseksi.

Pohjoismaissa käytetty muotokerroin A/A suhteuttaa ulkovaipan pinta-alan lattiapinta-alaan. Tämä on jo paremmin vaihtoehtojen luonnosten vertailuun soveltuva tunnusluku, mutta se ei tunnista eroja eri rakennusosien lämmönläpäisykertoimissa. Muotokertoimen A/A käyttäminen vahvistaa esimerkiksi sitä käsitystä, että kaksikerroksinen ratkaisu olisi aina olennaisesti yksikerroksista energiatehokkaampi. Ulkovaipan pinta-ala on tyypillisesti pienempi, kun sama tilavuus rakennetaan kahteen kerrokseen yhden sijasta. Vertailu ei kuitenkaan ole näin yksiselitteinen, koska yläpohjan lämmöneristävyys on todellisuudessa olennaisesti ulkoseinien lämmöneristävyyttä parempi.

Muotokerroin riippuu rakennuksen koosta. Suuren rakennuksen muotokerroin muodostuu edullisemmaksi kuin pienen. Kahdella eri kokoisella kuutiolla on siis erilainen muotokerroin. Muotokertoimelle A/V tai A/A ei siis voida asettaa yleispätevää tavoitearvoa, vaikka niitä onkin käytetty kuvaamaan ulkovaipan muodon lämpötaloudelliselle tehokkuudelle asetettavia tavoitteita esimerkiksi passiivitalojen suunnittelussa. Muotokertoimen antama indikaatio on siinä mielessä oikean suuntainen, että myös lattiapinta-alaa kohti ilmoitettu tilojen lämmitystarve riippuu rakennuksen koosta. Lattiapinta-alaa kohti asetettu energiatehokkuustavoite (yksikössä kWh/(m²a)) voi siis yhtäaikaan olla pienelle rakennukselle haastava ja suurelle rakennukselle helppo saavuttaa.

Kuvassa 7 esitetään muotokertoimien A/V ja A/A lukuarvoja.

Jos geometrinen muotoa tarkastellaan erillään suunnittelun realiteeteista, esimerkiksi kritiikittömästi vain muotokertoimen perusteella, saattaa jäädä huomaamatta se, että kaikki muodot eivät mahdollista yhtä tehokasta tilankäyttöä. Esimerkiksi kun yksikerroksinen ratkaisu vaihdetaan kaksikerroksiseen, pohjaratkaisuun on myös lisättävä porras.



Kuva 7. Lämmitettävän ulkovaipan muoto ja muotokertoimet A/V ja A/A.

4.4.3 Parhaat käytännöt

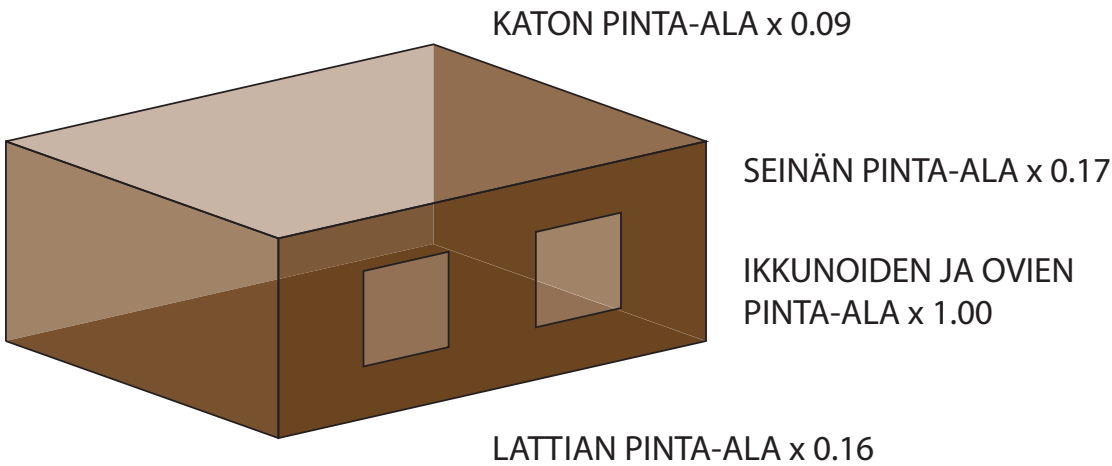
Arkkitehtisuunnittelun vaihtoehtoisten ratkaisumallien vaikutusta tilojen lämmitystarpeeseen voitaisiin edellä kuvattuja tunnuslukuja luotettavammin verrata ns. painotetulla muotokertoimella (kuva 8), jossa huomioidaan rakennuksen muodon lisäksi pohjaratkaisun tehokkuus ja eri rakennusosien lämmönläpäisykertoimet. Painotettu muotokerroin määritellään laskemalla yhteen ulkovaipan eri rakennusosien lämmönläpäisykertoimilla painotetut pinta-alat, ja jakamalla se ohjelma-alalla. Mikäli rakennetyyppejä ei ole määritetty luonnossuunnitteluvaiheessa, rakennusosien painotuskertoimina voidaan käyttää rakentamismääräysten vertailuarvoja. Painotettu muotokerroin tuo riittävällä tarkkuudella esille rakennusosien erilaiset painoarvot lämpöhäviöiden ja tilojen lämmitystarpeen suhteen. Se myös osoittaa, kuinka paljon muotoon liittyviä valintoja voidaan kompensoida pienemmällä lämmönläpäisykertoimella (U-arvolla). Painotetulla muotokertoimella voidaan kuitenkin verrata keskenään vain saman tilaohjelman ratkaisuvaihtoehtoja. Tunnusluku ei siis ole vertailukelpoinen ohjelma-alan muuttuessa.

Painotetun muotokertoimen avulla arkkitehti voi tarkastella vaihtoehtoisten ratkaisumallien vaikutusta tilojen lämmitystarpeeseen ilman varsinaista energialaskentaa. Parhaimmillaan tunnusluku voi myös auttaa erottamaan energiatehokkuuden kannalta merkitykselliset muutokset merkityksettömistä. Painotetun muotokertoimen avulla tilaaja voi asettaa tavoitteita arkkitehtisuunnitelman energiatehokkuusvaikutuksille, jättäen silti riittävän liikkumavaran erilaisille ratkaisumalleille.

Kun energiatehokkuuslaskennassa huomioidaan myös auringonsäteily ja tehdään sisätilojen päivänvalotarkasteluja, vältetään osaoptimointi ja käsitys rakennuksen optimaalisesta muodosta muuttuu.

PAINOTETTU MUOTOKERROIN

$A_{\text{ulkovaippa, painotettu}} / A_{\text{ohjelma-ala}}$



Kuva 8. Vaihtoehtoisten ratkaisumallien vaikutusta tilojen lämmitystarpeeseen voi luonnosvaiheessa verrata painotetun muotokertoimen avulla, ilman varsinaista energialaskentaa.

4.5 IKKUNA-AUKOTUS

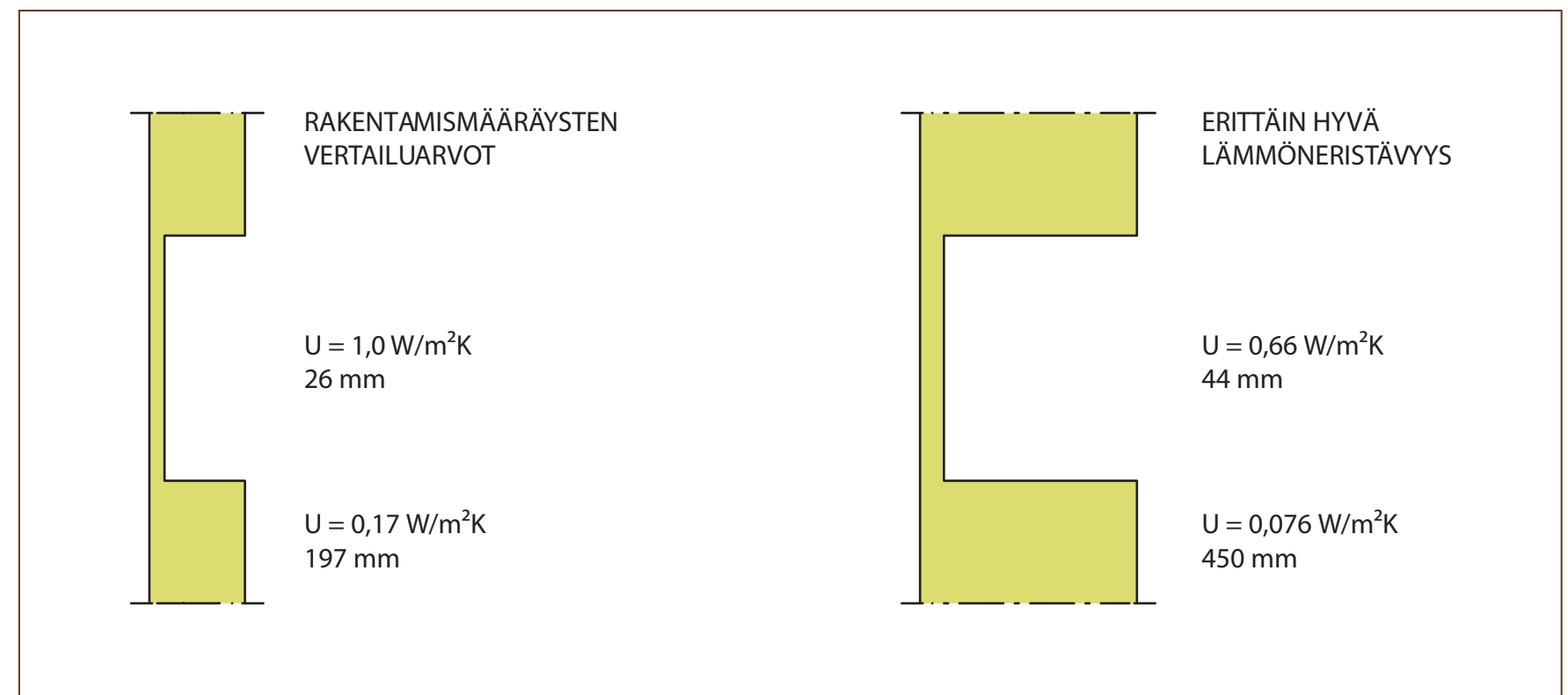
4.5.1 Ikkuna- ja ovipinta-alan vaikutus energiatehokkuuteen

Suuri ikkunapinta-ala lisää lähtökohtaisesti ulkovaipan lämpöhäviötä, koska lämmöneristävyydeltään parhaidenkin ikkunoiden lämmöneristävyys on olennaisesti ulkoseinän lämmöneristävyyttä huonompi. Ikkunapinta-alan vaikutusta lämpöhäviöihin voidaan arvioida yksinkertaisesti laskemalla ulkoseinien tai koko ulkovaipan keskimääräinen U-arvo (kuva 9). Tämä vaikutus ei kuitenkaan ilmene U-arvotarkastelussa.

Ikkunapinta-alan vaikutus voidaan kääntää energiatehokkuuden hyväksi hyödyntämällä aurinkoenergiaa passiivisesti lämmityskauden aikana.

Ikkunapinta-ala vaikuttaa luonnollisesti myös sähkövalaistuksen tarpeeseen, mutta vain tiettyyn rajaan asti. Pimeään vuoden- ja vuorokaudenaikaan sähkövalaistusta tarvitaan joka tapauksessa.

Kuva 9. Ulkoseinän ja ikkunan lämmöneristävyyksiä mineraalivillaeristykseksi muutettuna. Ilman aurinkoenergian passiivista hyödyntämistä ikkunapinta-alan kasvattaminen heikentää aina ulkovaipan lämmöneristävyyttä lisäten lämpöhäviöitä ja siten tilojen lämmitysenergian kulutusta.



Ikkunapinta-alan vaikutus voidaan kääntää energiatehokkuuden hyväksi hyödyntämällä aurinkoenergiaa passiivisesti lämmityskauden aikana.

Ikkunapinta-alan kasvattaminen vähentää luonnollisesti sähkövalaistuksen tarvetta, mutta vain tiettyyn rajaan saakka. Pimeään vuoden- ja vuorokaudenaikaan sähkövalaistusta tarvitaan joka tapauksessa.

⁷ Tässä esimerkissä mineraalivillan $\lambda_D=0,035 W/mK$; $R_{Si}=0,13$; $R_{Se}=0,13$.

4.5.2 Luonnonvalo-olosuhteet

Sisätilojen luonnonvalo-olosuhteet ovat ikkuna-aukotuksen suunnittelussa tilojen lämmitystarvettakin tärkeämpi näkökulma. Luonnonvalo vaikuttaa asumisviihtyvyyteen ja sillä on todettu olevan vaikutus myös työn tuottavuuteen. Syvärunkoinen, niukasti aukotettu rakennus tarvitsee runsaasti sähkövaloa. Asuinympäristön laadun näkökulmasta sähkövalolla ei parhaimmillaankaan voida täysin korvata luonnovaloa.

Käytännössä arkkitehdin pyrkimys tilojen valoisuuteen ja viihtyisyyteen johtaa usein verrattain suureen ikkunapinta-alaan luonnoksissa. Suunnitelmaa kehitettäessä ikkunapinta-alaa usein pienennetään kustannus- ja energiatehokkuustavoitteiden saavuttamiseksi. Jos ulkovaipan ratkaisut optimoidaan ainoastaan investointikustannusten ja energiantarpeen näkökulmasta, sisätilojen laatu saattaa heikentyä. Energiatehokkuutta koskevien laskelmien vastapainona on hyvä tarkastella sisätilojen päivänvalo-olosuhteita laskennallisesti ja simulointityökaluja hyödyntäen.

Suomalaiset rakentamismääräykset eivät aseta yksityiskohtaisia vaatimuksia tai anna suosituksia päivänvalo-olosuhteista. Maankäyttö- ja rakennuslain mukaan ”asuinhuoneen tulee saada riittävästi luonnonvaloa” (MRL 51§ 1 ja 2 mom.). Rakentamismääräyskokoelman osan G1:n mukaan asuinhuoneessa tulee olla ikkunan valoaukkoa vähintään 1/10 huoneen lattiapinta-alasta. Ikkunan sijoituksen tulee olla valoisuuden ja viihtyisyyden kannalta tarkoituksenmukainen, ja osan ikkunasta tulee olla avattavissa. (SRakMK G1, kohta 2.3.1). Edelleen vaatimuksena on, että asuinhuoneen pääikkunan edessä on vähintään 8 metriä rakentamatonta tilaa. Pientalossa etäisyys saa viihtyisyyden vaatimukset huomioon ottaen olla pienempikin (SRakMK G1, kohta 2.4.1).

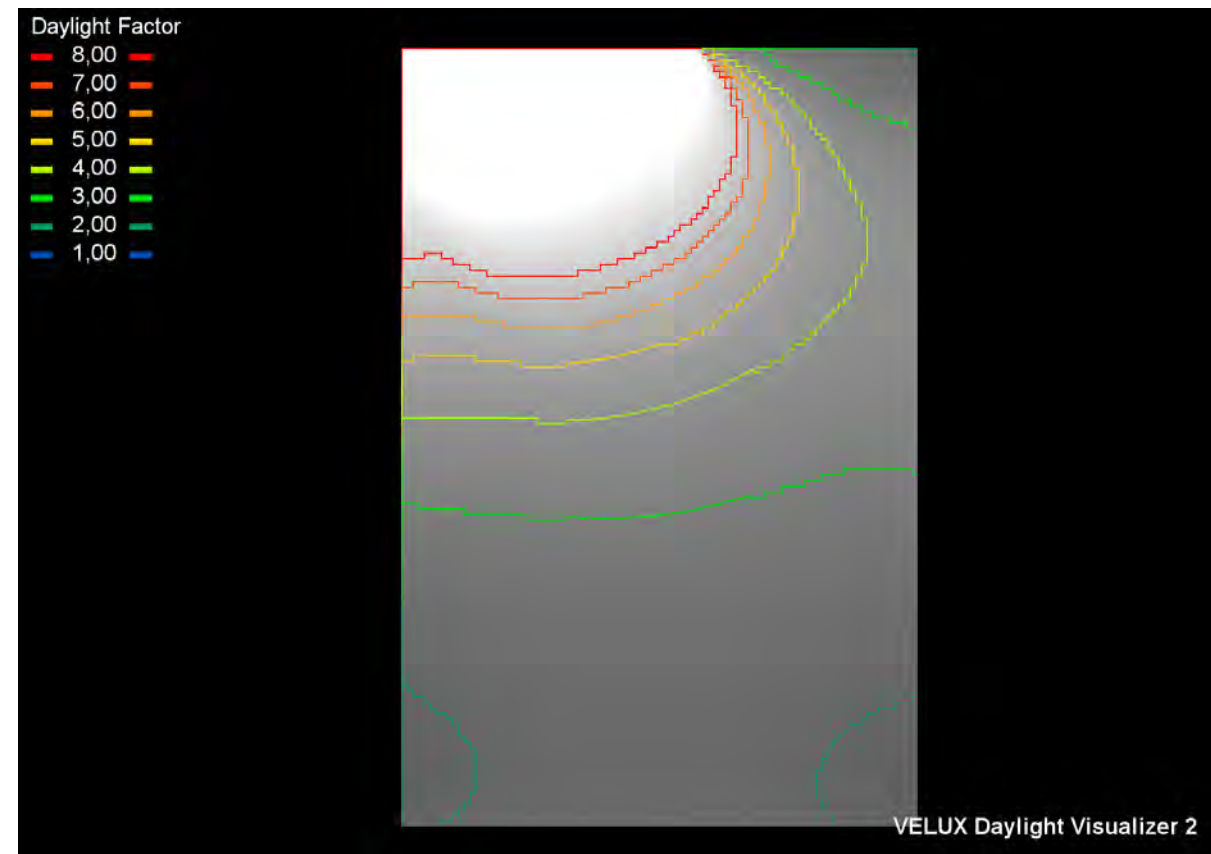
Lämpöhäviön tasauslaskelma antaa joitakin suuntaviivoja ikkunapinta-alan mitoitukseen. Vertailutasossa karmimittoina laskettu ikkunapinta-ala on 15 % yhteenlasketusta maanpäällisistä kerrostasoaloista, mutta kuitenkin enintään 50 % julkisivujen pinta-alasta. Tätä suurempi ikkunapinta-ala pitää kompensoida vertailutasoja paremmilla ratkaisuilla. Tasauslaskennassa käytettyä raja-arvoa ei kuitenkaan voi käyttää suunnitteluohjeena, koska tarkoituksenmukainen ikkunapinta-ala vaihtelee riippuen rakennustyyppistä ja tilojen käyttötarkoituksesta, runkosyvyydestä ja ympäristön varjostuksesta.

TkT Markku Lappalaisen *Energia- ja ekologiakäsikirjan* mukaan etelä-länsijulkisivujen ikkunapinta-alan ei tulisi ylittää 30 %:a lattia-alasta, eikä pohjois-itäjulkisivujen ikkunapinta-alan 10–15 %:a lattiapinta-alasta (Lappalainen 2010, 115).

Sisätilojen luonnonvalo-olosuhteita voidaan arvioida laskennallisesti päivänvalosuhteen (*daylight factor*, DF) avulla. Se ilmaisee sisätilan valaistusvoimakkuuden suhteen ulkotilan valaistusvoimakkuuteen. Tilasta voidaan laskea keskimääräinen päivänvalosuhte tai päivänvalosuhte tietyssä pisteessä. Päivänvalosuhteen laskennassa ei huomioida suoraa auringonvaloa.

Päivänvalosuhteeseen vaikuttaa olennaisesti ympäröivien rakennusten ja julkisivussa olevien parvekkeiden varjostus. Parvekkeen lasittaminen vähentää lasitetun parvekkeen takana olevan huoneen luonnonvalonsaantia (Vikberg 2014, 70).

Tilan keskimääräinen päivänvalosuhte voidaan laskea erilaisilla simulointiohjelmilla (kuva 10) tai käsin.



Kuva 10. Huonetilan päivänvalosuhde (Velux Daylight Visualizer).

4.5.3 Parhaat käytännöt

Ikkuna-aukotuksella on suuri merkitys asumisviihtyvyydelle, sisätilojen lämpöviihtyvyydelle, rakentamiskustannuksille ja tilojen lämmitysenergiankulutukselle. Siksi tavoitteena tulisi olla, että asuintilojen ikkunat sijoitellaan, suunnataan ja mitoitetaan harkitusti, tietoisena ratkaisujen vaikutuksista sekä rakennuksen energiantarpeeseen että päivänvalo-olosuhteisiin.

Ikkunapinta-alan vaikutusta lämpöhäviöihin voidaan arvioida yksinkertaisesti esimerkiksi laskemalla ulkoseinien tai koko ulkovaipan keskimääräinen U-arvo (kuva 11). Ikkunoiden pinta-alan ja sijoittelun optimoimiseksi rinnalla olisi kuitenkin tarkasteltava analyytisesti myös päivänvalo-olosuhteita, jotta löydetään tasapaino energiatehokkuuden ja asumisviihtyvyyden välillä. Tarkastelut voidaan tehdä päivänvalosimulointiohjelmien avulla. Rakennuksen massoittelessa ja runkosyvyydestä päätettäessä pääpiirteisistä mitoitusohjeista ja nyrkkisäännöistä voi olla apua.

Usein esitetty nyrkkisääntö asunnon runkosyvyydelle on, että huoneen syvyys on enintään kaksi kertaa ikkunan yläreunan korkeus lattiasta mitattuna (esim. Lappalainen 2010, 116). Tämä mitoitusperiaate on esitetty kuvassa 12. Tavallisella kolmen metrin kerroskorkeudella voidaan siis rakentaa 10,4 metriä syviä rakennuksia, mikäli rakennus voidaan avata vastakkaisiin suuntiin ja molemmat julkisivut päästävät riittävästi valoa sisään (Vikberg 2014, 66). Rungon keskelle voidaan toisaalta sijoittaa aputilojen vyöhyke, jossa päivänvalo-olosuhteille ei aseteta vaatimuksia.

Kerrostaloissa alimpien kerrosten asuntojen ikkunapinta-alaa pitäisi periaatteessa kasvattaa ylempiin kerroksiin nähden ympäristön varjostavan vaikutuksen vuoksi. Alimpien kerrosten luonnonvalo-olosuhteita voidaan tarkastella myös ns. *no sky* -linjan (*no-sky line*) avulla. No sky -linja on huoneen ikkunaseinän suuntainen raja, jonka takana ei ole näkymää taivaalle. (Vikberg 2014, 15).



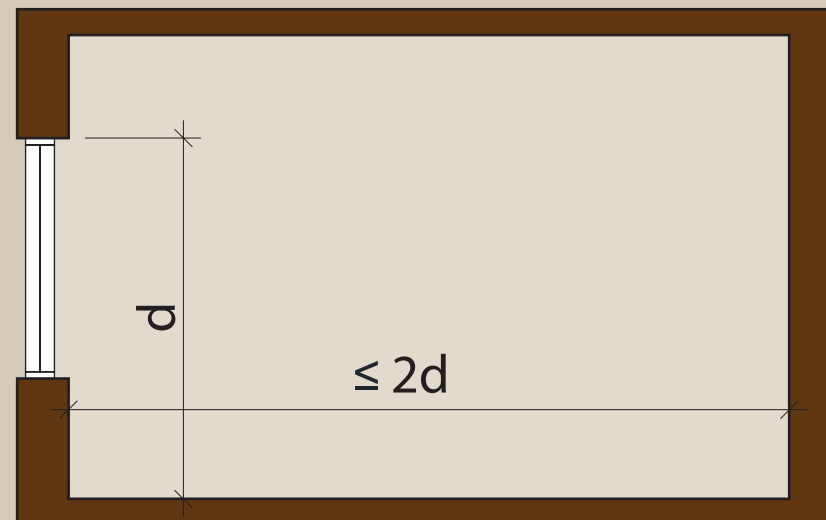
Kuva 11. Ikkunapinta-alan vaikutus ulkoseinän keskimääräiseen U-arvoon.

Suositus päivänvalosuhteesta on korkein keittiöille ja olohuoneille ja pienin makuuhuoneille. Huoneet, joissa päivänvalosuhte on alle 2 %, koetaan usein synkiksi ja niissä käytetään keinovalaistusta. Yli 6 %:n keskimääräiset päivänvalosuhteet saattavat johtaa sisätilan yllilämpenemiseen. Suomalaista ohjeistusta luonnonvalaistuksesta arkkitehtisuunnittelussa on kuitenkin olemassa niukasti. Asuinkerrostalon luonnonvalaistusta diplomityössään tarkastellut arkkitehti Hanna Vikberg arvioi, että Suomessa suositus asunnon keskimääräisestä päivänvalosuhteesta voisi pohjoisesta sijainnista johtuen olla korkeampi kuin monissa ulkomaisissa määräyksissä ja ohjeissa esitetty 2 %:n minimi. Vikbergin mukaan kohteissa, jotka sijaitsevat 54. leveyspiirin pohjoispuolella päivänvalosuhteen suositukseksi on esitetty vähintään 4,5 % (Vikberg 2014, 44).

Active house –konseptissa lasketaan huonekohtaisesti keskimääräinen päivänvalosuhte vaakatasossa 0,8 m korkeudella käyttäen validoitua päivänvalosimulointiohjelmaa. Laskennassa huomioidaan myös ympäröivät rakennukset. Rakennuksen päivänvalosuhdetta ei kuitenkaan määritellä huonekohtaisten laskentatulosten keskiarvona, vaan huonoimman tuloksen mukaan. Arviointikriteeristössä korkein tavoitetaso päivänvalosuhteelle on vähintään 5 % (<http://activehouse.info>).

Useissa standardeissa ja ohjeissa suositellaan myös tiettyjä vähimmäistunteja suoralle auringonpaisteelle asunnossa (Vikberg 2014, 45). Esimerkiksi Iso-Britannian standardeissa suositellaan että rakennuksen kaikkiin huoneisiin (joissa suora auringonvalo on tarpeellinen), tulisi osua suoraa auringonvaloa 5 % keskimääräisistä auringonpaistetunneista talvella aikavälillä 21. syyskuuta–21. maaliskuuta. Suoraa auringonvaloa koskevien tavoitetasojen asettaminen on haastavaa Suomen leveyspiirillä sijaitsevilla kaupunkiympäristöissä, joissa matalakin ympäröivä rakennuskanta estää suoran auringonsäteilyn (Vikberg 2014, 45).

Active house -kriteeristössä arvioidaan myös suoran auringonvalon saantia asuinhuoneissa Iso-Britannian standardien mukaan. Arvioinnissa korkein tavoitetaso on, että asuinhuoneista heikoimmin valaistu saa suoraa auringonvaloa vähintään 10 % ajasta syys- ja kevätpäiväntasausten välisenä aikana (<http://activehouse.info>).



Kuva 12. Nyrkkisääntö ikkuna-aukotuksen korkeuden suhde sisätilan syvyyteen, kun päivänvalosuhteeksi halutaan yli 2 % (Vikberg 2015).

4.6 AURINKOSUOJAUS JA AURINGON PASSIIVINEN HYÖDYNTÄMINEN

4.6.1 Aurinkosuojaus

Aurinkosuojauksen tavoitteena on estää auringonsäteilyn epäedullinen vaikutus sisäolosuhteisiin ja energiankulutukseen. Aurinkosuojauksella tarkoitetaan kahta eri toimintoa:

- varjostusta (suojautumista lämpöviihtyvyyttä heikentävältä suoralta auringon lämpösäteilyltä) ja
- häikäisynestoa (suojautumista näkökenttään osuvilta korkeilta luminansseilta).

Aurinkosuojaus voi perustua

- kiinteisiin varjostaviin rakenteisiin (räystäät, lipat, kiinteät julkisivurakenteet jne.)
- ohjattaviin tai automaattisesti säätäviin julkisivurakenteisiin
- kaihtimiin
- lasin ominaisuuksiin ja auringonsuojakalvoihin.

Aurinkosuojausta tarvitaan myös aurinkoenergian passiivisessa hyödyntämisessä.

Lasin ominaisuuksiin tai auringonsuojakalvoon perustuva aurinkosuojaus ei yleensä sovellu aurinkoenergian passiiviseen hyödyntämiseen, koska se leikkaa sisätiloihin pääsevää auringon kokonaissäteilyä kaikissa tilanteissa - myös lämmityskaudella, jolloin auringon lämpösäteilyn halutaan pienentävän tilojen lämmitystarvetta.

Kaihdin toimii aurinkosuojauksena sitä paremmin, mitä ulompana se sijaitsee ikkunan lämpölaselementtiin nähden. Ikkunan ulkopuolelle asennetut kaihtimet estävät sisätilojen yllälämpenemistä tehokkaasti, mutta niitä käytetään harvoin Suomen ilmastossa. Huonetilaan asennettu kaihdin toimii käytännössä enemmän häikäisysuojana kuin aurinkosuojana, koska kaihtimelle lankeava lämpösäteily on jo päässyt huonetilaan.

Sisälämpötilojen hallintaan voidaan vaikuttaa jo tilojen sijoittelulla. Suurilla ikkunoilla varustetut pienet huoneilat ovat erityisen alttiita kesäaikaiselle yllälämpenemiselle – erityisesti silloin, kun ikkunat suuntautuvat itään tai länteen. Matalalta ikkunaan lankeavaa auringonsäteilyä on vaikeaa torjua muutoin kuin lasituksen ratkaisulla ja kaihtimilla.

Säädettävällä aurinkosuojauksella voidaan torjua eri kulmista lankeavaa haitallista auringonsäteilyä eri tilanteissa. Liikkuvat järjestelmät voidaan jakaa kahteen ryhmään: manuaaliset ja automaattiset järjestelmät.

Luvussa 5.1.3 esitetty esimerkkilaskelma osoittaa, että jäähdytystarpeen kannalta ratkaisevimmat tekijät ovat rakennuksen ikkunapinta-ala, suuntaus, ikkunalasin auringonsäteilyn läpäisyominaisuudet ja aurinkosuojaus. Yllälämpenemistä ei siis estetä lämmöneristystasoa heikentämällä.

4.6.2 Aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen

Aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen tarkoittaa auringon lämpösäteilyn käyttämistä energiankulutuksen pienentämiseen ilman teknisiä järjestelmiä. Aurinkoenergian passivista hyödyntämistä on esimerkiksi

- tilojen lämmitystarpeen leikkaaminen ikkunoista saatavan suoran auringonsäteilyn avulla
- tilojen lämmitystarpeen leikkaaminen rakennuksen aurinkoisen puolen julkisivuun liittyvän lasiseinäisen puskurivyöhykkeen avulla
- suoran auringonsäteilyn hyödyntäminen ulkoilman esilämmitykseen ilmanvaihdossa (esimerkiksi korvausilmaikkuna)
- painovoimaisen ilmanvaihdon tehostaminen käyttämällä ulkopinnaltaan tummaa poistoilmahormia vesikatolla.

Aurinkoenergiaa varastoituu seinä- ja lattiapintoihin, joihin auringonsäteily lankeaa. Lämpöä varaava massa parantaa aurinkoenergiasta passiivisesti saatavaa höytyä (Erat et al. 2008, 58–59).

Aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen on tavanomainen ratkaisu keskieuropalaisissa passiivitaloissa. Suomessa ”aurinkotaloja” tai aurinkoenergiaa passiivisesti hyödyntäviä ratkaisuja on toteutettu erittäin vähän, vaikka esimerkiksi vuonna 2008 julkaistu *Aurinko-opas* (Erat et al. 2008) ohjeistaa ratkaisuja yksityiskohtaisesti ja kattavasti. Toisaalta yleisesti käytettävät lämmöneristystasot ovat muuttuneet vuoden 2010 rakentamismääräysten muutosten myötä, ja parhaiden eristyslasien lämmönläpäisykertoimet ovat parantuneet nopeassa tahdissa.

Seuraavassa kuvataan tarkemmin kaksi vaikutukseltaan merkittävintä keinoa aurinkoenergian passiiviseen hyödyntämiseen.

Etelään suunnatut ikkunat

Erityisesti pientaloissa tilojen lämmitystarvetta voidaan pienentää suuntaamalla verrattain suuri ikkunapinta-ala etelään (kaakko-lounaaseen) ja käyttämällä ikkunoissa laseja, joilla on hyvä lämmöneristävyys ja korkea g-arvo (auringonsäteilyn kokonaisläpäisykerroin). Aurinkoenergian passiiviseen hyödyntämiseen kuuluu aina aurinkosuojaus, jolla vaikutetaan ajallisesti sisätiloihin pääsevän auringonsäteilyn määrään.

Kun aurinkoenergiaa hyödynnetään passiivisesti ikkunoiden kautta, talvella matalalta sisätiloihin lankeava auringon säteily pienentää tilojen lämmitystarvetta. Samalla on kuitenkin hallitaan kesäaikaiset auringon lämpökuormat sisätiloissa esimerkiksi leikkaamalla korkeammassa kulmassa tuleva säteily varjostavalla rakenteella tai kaihtimella (kuva 13).

Aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen länteen tai itään suuntautuvien ikkunoiden avulla on erittäin vaikeaa, koska auringonsäteily lankeaa ikkunaan matalalta, eikä auringonsäteilyn pääsyä sisätilaan voida kontrolloida ajallisesti kuten eteläjulkisivussa.

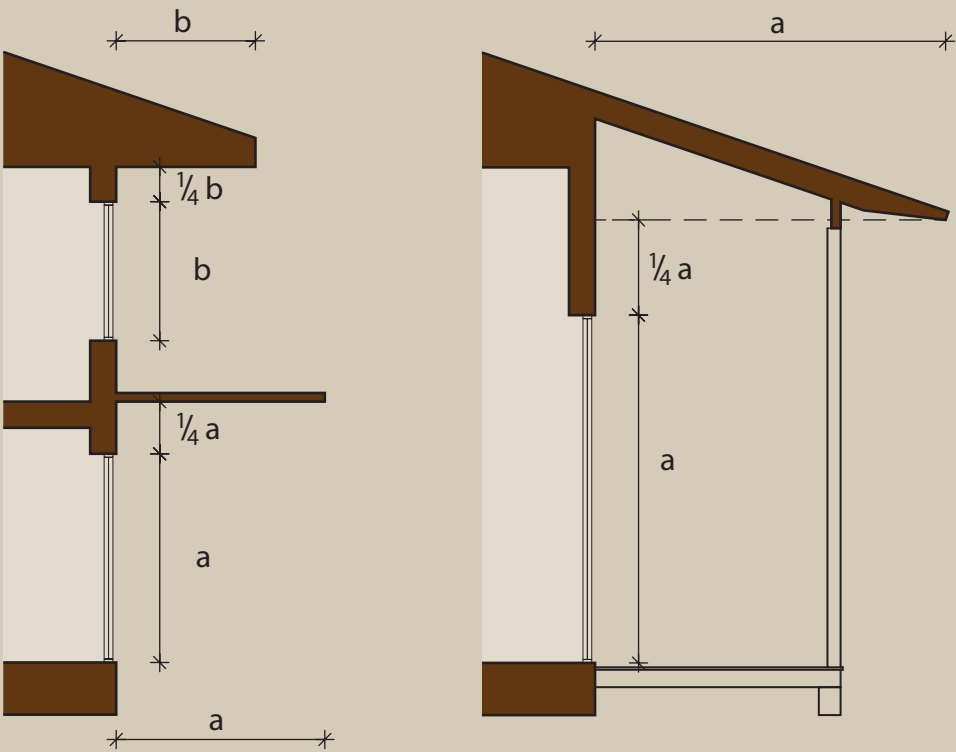
Aurinkoenergian passiivisen hyödyntämisen edellytyksenä on rakennuspaikka, jossa pääosa rakennuksen ikkunoista voidaan luontevasti suunnata etelään ilman puuston tai naapurirakennusten varjostusta.

Kun suurin osa ikkunapinta-alasta halutaan suunnata aurinkoiseen ilmansuuntaan, tavoite vaikuttaa pohjaratkaisuun (kuva 14). Ikkunapinta-alan suuntauksen periaate toteutuu yleensä hyvin rivitaloissa, jossa oleskelutilojen ikkunapinta-ala painottuu tyypillisesti yhteen suuntaan. Myös lamellikerrostalossa ikkunapinta-ala painottuu usein parvekejulkisivuun rakennustyyppistä johtuen.

Rakennuksen lämmitysjärjestelmän on oltava nopeasti reagoiva. Asumistottumukset sekä asukkaiden ja sähkölaitteiden määrät vaihtelevat asunnoissa, ja tämän vuoksi myös yhteenlasketut lämpökuormat vaihtelevat käyttäjittäin. Erityistä huomiota on kiinnitettävä lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmän ohjaukseen ja säätämiseen käyttöönoton jälkeen. Aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen edellyttää sen vuoksi osaamista ja suunnitteluyhteistyötä.

Aurinkoenergiaa passiivisesti hyödyntävissä rakennuksissa pyritään usein välttämään kokonaan jäähdytysjärjestelmän rakentaminen. Suomalaisissa aurinkotaloissa on syytä toteuttaa vähintään ilmanvaihdon sisään ottamaa ulkoilmaa esiviilentävä (ja talvella esilämmitävä) maaliuospiiri, jotta talotekniikalla voidaan vaikuttaa sisälämpötiloihin mahdollisten pitkien hellejaksojen aikana. Tilojen läpituuletusmahdollisuus auttaa asiaa.

Taulukko 3 kuvaa ikkunoiden ja tilojen suuntaamisella sekä lasiosien g-arvon lisäyksellä saavutettavissa olevan säästön tilojen lämmitystarpeessa esimerkkirakennuksessa (kaksikerroksisessa omakotitalossa) Oulun ilmastossa. Ylälämpeneminen on estetty varjostavalla julkisivurakenteella.

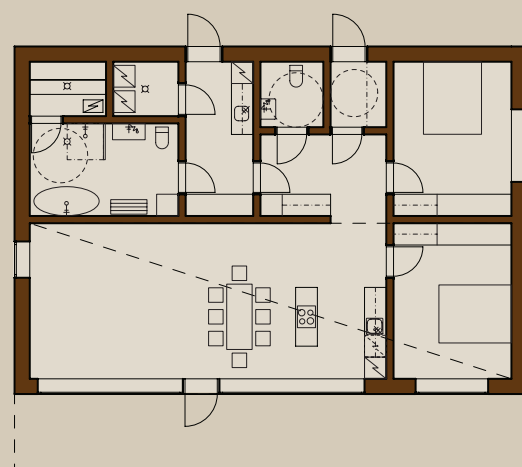


Kuva 13. Periaatepiirros eteläjulkisivun varjostavan rakenteen ohjeellisesta mitoituksesta Oulun ilmastossa. Ikkunan alareunan korkeus lattiasta ei vaikuta varjostavan rakenteen mitoitukseen (Arkkitehtuuritoimisto Kimmo Lylykangas Oy / Oulun rakennusvalvonta 2014).

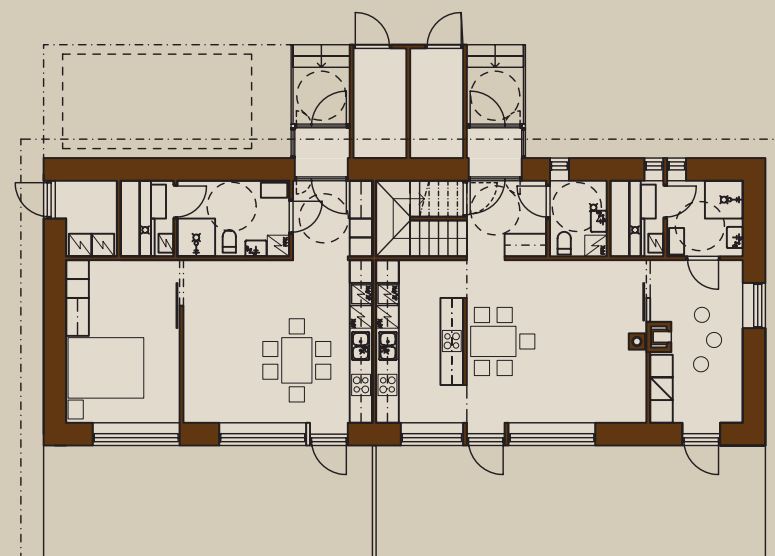
Taulukko 3. Ikkunoiden ja tilojen suuntaamisella sekä lasiosien g-arvon lisäyksellä saavutettavissa oleva säästö tilojen lämmitystarpeessa esimerkkirakennuksessa (kaksikerroksisessa omakotitalossa) Oulun ilmastossa (Lylykangas et al: Aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen, Oulun rakennusvalvontavirasto 2014).

	g = 0.35 tavanomainen ikkuna	g = 0.50 markkinoiden parhaiten soveltuvat "aurinkoarkkitehtuurilla" saavutettava vähennys tilojen lämmitystarpeessa	g = 0.65 tulevaisuuden ikkunaratkaisut "aurinkoarkkitehtuurilla" saavutettava vähennys tilojen lämmitystarpeessa
eniten aukotetun julkisivun suuntaus	energiatehokkuustaso		
KAAKKOON	normitaso	4 - 14 %	8 - 19 %
	passiivitaso	5 - 19 %	10 - 25 %
ETELÄÄN	normitaso	5 - 17 %	9 - 22 %
	passiivitaso	7 - 24 %	12 - 31 %
LOUNAASEEN	normitaso	4 - 15 %	8 - 20 %
	passiivitaso	5 - 20 %	10 - 26 %

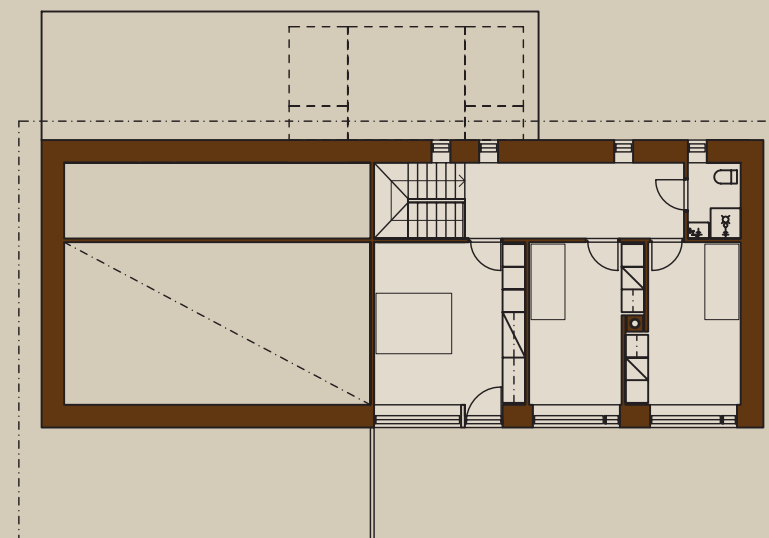
OMAKOTITALO



1 krs

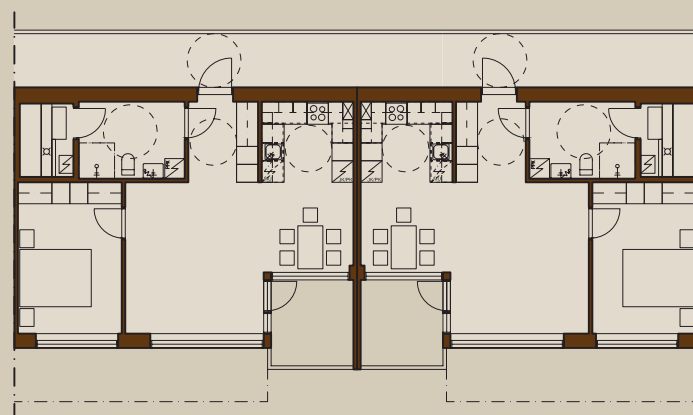


2 krs

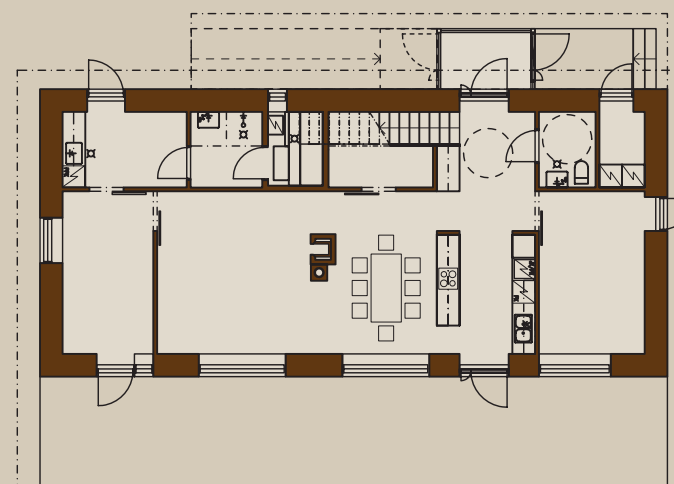


PARITALO

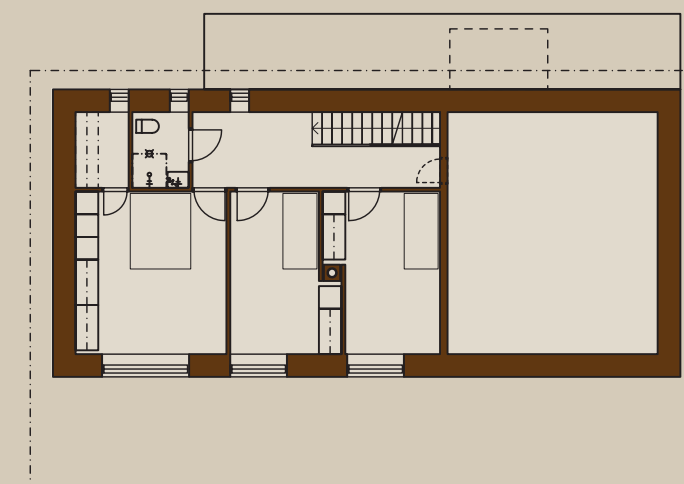
SIVUKÄYTÄVÄTALO



1 krs



2 krs



OMAKOTITALO KAHDESSA TASOSSA

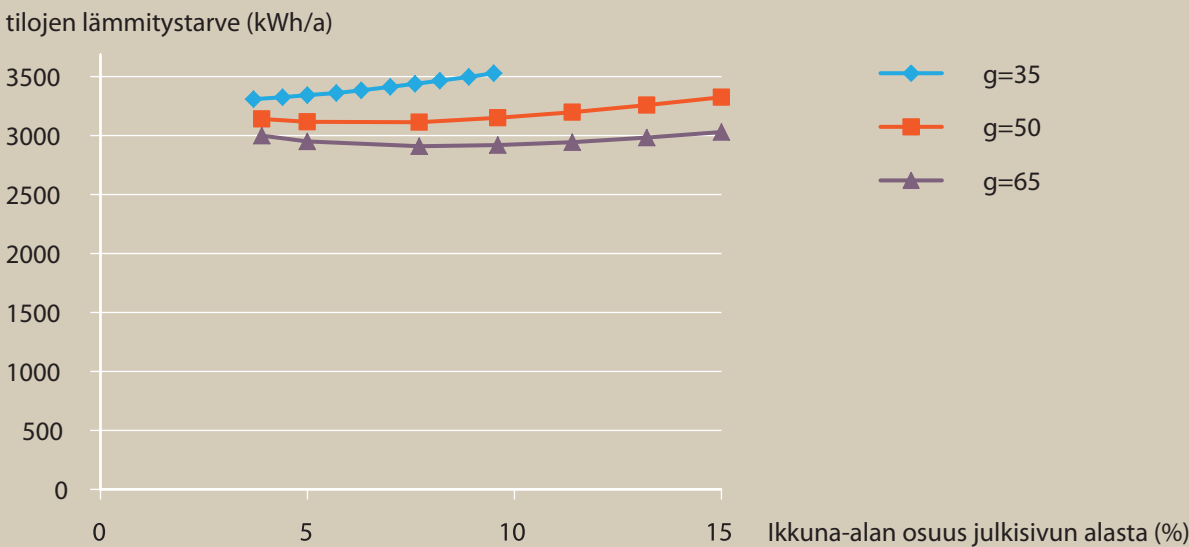
Kuva 14. Esimerkkejä pohjaratkaisuista, joissa tilat ja ikkunapinta-ala voidaan suunnata aurinkoiseen ilmansuuntaan: yksi- ja kaksikerroksinen omakotitalo, paritalo sekä sivukäytäväkerrostalo. Arkkitehtuuritoimisto Kimmo Lylykangas Oy 2014 ja 2015.

Kuva 15 osoittaa, että aurinkoenergian passiivisella hyödyntämisellä ikkunapinta-alan kasvattaminen voi varjostamattomalla tontilla jopa pienentää tilojen lämmitysenergian tarvetta. Auringon lämpökuorma siis pienentää tilojen lämmitystarvetta enemmän kuin ikkunapinta-alan kasvu kasvattaa lämpöhäviötä ulkoseinärakenteeseen verrattuna. Vastaavaa tilannetta ei ole voitu osoittaa asuinkeuhkotalossa tai muissa rakennustyypeissä. Aurinkoenergian hyödyntäminen edellyttää siis lasilta erittäin hyvää lämmöneristävyyttä, mutta samalla auringonsäteilyn kokonaisläpäisevyyttä kuvaavan g-arvon tulisi olla korkea ($\geq 0,5$). Jos U-arvo on heikko, ikkunapinta-alan lisäämisen kokonaisvaikutus jää aina energiankulutusta lisääväksi.

U- ja g-arvon yhdistelmä on tyypillisesti optimoitu kansainvälisen passiivitalomääritelmän mukaan toteutetuissa passiivitaloissa. Keskieurooppalaiset ikkunat ovat yleensä dk-tyypin ikkunoita, jotka avautuvat alasaranoituina tuulettuista varten ja sivusaranoituina pesmistä varten.

Suomessa tyypillisten, kaksipuitteisten avattavien ikkunoiden g-arvo on yleensä verrattain matala. Korkean g-arvon ja matalan U-arvon yhdistelmä saavutetaan kustannustehokkaasti esimerkiksi kiinteästi lasitetuissa MEK-tyypin ikkunoissa. Taulukossa 4 ja kuvassa 16 on esitetty ikkunatyyppejä, jotka soveltuvat aurinkoenergian passiiviseen hyödyntämiseen ikkunoiden kautta.

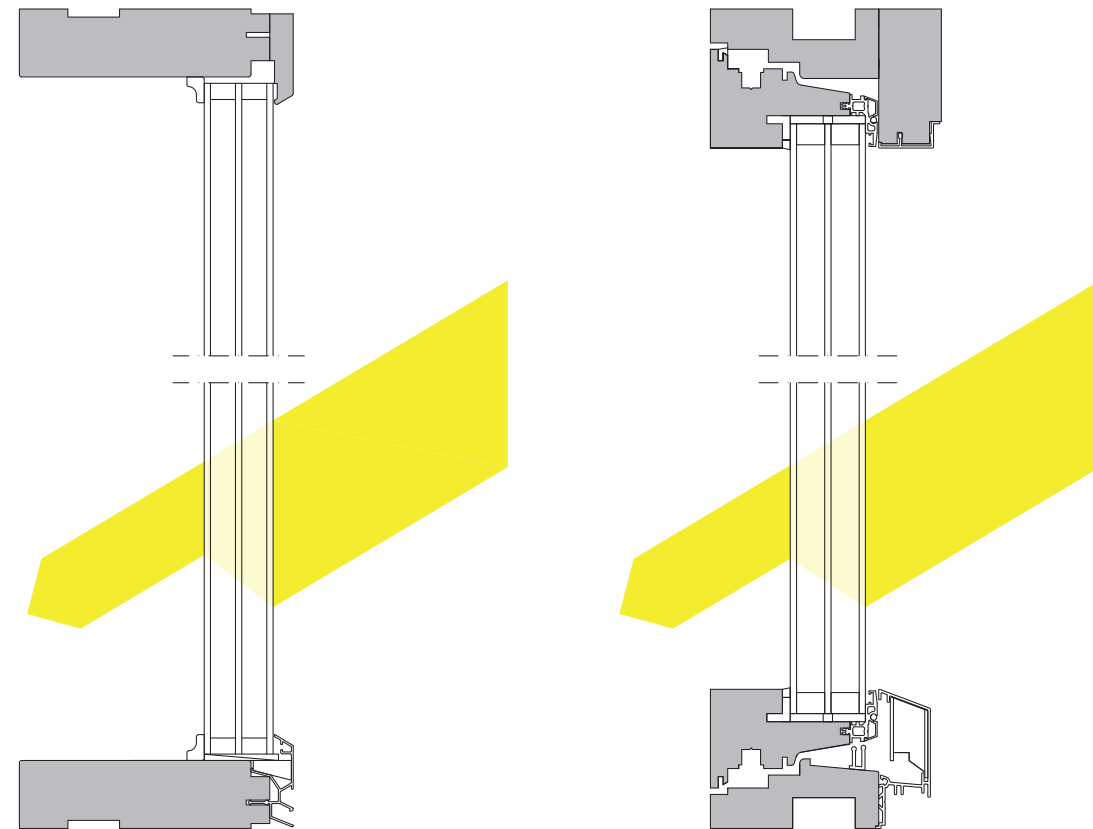
Kuva 15. Lämmöneristystasoltaan vertailuarvojen mukainen omakotitalo Oulussa, 60 % ikkunapinta-alasta suunnattuna etelään (Lylykangas et al: Aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen, Oulun rakennusvalvontavirasto 2014. Dynaaminen energiasimulointi: Equa Simulation Finland Oy).



Taulukko 4. Aurinkoenergian passiiviseen hyödyntämiseen soveltuvia ikkunoita (www.motiva.fi/energialuokitellutikkunat; valmistajan ilmoitus)

	tyyppi	U _w	g _w
Eskopuu MEKA 170_183	MEK	0,71	0,45
HR-ikkunat MEK3A	MEK	0,71	0,45
Skaala ALFA175ULEK_4K	MEK	0,61	0,46
Smartwin standard	DK	0,66	0,50
Pazen Enersign Plus	DK	0,60	0,51

Kuva 16. Aurinkoenergian passiiviseen hyödyntämiseen soveltuvia ikkunatyyppejä. MEK-tyypin kiinteästi lasitettu ikkuna (vas.) ja dk-tyypin kippi-ikkuna (oik.).



Lasitettu puskurivyöhyke

Aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen voi perustua myös lasitettuun tilaan rakennuksen eteläjulkisivussa. Rakennuksen eteläjulkisivulle sijoitettu lämmittämätön viherhuone, lasikuisti tai lasitettu parveke voi muodostaa puskurivyöhykkeen, jossa lämpötila nousee lämmityskauden aikana ulkolämpötilaa korkeammaksi auringonsäteilyn vaikutuksesta. Sisätilan ja auringon lämmittämän puskurivyöhykkeen välisen ulkoseinän lämpöhäviöt pienenevät, koska sisä- ja ulkotilan välinen lämpötilaero on puskurivyöhykkeen kohdalla pienempi kuin sisä- ja ulkotilan välillä. Lämpövyöhykkeen tuottama hyöty heikkenee tai se voidaan menettää kokonaan, jos lasitettua tilaa lämmitetään tai siihen avautuvaa ulko-ovea pidetään pitkiä aikoja avoimena. Lämpövyöhykettä suunniteltaessa on myös ratkaistava lasitettujen tilojen lämpötilojen hallinta kesäaikana.

Lasitettu parveke toimii vastaavalla periaatteella. Lasien ollessa suljettuina lasitetusta parvekkeesta muodostuu puskurivyöhyke, joka voi tuottaa merkittävän vuotuisen säästön tilojen lämmitysenergiantarpeessa⁸ (Hilliaho 2010).

Ulkoseinän lämmöneristävyyttä ei tule heikentää lasikuistin, viherhuoneen tai lasitetun parvekkeen kohdalla. Käytössä on tärkeää huomata, että lasitettu parveke tai puskurivyöhyke ei saa johtaa siihen, että lasitettuun tilaan johtavaa ovea pidetään jatkuvasti avoimena.

Keskieurooppalaisen passiivitalon energialaskennassa puskurivyöhyke huomioidaan korjauskertoimella, koska puskurivyöhykkeeseen rajautuva ulkovaipan ala on talvella ulkoilmaa lämpimämpi. Kertoimelle ei ole määritetty mitään vakioarvoa, vaan se on määriteltävä kohdekohtaisesti.

Seuraavassa esimerkkilaskelmassa tarkastellaan aurinkoenergian passiivisen hyödyntämisen vaikutusta tilojen lämmitystarpeeseen yksikerroksisessa omakotitalossa⁹, jonka lämmöneristystaso on vuoden 2012 rakentamismääräysten vertailuarvojen mukainen. Tarkasteltavassa rakennuksessa ikkunat ovat voimakkaasti etelään suunnatut.

⁸ n. 3–10 %:n säästö 80 m²:n kerrostalohuoneistossa (Hilliaho 2010).

⁹ sijaintina Helsinki.

Laskentatapaukset ovat:

Tapaus 1 on ”perustapaus” eli lämmöneristysmääräysten vertailuarvojen mukainen rakennus, jossa ikkunoiden g-arvo on 0,35 (kaihtimet käytössä, ei varjostavia rakenteita tai ympäristön varjostusta).

Tapaus 2 kuvaa tilojen lämmitystarvetta, kun ikkunoiden U-arvoa parannetaan vertailuarvosta 1,0 W/m²K arvoon 0,65 W/m²K g-arvon muuttumatta. Tätä kuvausta vastaavat suomalaisvalmistajien energiatehokkaimmat ikkunat, esimerkiksi Skaala Alfa 40M, 2 (2+2 -lasitus, karmisyvyys 175, kaihtimet käytössä, ei varjostavia rakenteita tai ympäristön varjostusta). Laskennassa on käytetty seuraavia arvoja:

$$U_w = 0,65$$

$$g_w = 0,35$$

$$ST_g = 0,35$$

Tapauksessa 3 ikkunan g-arvon oletetaan edellä kuvatun U-arvoparannuksen lisäksi nousevan arvosta 0,35 arvoon 0,5. Samalla eteläjulkisivun ikkunoiden yläpuolelle lisätään varjostava lipa, jonka mitoitus on esitetty kuvassa 17. Lisäksi käytössä on kaihtimet ja ympäristö on oletettu varjostamattomaksi. Ikkunoille on käytetty arvoja, jotka vastaavat parasta keskieurooppalaista passiivitalotekniikkaa, esimerkiksi Pazen Enersign Plus. Tämä on avattava dk-tyypin ikkuna jossa 3K-Ar-eristyslasi. Laskennassa on käytetty 3K-lasia Pilkington Optitherm S 1N OW 4wS(1)N-16Ar-4w-16Ar-S(1)N4w (Lasifakta 2012), jonka tekniset arvot ovat (suluissa Pazen Enersign Plus-ikkunalle ilmoitetut arvot)

$$U_g = 0,5 \text{ (0,53)}$$

$$g_g = 0,49 \text{ (0,51)}$$

$$ST_g = 0,45$$

$$LT = 0,74 \text{ (0,71)}$$

Tapauksen 3 ikkunalasitus on valittu siten, että se vastaa keskieurooppalaisen passiivirakentamisen parhaita tuotteita aurinkoenergian passiivisessa hyödyntämisessä.

Tapauksessa 4 ”perustapauksen” (1) mukaisen rakennuksen eteläjulkisivun eteen on rakennettu koko julkisivun mittainen, tasolasista rakennettu viherhuone, jonka mitoitus on esitetty kuvassa 18. Tilaa ei varjosteta tai lämmitetä ja viilennetään ainoastaan ikkunatuuletuksella.

Tapauksessa 5 vastaava viherhuone on tehty 2K-eristyslasista. Tilaa ei varjosteta tai lämmitetä ja viilennetään ainoastaan ikkunatuuletuksella.

Tapaus 6 kuvaa kohtien 2 ja 5 yhteisvaikutusta.

Laskenta on toteutettu dynaamisella IDA Indoor Climate and Energy -simulointiohjelmalla (huonekohtaiset vyöhykkeet). Ikkunoiden ja lasitetun tilan lasiosien tekniset ominaisuudet on kuvattu taulukossa 5.

Laskentatulokset on esitetty kuvissa 19–20.

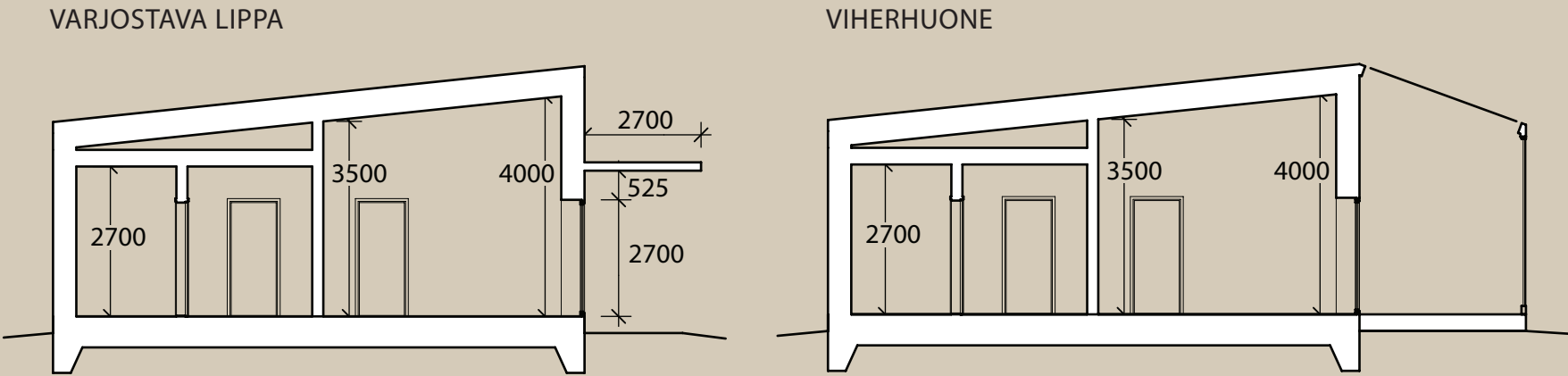
lämmitettävä osa	laskentatapaus					
	1	2	3	4	5	6
	vertailuarvot	matalampi U	matala U ja korkea g	puskurivyöh. tasolasista	puskurivyöh. 2K-lasista	2+5 yhteisvaik.
U _w	1,00 (1,00)	0,65 (0,65)	0,65 (0,60)	1,00 (1,00)	1,00 (1,00)	0,65 (0,65)
g _w	0,35 (0,44)	0,35 (0,35)	0,50 (0,51)	0,35 (0,44)	0,35 (0,44)	0,35 (0,35)
ST _G	0,35 (0,49)	0,35 (0,35)	0,45 (ei ilm)	0,35 (0,49)	0,35 (0,49)	0,35 (0,35)
referenssi - tuote	Skaala (normi MSE 2+1)	Skaala Alfa 40M (MSE 2+2)	Pazen Enersign Plus (3K)	Skaala (normi MSE 2+1)	Skaala (normi MSE 2+1)	Skaala Alfa 40M (MSE 2+2)
puskurivyöh.				tasolasi	2K-eristyslasi	2K-eristyslasi
U _G	-	-	-	5,70	1,10	1,10
G _G	-	-	-	0,82	0,59	0,59
ST _G	-	-	-	0,79	0,47	0,47

Taulukko 5. Lasiosien tekniset arvot laskentatapauksissa.

lähde

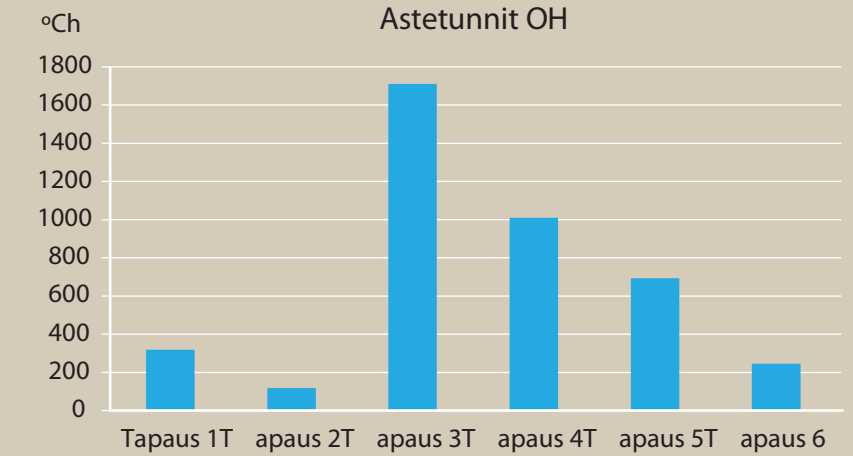
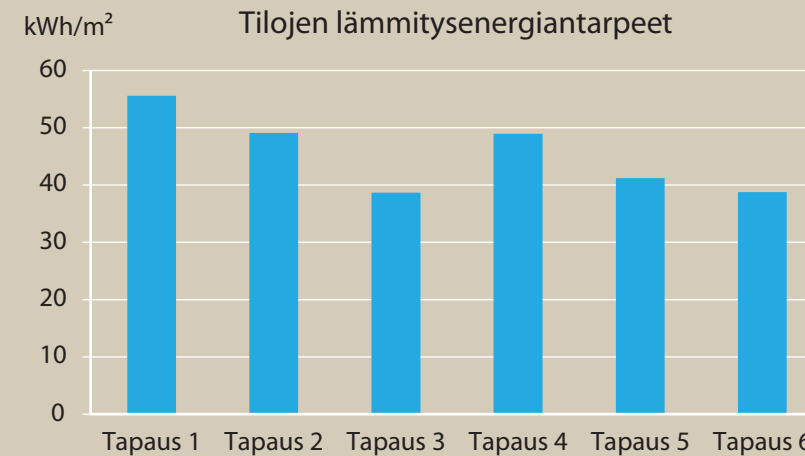
Pilkington lasifakta 2012

Kuva 17 ja 18. Varjostavan rakenteen mitoitus laskentatapauksessa 3 (vas.). Viherhuoneen mitoitus laskentatapauksissa 4 ja 5 (oik.).



Kuva 19. Aurinkoenergian passiivisen hyödyntämisen vaikutus tilojen lämmitystarpeeseen: 1) lämmöneristysmäärysten vertailuarvojen mukainen tilanne 2) ikkunoiden U-arvoparannus 3) ikkunoiden g-arvon nostaminen ja varjostava lippa 4) tasolasista rakennettu viherhuone eteläjulkisivussa 5) 2K-eristyslasista rakennettu viherhuone eteläjulkisivussa ja 6) kohtien 2 ja 5 yhteisvaikutus.

Kuva 20. Olohuoneen astetuntitarkastelu: 1) lämmöneristysmäärysten vertailuarvojen mukainen tilanne 2) ikkunoiden U-arvoparannus 3) ikkunoiden g-arvon nostaminen ja varjostava lippa 4) tasolasista rakennettu viherhuone eteläjulkisivussa 5) 2K-eristyslasista rakennettu viherhuone eteläjulkisivussa ja 6) kohtien 2 ja 5 yhteisvaikutus.



Tulokset osoittavat, että ikkunoiden g-arvo on ratkaiseva tekijä sekä tilojen lämmitystarpeen että huonetilojen yllämpenemisen kannalta erityisesti silloin, kun ikkunat on suunnattu aurinkoiseen ilmansuuntaan. Energiansäästöpotentiaali Etelä-Suomessa on merkittävä, mutta samalla tulee pystyä estämään sisätilojen yllämpeneminen kesällä.

Tasolasista tehty viherhuone tai muu vastaava puskurivyöhyke on säästötoimenpiteenä vaikuttavuudeltaan ikkunoiden U-arvoparannusta vastaava. Eristyslasista tehty puskurivyöhyke säästää merkittävästi lämmitysenergiaa, mutta sen rakennuskustannukset ovat vastaavasti suuret Viherhuone tai vastaava lasitettu tila eteläjulkisivussa vähentää siis tilojen lämmitysenergiatarvetta, mutta sen toteutus on taloudellisesti järkevää vain silloin, kun tämänkaltaiselle lämmittämättömälle, lasitetulle tilalle on muukin tarve kuin energiansäästö (Lappalainen 2010, 116).

On myös huomattava, että määräysten vertailuarvoa vastaavissa tavanomaisissa MSE-ikkunoissa on usein korkeampi g-arvo kuin laskelman ”perustapauksena” käytetty 0,35. Aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen ei kuitenkaan toteudu, ellei tiloja ja ikkunapinta-alaa suunnata systemaattisesti etelään ja samalla yllämpenemistä hallita rakenteellisin keinoin.

Yhden esimerkitarkastelun perusteella ei voida vielä esittää väitteitä aurinkoenergian passiivisen hyödyntämisen säästöpotentiaalista yleisesti. Esimerkitarkastelu antaa kuitenkin käsityksen erilaisten hyödyntämiskeinojen vaikuttavuudesta. Lisäksi se osoittaa, että rakenteellisen energiatehokkuuden kaikkia keinoja ei vielä osata hyödyntää rakennussuunnittelussa.

Aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen on tyypillisesti väljien omakotitalotonttien energiansäästökeino. Matalalta paistavan auringon kääntäminen energiatehokkuuden hyödyksi edellyttää varjostamatonta lähiympäristöä ja mahdollisuutta suunnata suuri ikkunapinta-ala etelään. Ns. vapaa auringon paistekulma määritellään jo asemakaavoituksessa (Erat et al. 2008, 34). Kaupunkirakenteessa ympäristön varjostus rajoittaa mahdollisuuksia aurinkoenergian passiiviseen hyödyntämiseen (Shemeikka et al. 2014, 29–33).

Lasitettu puskurivyöhyke vähentää osaltaan sen takana oleviin sisätiloihin pääsevää auringonsäteilyä. Jos tätä kompensoidaan suuremmalla ikkunapinta-alalla, osa puskurivyöhykkeen tuottamasta energiansäästöstä menetetään.

Vaikuttaa siltä, että lasiosien g-arvon vaikutukseen ei ole yleisesti ottaen kiinnitetty riittävästi huomiota. Tämän seurauksena on suunniteltu ja toteutettu esimerkiksi suuria asuinkerrostalojen porrashuoneiden ikkunoita kiinteästi lasitetuilla ikkunoilla, joiden g-arvo on tyypillisesti korkea. Suurilla ikkunoilla varustetuista porrashuoneista muodostuu aurinkokeräimiä, jotka yllämpenevät helposti, ellei aurinkosuojausta ole muistettu suunnitella.

4.6.3 Parhaat käytännöt

Eteläsuuntauksen ja puskurivyöhykkeiden hyödyllisyys on tiedostettu kokemuseräisesti arkkitehtisuunnittelussa vuosikymmeniä ja kauemminkin. Kokemuksia ja numeerista tietoa aurinkoenergian passiivisen hyödyntämisen säästöpotentiaalista Suomen ilmastossa ei ilmeisesti kuitenkaan ole ollut käytettävissä riittävästi (esim. Leppänen 2004, 57), koska aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen on yhä harvinaista. Suomalaisia esimerkkejä aurinkoenergian passiivisesta hyödyntämisestä on esitetty kuvissa 21 ja 22.

Ajankohtia, jolloin sisätiloihin lankeaa ikkunasta suoraa auringonsäteilyä, voidaan arvioida suunnittelussa mallinnusten tai auringon paistekulmia kuvaavan aurinkokaavion avulla (kuva 23).

Keskieurooppalaisen passiivirakentamisen tavanomaisiin käytäntöihin kuuluu aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen. Aurinkoenergiaa hyödyntävän julkisivun ratkaisut voidaan optimoida passiivitalojen energialaskentaan tarkoitettussa PHPP-ohjelmassa. Suomessa aurinkoenergian passiivista hyödyntämistä lasketaan yleensä dynaamisilla simulointiohjelmilla, joista kaikki eivät huomioi huoneiden välistä lämmönsiirtymistä.

Keskieurooppalaisten passiivitaloikkunoiden energiatehokkuutta arvioidaan kahden tunnusluvun (U- ja g-arvon) perusteella, kun suomalainen tuotekehitys on painottanut U-arvoa. Vastaavasti energiatehokkaan rakentamisen suomalaisohjeistus on yleensä suositellut mahdollisimman matalan g-arvon ikkunoita sisäolosuhteiden hallitsemiseksi ja yllämpenemisen välttämiseksi. Matalan U-arvon ja korkean g-arvon yhdistelmä toteutuu kiinteästi lasitetuissa ikkunoissa (MEK-ikkunatyypin), joissa keskieurooppalaisten kippiikkunoiden (dk-ikkunoiden) tapaan on vain yksi eristyslaselementti. Esimerkiksi parvekkeiden ja terassien laajoissa ikkunapinnoissa kiinteästi lasitettu ikkuna voi parhaimmillaan olla edullinen ratkaisu, jossa pestäviä pintoja on vain kaksi.

Lasitetut parvekkeet toimivat asuinkerrostaloissa energiaa säästävinä puskurivyöhykkeinä. Suunnitteluratkaisujen optimoimiseksi sekä parvekkeen ja sisätilojen olosuhteiden hallitsemiseksi tarvittaisiin kuitenkin yksityiskohtaisempaa suunnitteluohjeistusta.

Kun tavoitteena on auringon lämpöenergian hyödyntäminen, energialaskijan on osattava ajatella kokonaisuutta uudesta näkökulmasta: auringon lämpö ei ole pelkästään jäähdytystarvetta aiheuttava lämpökuorma vaan myös ilmaisenergiaa. Jos ulkovaipan ikkunapinta-ala pystytään kääntämään myös energiatehokkuuden hyväksi, voidaan suunnitella tiloja, joissa energiatehokkuuden, viihtyvyyden ja luonnonvalo-olosuhteiden välillä ei tarvitse tehdä kompromisseja.

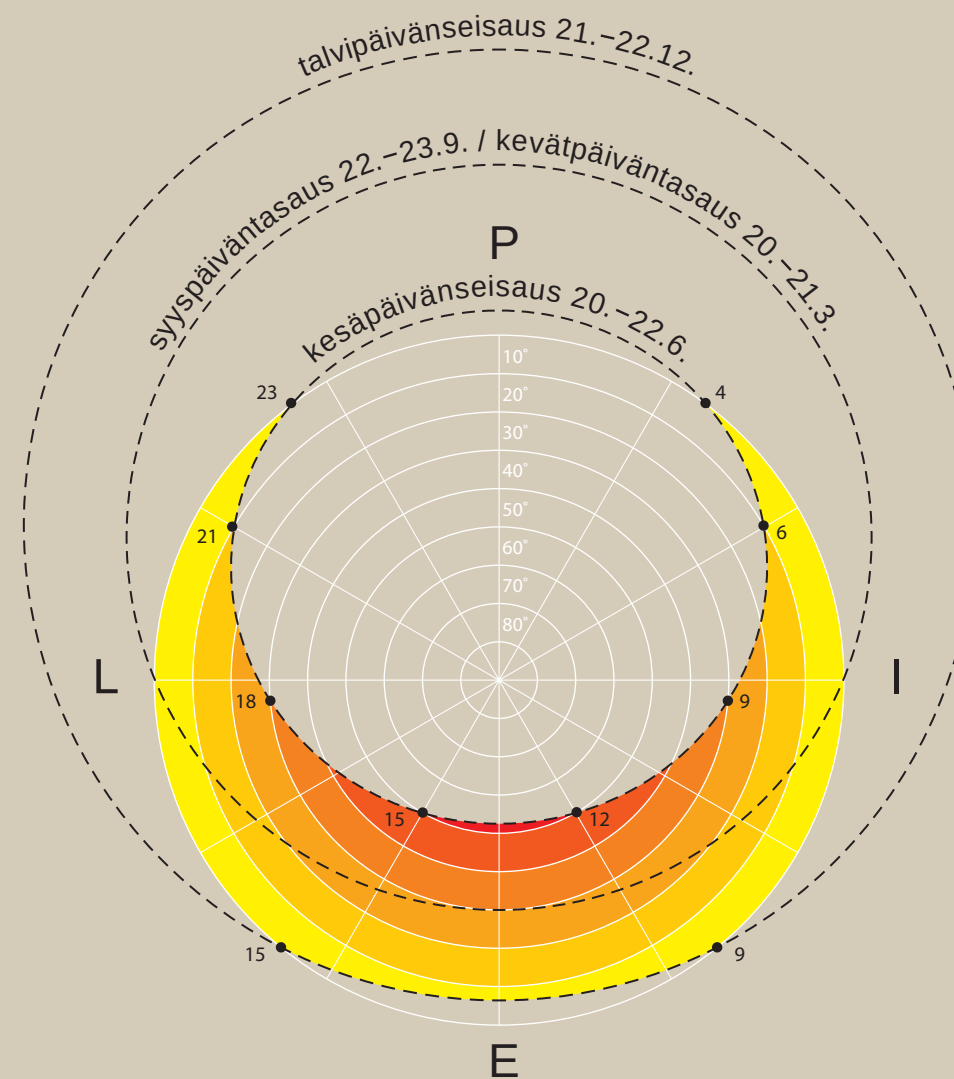
Aurinkoenergian passiivisen hyödyntämisen riski on sisälämpötilojen hallinta. Kesäajan yllämpeneminen hallitaan oikein mitoitetuilla varjostavilla rakenteilla myös Suomea lämpimämmissä ilmastoissa. Aiheeseen liittyy kuitenkin selvästi lisätutkimuksen ja mitoitusohjeiden tarve.

Kuva 21. Varjostava rakenne suojaa ikkunoita, kun aurinko paistaa korkeimmalta kesäpäivän seisauksen aikaan. Kiinteistö Oy Ouluntarve, TA-Asunnot 2015.



Kuva 22. Onnelanpolun palvelutalossa (Lahti, 2014) on lasitettu puskurivyöhyke, joka palvelee asukkaita puolilämpimänä tilana.





Kuva 23. Varjostavien tekijöiden vaikutusta ikkunoista sisätiloihin lankeavaan auringonsäteilyyn voi arvioida ns. aurinkokaavion avulla. Kaavio osoittaa auringonsäteilyn kulman Helsingissä. (Arkkitehtuuritoimisto Kimmo Lylykangas Oy 2014).

5. Energiatehokas ulkovaippa

5.1 LÄMMÖNERISTYS

5.1.1 Lämmöneristys energiatehokkuuden kulmakivenä

Rakennusten energiatehokkuuden määräysohjaus on perustunut Suomessa vuosikymmenet rakenteiden U-arvoille asetettaviin enimmäisarvoihin, ja niiden avulla uudisrakennusten ominaisenergiankulutus ja energiankäytön kasvihuonekaasupäästöt on saatu käännettyä laskuun (kuva 24). Pohjoisessa ilmastossa tilojen lämmitystarpeen minimointi säilyy energiatehokkaan rakentamisen kulmakivenä, vaikka energiatehokkaan rakentamisen keinovalikoima onkin laajentunut.

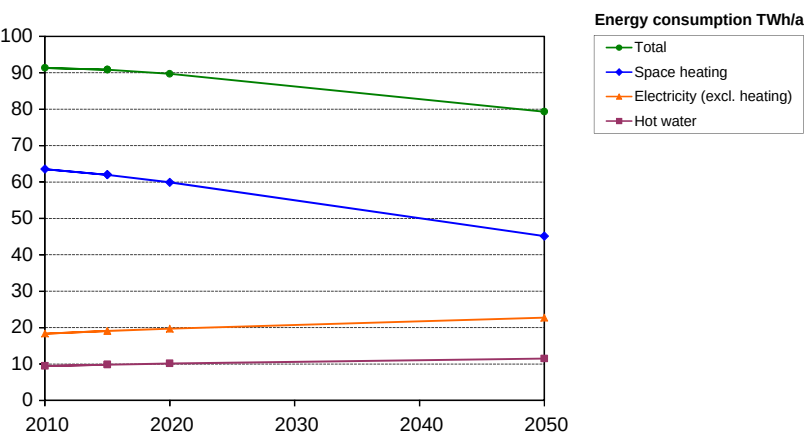
Rakenteet tulee suunnitella ja toteuttaa siten, että lämmöneriste pysyy kuivana eikä sen läpi kulje hallitsemattomia ilmavirtauksia. Lämmöneristyskerroksen mitoitus on riippuvainen lämmöneristeen lämmönjohtavuudesta. Useimmat lämmöneristeet perustuvat paikallaan pysyvään ilmakerrokseen, joka vähentää johtumista ja konvektiota.

Valtaosa nykyisin käytettävistä ulkovaipparakenteista on monikerrosrakenteita, joissa eri rakennekerroksilla on erilaisia toiminnallisia tehtäviä. Massiiviset, yksiaineiset rakenteet ovat helppoja toteuttaa ja rakennusfysikaaliselta toimivuudeltaan yksinkertaisia (RIL 249-2009, 208), mutta niillä ei yleensä saavuteta tavoiteltua lämmöneristävyttä.

Monikerrosrakenteissa rakenteen ulkopuolisen osan on oltava riittävän tiivis estääkseen tuulen ja sadeveden pääsyn rakenteeseen. Lämmöneristeen ulkopinnassa tulee olla haitallisia ilmanvirtauksia estävä tuulensuoja. Ulkoverhouksen takana on oltava tuuletusrajo, jotta mahdollisesti sinne päässyt kosteus tuulettuu pois. Lämmöneristeiden lämpimälle puolelle asennetaan tiivis ja yhtenäinen ilman- ja/tai höyrynsulkukerros.

Lämmöneristyksellä aikaansaatavaa energiansäästöä kuvaavat laskentamallit ovat pitkään käytettyjä ja hyvin tunnettuja.

Tässä oppaassa on tarkasteltu rakentamismääräysten asettamia rakennusosien U-arvojen vertailuarvoja paremmin eristettyjä rakenteita, joiden U-arvot on kuvattu taulukossa 6.



Kuva 24. Skenaario Suomen rakennuskannan energiankulutuksesta (Tuominen, Pekka et al. 2014, 158).

Taulukko 6. Suositustaso esittää tässä oppaassa käsiteltävien rakenneratkaisujen lämmöneristävyys (W/(m²K)) suhteessa rakentamismääräysten vertailuarvoihin ja toteutettuihin, energiatehokkaisiin rakennuskohteisiin.

	U-arvo (W/m²K)		
	US	YP	AP
vertailuarvot / SRakMK D3 2012	0,17	0,09	0,16/0,17
rakenteellisen energiatehokkuuden suositustaso	0,12 -0,14	0,07	0,10
toteutetut energiatehokkaat rakennukset	0,07 -0,14	0,05 -0,09	0,07 -0,10

Alapohjarakenteiden lämmöneristävyyden parantuessa maanvaraisten rakenteiden routasuojaukseen on tullut muutoksia. Alapohjan lämpöhäviö on pienentynyt, ja samalla sen rakenteita lämmittävä vaikutus on vähentynyt. Tämä merkitsee sitä, että esimerkiksi perustasantura eristetään yhä useammin kaikilta sivuiltaan. Matalaenergiarakenteiden routasuojaus on ohjeistettu yksityiskohtaisesti ohjeessa RIL 261-2013.

Ilmastonmuutoksen hillitsemisen ja verkkosähkön tuotantotapojen johdosta sähkönkulutuksen tehohuippujen leikkaaminen on noussut yhdeksi rakennusten energiatehokkuuden parantamisen tavoitteista. TkT Miimu Airaksinen ja TkL Mika Vuolle ovat osoittaneet esimerkkirakennuksen energiasimuloinilla, että vertailuarvojen mukaisesti toteutettuun rakennukseen verrattuna passiivitalotasoisella rakentamisella leikataan tehokkaasti myös huipputehoa, vaikka ero muodostuukin hieman pienemmäksi kuin energiankulutuksessa mitattuna (Airaksinen & Vuolle 2013, 245). Rakenteellisen energiatehokkuuden ratkaisusta esimerkiksi aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen pienentää tilojen lämmitystarvetta, muttei auta leikkaamaan lämmitystehoa.

5.1.2 Lämpöviihtyvyys

Hyvin lämpöä eristävällä ulkovaipalla pienennetään energiankulutusta ja varmistetaan hyvä lämpöviihtyvyys sisätiloissa. Lämmöneristetyin ulkovaipan rajaamassa tilassa ylläpidetään sisäilmastoa, jonka olosuhteille voidaan asettaa tavoitearvoja suunnittelussa esimerkiksi sisäilmaluokituksen avulla. Sisäilmaluokituksessa 2008 on annettu ohjearvot erityyppisten tilojen optimilämpötiloille ja sen vaihteluvälille laatuluokissa S1 (yksilöllinen), S2 (hyvä) ja S3 (tyytyttävä). Ohjearvoissa on talvi- ja kesätilanteiden lisäksi huomioitu myös välikauden tilanne, joka edustaa suurta osaa vuodesta.

Lämpöviihtyvyyteen vaikuttavat monet eri tekijät, joista tärkeimmät ovat

- ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus tilassa
- ympäröivien rakenteiden pintalämpötilat
- ilman liike ja nopeus huoneessa
- erot sisä- ja ulkolämpötilojen välillä.

(RT 07-10946)

Riittävän lämmöneristysten lisäksi rakennuksen vaipan tulee olla ilmatiivis. Vedon tunteen voi aiheuttaa rakenteiden vuotokohdista sisälle tuleva ilma tai alhaisista pintalämpötiloista johtuva ilman liikkuminen.

5.1.3 Lämmöneristystason vaikutus sisätilan ylilämpenemiseen

Normitasoa paremman lämmöneristyksen on useassa yhteydessä arvioitu lisäävän rakennuksen jäähdytystarvetta (esimerkiksi Lahdensivu et al. 2012, 14). Herkkyystarkastelu kuitenkin osoittaa, että rakennuksen lämmöneristystason vaikutus jäähdytystarpeeseen on pieni verrattuna muihin jäähdytystarpeen kannalta olennaisiin suunnitteluparametreihin. Esimerkkilaskelman valossa jäähdytystarpeen kannalta ratkaisevimmat tekijät ovat rakennuksen ikkunapinta-ala, suuntaus, ikkunalasien auringonsäteilyn läpäisyominaisuudet ja aurinkosuojaus.

Esimerkkilaskelma tehtiin samalle rakennukselle, joka on kuvattu luvussa 4.6. Tarkasteltava rakennus on kuvattu kuvissa 14 ja 17 (yksikerroksinen omakotitalo, eteläjulkisivussa varjostava lippa). Laskentatyökaluna käytettiin dynaamista energiasimulointiohjelmistoa IDA Indoor Climate and Energy, ja mallinnuksessa käytettiin huonekohtaisia lämpövyöhykkeitä. Jäähdytystarvetta tarkasteltiin tässä Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaisesti astetuntien avulla.

Esimerkkilaskelmassa tarkasteltiin ikkunoiden g-arvon ja ulkovaipan eristystason vaikutusta astetunteihin ja tilojen lämmitystarpeeseen.

Yksittäisistä huonetiloista ainoastaan olohuoneessa astetunnit ylittävät rakentamismääräyskokoelman raja-arvon 150 (taulukko 7). Lämmöneristystasojen ja ikkunoiden g-arvomuutoksen vaikutus tilojen lämmitystarpeeseen on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 7. Astetunnit olohuoneessa.

Olohuoneen astetunti	Rakenteet 1	Rakenteet 2
	Seinän U-arvo = 0,17 Katon U-arvo = 0,09 Ikkunan U-arvo = 1,0	Seinän U-arvo = 0,14 Katon U-arvo = 0,07 Ikkunan U-arvo = 0,8
Ikkunan g- arvo = 0,55	180	233
Ikkunan g- arvo = 0,38	3	4

Taulukko 8. Tilojen lämmitystarve koko rakennuksessa.

Tilojen Lämmöntarve (kWh)	Rakenteet 1	Rakenteet 2
	Seinän U-arvo = 0,17 Katon U-arvo = 0,09 Ikkunan U-arvo = 1,0	Seinän U-arvo = 0,14 Katon U-arvo = 0,07 Ikkunan U-arvo = 0,8
Ikkunan g- arvo = 0,55	7096	5896
Ikkunan g- arvo = 0,38	7655	6410

Tulokset osoittavat, että ylälämpeneminen estetään ensisijaisesti ikkunoihin liittyvillä suunnitteluratkaisuilla ja varjostavilla rakenteilla. Lämmöneristystasolla on merkittävämpää vaikutusta astetunteihin vain siinä tapauksessa, jos ikkunoiden aurinkosuojaus on jätetty huomiotta. Esimerkkitapauksessa olohuone ylälämpenee lämmöneristystasosta riippumatta, jos ikkunoiden g-arvo on korkea. Sisätilojen ylälämpenemistä ei siis ratkaista lämmöneristystä heikentämällä vaan suunnittelemalla aurinkosuojaus.

5.1.4 Radiosignaalin läpäisevyys

Useissa uudisrakennuksissa on havaittu matkapuhelimen kuuluvuuden heikentyneen (esim. Niemelä et al. 2012, 33). Tämä on seurausta mobiiliteknologian kehityksestä: käyttöön on otettu laajeneva määrä erilaisia mobiililaitteita, joilla on yhä laajempi tiedonsiirtokapasiteetti. Samalla on otettu käyttöön entistä korkeampia taajuusalueita.

Nykyaikaisen rakennuksen ulkovaipassa radiosignaalia heikentävät mm. sandwich-elementtirakenteen verkkomaiset raudoitteet, lämmöneristeiden heijastavat kalvot ja ikkunoiden eristyslasien low-e-pinnoitteet, joissa on erittäin ohut kerros metalia tai metallien oksideja. Low-e –pinnoitteet yleistyivät eristyslaseissa Suomessa jo 1980-luvulla. Niiden vaikutus eristyslasien hyvään lämmöneristävyyteen on ratkaiseva, eikä radiosignaalin kuuluvuutta siksi voida parantaa lasiratkaisuja vaihtamalla.

Uusien asuinkerrostalojen suunnittelussa ongelma voidaan huomioida suunnittelemalla rakennukseen tilavaraus *sisääntenniverkkojärjestelmälle*, joka jakaa matkaviestinverkon signaalin rakennuksen sisälle esim. käytävätiloihin asennettavilla antennilla. Talojakamoon voidaan asentaa joko toistimia tai tukiasemia tuottamaan matkaviestinverkon peittoa sisääntenniverkon kautta. Sisääntenniverkko toteutetaan, jos kuuluvuus osoittautuu huonoksi, eikä sitä voida parantaa rakennuksen ulkopuolelta. Ratkaisuja tarjoavat matkapuhelinoperaattorit.

Erityisesti pientaloissa radiosignaalin kuuluvuutta voidaan parantaa myös suunnittelemalla ulkovaippaan *radiosignaaliaukkoja* (RF-aukkoja), joissa materiaalit valitaan siten, että ne vaimentavat radiosignaalia merkittävästi muuta ulkovaippaa vähemmän (Matkapuhelimien kuuluvuus sisätiloissa – Energiatehokas uudis- ja korjausrakentaminen 2013).

5.1.5 Parhaat käytännöt

Energiatehokkaiden rakennuskohteiden ulkovaipan lämmöeristävyytasoja on kuvattu taulukossa 9.

Raportissa *Rakenteellisen energiatehokkuuden passiivitason malliratkaisut 2012* kuvataan 14 energiatehokkaan pientalon ulkovaipan rakenneratkaisut. VTT on tutkinut rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden, ja useista raportin kohteista on myös mittaustuloksia (Rakenteellisen energiatehokkuuden passiivitason malliratkaisut 2012).

Oulussa rakennusvalvonnan rakennuttajille suuntaama koulutus ja tiedotus on johtanut siihen, että valtaosa uudisrakentajista asettaa omaehtoisesti hankkeensa energiatehokkustavoitteen määräysten vähimmäisvaatimusta paremmaksi.

kohde	sijainti	valm. vuosi	rakenteiden U-arvo W/m²K					ilmanpitävyys	
			US	YP	AP	ovet	ikkunat	n ₅₀	q ₅₀
omakotitaloja									
IEA5 Aurinkotalo	Pietarsaari	1994	0,14	0,09	0,1 (0,09)	0,4	0,7	0,8	
Rannanpeltotalo	Suomusjärvi	1997	0,12	0,084	0,1	0,4	0,85		
Villa 2000	Tuusula	2000	0,13	0,11	0,15	0,5	0,9	1,0	
Passiivitalo Salomaa	Kaarina	2009							0,36
Villa Laine		2009	0,10	0,07	0,07		0,79		
Paroc Lupaus	Valkeakoski	2009	0,09	0,06	0,07	0,4-0,7	0,7/0,8	0,6	
Paroc Passiivitalo (paritalo)	Tikkurila	2009	0,09	0,07	0,09	0,7	0,75	0,33/0,25	
Isover Multi -Comfort	Nummela	2010	0,08	0,05	0,10	0,7	0,5/0,70	0,6	
Villa Borg	Espoo		0,1	0,09	0,15				
Talo Holopainen	Hyvinkää	2010	0,10	0,06/0,07	0,10	0,60	0,76	0,60	
Nollaenergiatalo Kivitasku	Mäntyharju	2011	0,08	0,06	0,08		0,76	0,09	
nettoplusenergiatalo Luukku	Mäntyharju	2011	0,09	0,08	0,08	0,8	0,35	0,56	
Tervakukka	Tampere	2012	0,11	0,07	0,09				
nettonollaenergiatalo Lantti	Tampere	2012	0,085	0,057	0,08		0,7	0,3	
TA Oravarinne	Espoo	2013	0,07	0,06	0,09	0,28	0,51/0,66	0,3	
nettonollaenergiatalo Villa Isover	Hyvinkää	2013	0,09	0,06	0,09	0,6/0,75	0,76		0,4
rivitaloja									
Vaso Soininen	Naantali	2013	0,11	0,08	0,09	0,72	0,75		1,0
Kiinteistö Oy Oulun Tarve	Oulu	2015	0,13	0,08	0,14	0,7	0,8		<0,6
kerrostaloja									
Mera -kerrostalo	Heinola	2009	0,16	0,08	0,1		0,8	0,4	
Nettonollaenergiatalo Kuopas	Kuopio	2011	0,08	0,07	0,1	0,4	0,75	0,4	
Mestaritorppa	Järvenpää	2011							0,18-0,35
TA Rita -aukiontie 18	Oulu	2014	0,13	0,09	0,14		0,5		
Kivistön PuuMera, Rubiinikehä 1 B	Vantaa	2015	0,12	0,09	0,1	0,59	0,59	0,5	

Taulukko 9. Lämmöneristystasoja energiatehokkaissa uudisrakennuksissa.

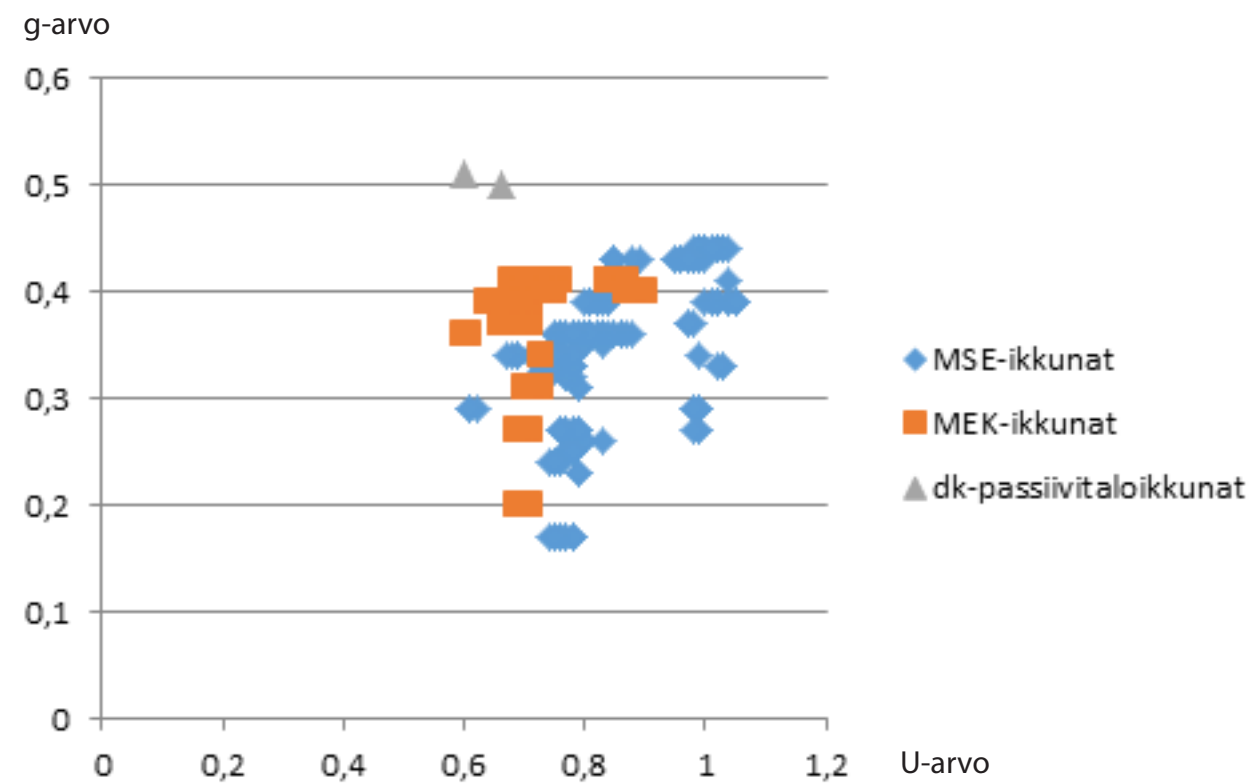
5.2 OVET JA IKKUNAT

5.2.1 Energiatehokkaat ikkunat

Ikkunoiden lasiosien lämmöneristävyys on parantunut viime vuosina pitkin harppauksin (taulukko 10). Lasiosan parantunut lämmöneristävyys johtaa parhaimmillaan suunnilleen perinteisen hirsiseinän lämmöneristävyyttä vastaavaan U-arvoon.

Suomalaisvalmisteisissa avattavissa ikkunoissa matalimmat U-arvot saavutetaan tyypillisesti 2+2 -lasituksilla ja 3+1 -lasituksilla. Kiinteästi lasitetuissa ikkunoissa lämmöneristävyydeltään parhaat lasitukset ovat käytännössä 4K-eristyslaselementtejä. Eristyslaseissa käytetään lähes poikkeuksetta Argon-kaasutäytettä sen edullisen hinnan ja hyvän pysyvyyden vuoksi.

Suomalaiset ikkunat saavuttavat yhtä matalan U-arvon kuin parhaat keskieuropallaiset ikkunat¹⁰, mutta ovat hinnaltaan selvästi Keski-Euroopan parhaita passiivitaloikkunoita edullisempia. Ikkunatyypit ovat erilaiset eri maissa: kaksipuitteinen sisäänaukeava ikkunatyyppejä on perusratkaisu Suomessa, mutta jo muissa pohjoismaissa käytetään erilaisia ikkunatyyppejä. Tämä vaikuttaa myös arkkitehtuuriin: kaksipuitteiseen suomalaisikkunaan tarvitaan tyypillisesti pienempi avattava osa tuuletusta varten, kun taas keskieuropallainen dk-ikkuna avautuu yläosastaan tuuletusta varten, ja ikkunat ovat usein jakamattomia ja pystysuuntaisia. Kaksipuitteisen suomalaisikkunan etuna on mahdollisuus kaihtimien sijoittamiseen puitteiden välitilaan.



Kuva 25. Energialuokiteltujen suomalaisikkunoiden U- ja g-arvoja (www.motiva.fi).

¹⁰ U-arvojen määrittelyssä käytettävä ikkunan standardikoko on kuitenkin erilainen Keski-Euroopassa ja Suomessa.

5.2.2 Auringon säteilyn kokonaisläpäisevyys

Keskieurooppalaisten passiivitaloikkunoiden kehitystä on ohjannut korkean g-arvon ja matalan U-arvon tavoittelu, kun suomalaisikkunoiden tuotekehityksessä on painotettu enemmän U-arvoa. Lämmöneristävyys onkin näistä kahdesta arvosta painoarvoltaan merkittävämpi rakennuksen ulkovaipan energiatehokkuudelle.

5.2.3 Parhaat käytännöt

Energiatehokkuuden kannalta olisi optimaalista käyttää suuria ikkunaruujuja, jossa hyvin eristävää eristyslasin lasiosaa on paljon suhteessa heikommin eristävään reunaosaan. Myös eristyslaselementtien kustannusten kannalta yksi suuri elementti on edullisempi kuin vastaava pinta-ala useammasta pienestä eristyslaselementtiruudusta toteutettuna.

Asunnon luonnonvalo-olosuhteita tutkinut Hanna Vikberg osoittaa diplomityössään, että ihannetapauksessa ikkunat eriytettäisiin niiden käyttötarkoituksen mukaan, esimerkiksi

- korkealla sijaitseva vaakasuuntainen ikkuna on valaistusta varten
- keskellä seinää sijaitseva suuri ikkuna näkymää varten ja
- helposti avattava pieni ikkuna tuuletusta varten. (Vikberg 2014, 85).

LASITYYPPI	g-arvo	U-arvo
2K -lasi	0,61	1,1
2K -lasi, auringonsuoja	0,27	1,0
3K -lasi	0,49	0,54
3K -lasi, auringonsuoja	0,36	0,54
3K -lasi, auringonsuoja	0,24	0,54
4K -lasi	0,36	0,32
5K -lasi	0,24	0,21

Taulukko 10. Erilaisille eristyslasyypeille käytettyjä U-arvoja (Thalfeld et al. 2013).

Pitkälle optimoidussa ratkaisussa ikkunatyypin voitaisiin määritellä tavoiteltavien ominaisuuksien ja ikkunan käyttötarkoituksen mukaan. On olemassa toteutettuja rakennuskohteita, joissa ikkunan lasiosan ominaisuudet ovat erilaiset eri ilmansuuntiin suuntautuvis- sa julkisivuissa¹¹. Vaikka tämän lähestymistavan toteuttaminen tavanomaisessa rakennussuunnittelussa onkin haastavaa, olisi ikku- naratkaisuissa syytä vielä nykyistä huolellisemmin ja analyyttisemmin pohtia ikkunoiden funktioita ja valita parhaiten tarkoitukseen sopivat mitoitus ja tekniset ratkaisut.

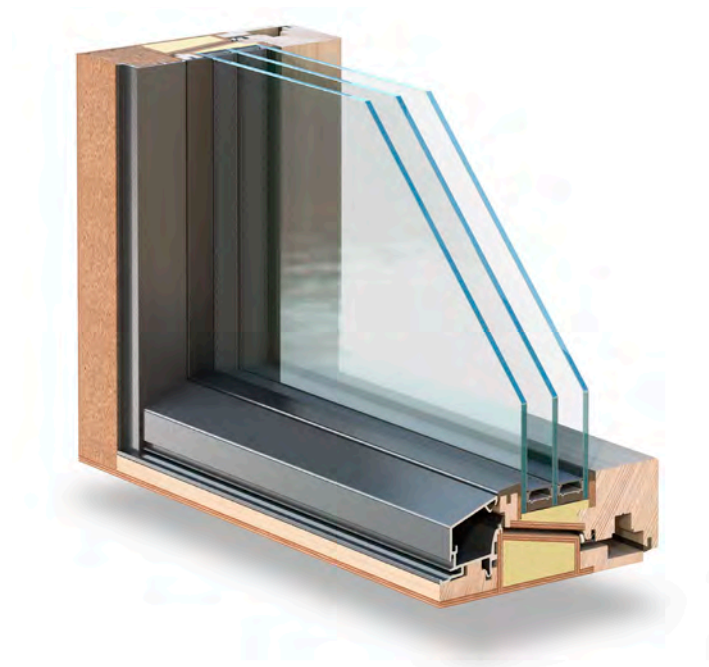
Puurunkoisissa rakennuksissa ikkunoiden mitoituksessa ja sijoittelussa voidaan parhaimmillaan huomioida runkotolppajako (kuva 26). Tämä vähentää ikkuna-aukon vaatimia ylimääräisiä runkorakenteita, jotka heikentävät seinän lämmöneristävyttä.

Vaikka ikkunoiden lämmöneristävyys on parantunut nopeassa tahdissa, ratkaisuja voidaan silti yhä kehittää eteenpäin. Esimerkik- si keskieurooppalaiset passiivitaloikkunoiden valmistajat pyrkivät yhä parempiin U-arvoihin minimoimalla lasiaukkoa kehystävien umpiosien yhteenlasketun korkeuden (umpiosien prosentuaalisen osuuden ikkunan projektiossa) sekä kehittämällä puitteeseen ja karmiin lämpökatkoja (kuvat 27 ja 28). Lämpökatkon merkitys on toisaalta erityisen suuri dk-tyypin ikkunassa, jossa karmin syvyys on pieni suomalaisiin avattaviin MSE-tyypin ikkunoihin verrattuna.

¹¹ Esimerkiksi Onnelanpolun palvelutalo Lahdessa (2014).



Kuva 26. Passiivitalon seinäelementin ikkunoiden sijoittelussa ja ikkunoitten koossa on huomioitu runkotalppien k600-jako.



Kuvat 27 ja 28. Lämpökatkoja dk-tyypin ikkunakarmissa. Smatwin Arctic (vas, kuva: Franz Freundorfer, Pro Passivhausfenster) ja Variotec-ikkunan karmiprofiili (oik, kuva: Kimmo Lylykangas).

5.3 KYLMÄSILLAT

5.3.1 Kylmäsilan määritelmä

Kylmäsilta on kohta vaipparakenteessa, jossa lämpöhäviö eroaa rakenteen tavanomaisesta lämpöhäviöstä. Kylmäsilta mielletään perustellusti ongelmakohtaksi. Kylmään vuodenaikaan suurempi lämpöhäviö kylmäsilan kohdalla aiheuttaa paikallisesti alemman lämpötilan rakenteessa, aiheuttaen kondensoitumisriskin ja tätä kautta mahdollisesti kosteusongelman.

Rakenteellinen ja geometrinen kylmäsilta

Kylmäsilta muodostuu joko geometrisesta epäjatkuvuuskohdasta (ulkovaippa vaihtaa suuntaa) tai paikallisen käytettävän materiaalin epäjatkuvuuskohdasta. Käytettyjen rakennusmateriaalien eri lämmönjohtuvuuksista johtuvaa kylmäsiltaa kutsutaan rakenteelliseksi kylmäsilaksi. Aiemmin mainittua geometrisestä epäjatkuvuuskohdasta aiheutuvaa kylmäsiltaa kutsutaan geometriseksi kylmäsilaksi.

Geometrisia kylmäsiltoja on vaikea välttää. Jokaisen rakennuksen nurkka toimii epäjatkuvuuskohtana ja muodostaa kylmäsilan. Geometrisen kylmäsilta johtuu siitä, että rakenteen sisäpinnan ja ulkopinnan pinta-alat ovat erilaiset. Suomessa kylmäsilat rakennusten nurkissa lasketaan käyttäen ala- ja yläpohjien sekä ulkoseinien sisämittoja (SRakMK D5).

Viivamainen ja pistemäinen kylmäsilta

Kahden vaipparakenteen nurkassa muodostuva geometrinen kylmäsilta on viivamainen. Sen lisäkonduktanssi esitetään Ψ_k -arvona, jonka yksikkö on $W/(m \cdot K)$. Myös ikkuna- ja oviaukkojen sekä välipohjaliitosten ja kantavien väliseinän sokkelien kylmäsilat ovat viivamaisia kylmäsilloista. Niiden aiheuttamat lämpöhäviöt riippuvat Ψ_k -arvosta ja kylmäsilan pituudesta [m].

Kylmäsilta voi myös olla pistemäinen. Nämä kylmäsilat muodostuvat yleensä lämmöneristekerroksen läpäisevistä rakenteista, esim. tiiliulkoseinien ankkureista, rappausristeiden kiinnikkeistä ja parvekkeiden kiinnityspulteista. Pistemäiset kylmäsilat esitetään X_j -arvolla, jonka yksikkö on W/K . Pistemäisten kylmäsiltojen vaikutus rakennuksen kokonaisenergiankulutukseen riippuu kylmäsiltojen määrästä ja X_j -arvosta.

5.3.2 Kylmäsiltojen merkitys

Kylmäsilat rakenteen energiatehokkuuden ongelmakohtana

Kylmäsilat aiheuttavat lämpöhäviöitä rakenteissa, ja niiden vaikutus rakennuksen energiatehokkuuteen voi olla merkittävä. Hyvillä suunnitteluratkaisuilla voidaan usein säästää paljon energiaa pienellä sijoituksella.

Kylmäsiltojen merkityksen havainnollistamiseksi tarkastellaan teoreettista rakennusta, betonirunkoista pientaloa, jonka sisämitat ovat 10 m x 10 m (nettoala 100 m²).

Esimerkki 1: Pientalossa on yhteensä 40 juoksumetriä sokkelia. Alapohjan ja rungon liitoskohta muodostaa kylmäsilan, jonka Ψ_k -arvo on SRakMK D5 taulukon 3.1 mukaan 0,24 W/(mK). Kylmäsilan vaikutus talon lämpöhäviöön on 40 m x 0,24 W/(mK) = 9,6 W/K. Helsingin lämmitystarvetta ilmaisevalla astetuntiluvulla 95 kKh tämä kylmäsilta aiheuttaa 912 kWh energiankulutuksen lisäyksen vuodessa, eli 9,1 kWh/m².

Jos alapohjan ja rungon liitosta optimoidaan siten, että sokkeliin tehdään kylmäsiltakatko esimerkiksi kevytsoraharkkoista alapohjan lämmöneristeen korkeudelle, on alapohjan ja ulkoseinän liitoksen Ψ_k -arvo mahdollista parantaa suurin piirtein arvoon 0,05 W/(mK). Tällöin kylmäsilan kokonaisvaikutus pienenee huomattavasti. Ero kahden esimerkkirakenteiden välillä on yli 7 kWh/m².

Mahdolliset kylmäkatkot on aina laskettava kohdekohtaisesti eri rakenneratkaisujen mukaisesti.

Esimerkki 2: Pientalossa oletetaan olevan yhteensä 10 ikkunaa, joiden koko on 1x1 m. Ikkunaliitoksien pituus talossa on siis yhteensä 40 juoksumetriä. Ikkunaliitoksen Ψ_k -arvo on SRakMK D5 taulukon 3.1 mukaan 0,15 W/(mK), jos ikkuna on asennettu betonirungon kohdalle. Tällöin vaikutus koko taloon on 40 m x 0,15 W/(mK), yhteensä 6 W/K. Helsingin astetuntimäärällä tämä aiheuttaa vuodessa 570 kWh:n energiankulutuksen (5,7 kWh/m²).

Tilannetta parannetaan siten, että ikkuna asennetaan lämmöneristeen kohdalle. Tällöin kylmäsilan Ψ_k -taulukkoarvo on 0,04 W/(mK), jolloin energiankulutuksen lisääntyminen on vain 1,5 W/m², ero näiden kahden ratkaisun välillä on yli 4 kWh/m².

Kaksi yllä esitettyä esimerkkiä osoittavat kylmäsiltojen suuren merkityksen energiatehokkuudelle silloin, kun lähtötilanne on heikko. Lisäksi betoni runkomateriaalina on kylmäsiltojen kannalta yleensä haastava.

Kylmäsiltojen esiintymistä ei tosin voida välttää vaikka runkomateriaali olisi puu ja suunnitteluratkaisut hyvät.

Esimerkki 3: Oletetaan, että kyseinen pientalo on tehty puusta ja lasketaan kylmäsiltojen vaikutus koko rakennuksen energiatehokkuuteen SRakMK D5 taulukon 3.1 mukaan. Talossa on siis 40 juoksumetriä sokkeliliitosta (Ψ_k -arvo 0,10 W/(mK)), 40 juoksumetriä ikkunoiden ja ovien liitosta eristeen kohdalla (Ψ_k -arvo 0,04 W/(mK)), 40 metriä ulkoseinän ja yläpohjan välistä liitosta (Ψ_k -arvo 0,05 W/(mK)) sekä 10 juoksumetriä ulkonurkkien liitosta olettaen, että sisäkorkeus on 2,5 m (Ψ_k -arvo 0,06 W/(mK)). Kaikkiaan kylmäsiltojen vaikutus E-lukuun on siis:

sokkeliliitos	3,8 kWh/m ²	(40 m x 0,10 W/mK x 95 kKh / 100 m ²)
ikkunaliitos	1,5 kWh/m ²	(40 m x 0,04 W/mK x 95 kKh / 100 m ²)
yläpohjaliitos	1,9 kWh/m ²	(40 m x 0,05 W/mK x 95 kKh / 100 m ²)
ulkonurkkien liitos	0,4 kWh/m ²	(10 m x 0,04 W/mK x 95 kKh / 100 m ²).

Kylmäsiltojen yhteenlaskettu vaikutus rakennuksen energiatehokkuuteen on tässä esimerkissä 7,6 kWh/m². Vaikutus E-lukuun riippuu käytetyn energiamuodon kertoimesta. Sähkölämmitteisessä rakennuksessa se olisi 1,7 x 7,6 kWh² = 12,9 kWh/m², kun taas pellettilämmitteisessä rakennuksessa 0,5 x 7,6 kWh/m² = 3,8 kWh/m².

Kylmäsiltojen vaikutus asuinmukavuuteen

Kylmät kohdat ulkovaipan sisäpinnassa aiheuttavat epämukavuutta yleensä vedon tunteena. Tästä syystä moni asukas nostaa sisäilman lämpötilaa. Se, kuinka monta astetta alempi paikallinen pintalämpötila saa olla, jotta vedon ja kylmän tuntua ei ole, on hyvin henkilökohtainen asia. Asiaan perusteellisesti paneutunut Passivhaus Institut Saksasta suosittelee, että vaipan sisäpintalämpötila olisi aina vähintään 17 °C .

Kylmäsiltojen homeongelmien ja muiden kosteusongelmien aiheuttajana

Jos rakenteen pintalämpötila on tarpeeksi alhainen, kondensoituu lämpimän sisäilman vesihöyry kylmiin pintoihin. Vedeksi kondensoitunut kosteus saattaa olla vaara jo itse rakenteille , kun taas homeen kasvun mahdollistaa jo pitkäaikainen yli 80 prosentin suhteellinen kosteus rakenteen pinnassa . Tarkemman analyysit homeen synnystä on esitetty luvussa 6. Kun Suomessa lähes kaikissa uudisrakennuksissa on koneellinen ilmanvaihto, mikä laskee kosteuden määrää sisäilmassa, ei sisäpinnan lämpötila yleensä ole ongelma muutoin kuin silloin, jos rakenteessa on rakennusvirheitä ja niistä johtuvia ongelmia (esimerkiksi ulkoseinän ja alapohjan liitos ei ole tiivis ja vuotaa kylmää ilmaa lattian raja-alueeseen). Rakennuskannassa, jossa ilmanvaihto on painovoimainen ja ilman vaihtuvuus etenkin talvella usein pienempi, ongelma voi olla paljon suurempi .

5.3.3 Kylmäsiltojen laskeminen

Kylmäsiltojen laskemisen tavoite on saada selville rakenteen todellinen lämpöhäviö, jotta voidaan ilmaista todellisen rakenteen ja normirakenteen ero, eli kylmäsiltojen Ψ_k -arvo. Kylmäsiltojen laskentatapa määritellään normissa EN ISO 10211.

Laskemalla kylmäsiltojen vaikutukset voidaan paremmin arvioida rakennusten energiankulutusta ja kohdentaa energiankulutuksen kannalta tärkeät rakenteet. Kylmäsiltojen laskeminen kasvattaa ymmärtämystä kylmäsiltojen vaikutuksesta rakenteille ja keinoista kylmäsiltojen eliminoinnille. Markkinoilla on useita tietokoneohjelmia, joilla viivamaiset kylmäsiltojen voidaan suhteellisen helposti laskea.

Kolmiulotteisten, pistemäisten kylmäsiltojen laskeminen on sen sijaan huomattavasti työläämpää, mutta SRakMK:n ohje D5 ei myöskään edellytä niiden huomioimista. Käytännön työhön hyvä ohje olisi pyrkiä laskemaan aina rakennuksen viivamaiset kylmäsiltojen. Helpoin tapa niiden huomioon ottamiseen on standardisoitujen detaljien kylmäsiltojen kirjasto, jolloin kerran laskettua arvoa voidaan käyttää samojen detaljien yhteydessä yhä uudestaan. Tämä laskentatapa toimii hyvin erityisesti taloteollisuuden toistuvissa detajiratkaisuissa.

Rakennusten suunnittelussa joudutaan kuitenkin usein poikkeamaan standardidetalleista. Tällöin kylmäsiltojen tulee laskea erikseen.

Viivamaisen kylmäsiltojen laskeminen

Rakentamismääräyskokoelman osassa D5 annetaan rakennusosien liitosten viivamaisille kylmäsiltoille taulukkoarvot, joita käytetään rakennuksen määräysten mukaisuutta osoittaessa silloin, kun kylmäsiltoja ei erikseen analysoida laskennallisesti. Taulukkoarvot ovat verrattain korkeat, mikä kannustaa tekemään rakennusosien kylmäsiltojen tarkastelut hankekohtaisesti.

Standardi SFS-EN ISO 10211 antaa viivamaisen kylmäsillan laskentaa seuraavat kaksi perussääntöä.

1) Viivamaisen kylmäsillan ψ_k arvo lasketaan kaavalla

$$\psi_k = L2D - \sum U_j \cdot l_j$$

jossa $L2D$ = kaksiulotteisella tarkastelulla saatu todellinen lämpövuoto rakenteessa

U_j = liittyvän rakenteen U-arvo

l_j = liittyvien rakenteiden rajapinnan pituus.

2) Jotta kylmäsillan vaikutus tulee huomioitua tarpeeksi perusteellisesti, tulee kutakin tutkittua rakennetta olla mukana 1 m tai vähintään kolme kertaa rakenteen paksuuden verran.

Viivamaisen kylmäsillan laskemiseen riittää kaksiulotteinen tarkastelu laskentaohjelmalla. Ohjelmia on markkinoilla useita, osa niistä ovat jopa ilmaisia, kuten laajasti käytetty *Lawrence Berkeley National Laboratoryn* (LBNL) kehittämä Therm, joka laskee kaksiulotteisen rakenteen lämmönjohtumisen EN ISO 10211 –standardin mukaisesti.

Laskeminen tapahtuu seuraavin askelin:

- tutkittavasta rakenteesta mallinnetaan kaikki materiaalikerrokset joko CAD-ohjelmassa, josta se tuodaan laskentaohjelmaan, tai vaihtoehtoisesti mallinnetaan rakenteet suoraan laskentaohjelmaan
- rakenteen materiaaleille määritetään lämmönjohtumiskertoimet (lambda-arvo) laskentaohjelmassa
- rakenteen sisä- ja ulkopinnoille määritetään pintavastukset sekä lämpötilat ja määritetään, mitkä rajapinnat kuuluvat sisä-, ulko- ja mahdollisesti maan pintaan
- suoritetaan lämmönsiirtymisen simulointi
- lasketaan simuloidun rakenteen ja teoreettisen rakenteen lämmönjohtumisen ero eli ψ_k -arvo yllä esitetyllä kaavalla.

Viivamaisen kylmäsillan laskenta on suoraviivaista, kun tarkastelussa on vain tunnettu ja vakioksi oletettavat sisä- ja ulkolämpötilat. ψ_k -arvo ei ole kahden pintalämpötilan tapauksessa riippuvainen itse lämpötilaeron gradientista. Tällöin voidaan suorittaa laskenta joko EN 10211 standardin lämpötilaerolla (sisälämpötila 1 K, ulkolämpötila 0 K) tai todenmukaisilla lämpötiloilla (esimerkiksi 20 °C sisälämpötila, -26 °C ulkolämpötila). Ilmoitettu ψ_k -arvo määritellään kuitenkin lämpötilariippuvaisena (W/(mK)), jolloin laskennassa käytetyt lämpötilaerot ovat samantekevät, kunhan lämpötilaeroja on olemassa. Jos laskennassa käytetään useampaa kuin kahta pintalämpötilaa, tulee nämä määritellä tarkasti.

Astetta vaikeampi, mutta tavanomainen laskentatilanne on maahan rajoittuvan rakenteen kylmäsillan tarkastelu. Lämpötila rakennuksen alla ja sivulla olevassa maaperässä ei ole vakio. Lisäksi rakennuksen nurkat luovat kolmiulotteisia laskentatilanteita, joita ei voida luotettavasti tarkastella 2D-laskennalla.

Standardi EN ISO 10211 esittää tästä huolimatta 2D-laskentamenetelmän käyttöä. Kyseinen menetelmä perustuu alapohjan karakteristisen mitan B' käyttöön siten, että maamassaa otetaan rakennuksen sisäpuolella mukaan mallinnukseen $0,5 \cdot B'$ verran (B' on alapohjan karakteristinen mitta) ja rakennuksen ulkopuolella ja alapuolella $2,5 \cdot B'$ verran. Sisälämpötilaksi asetetaan 1 K ja ulkolämpötilaksi 0 K. Maan lämpötila lasketaan saadun lämpötilaeron perusteella.

Laskenta on monimutkainen ja sen tulokset saattavat siitä silti erota huomattavasti 3D-laskennan tuloksista. Menetelmällä on myös se huono puoli, että alapohjan karakteristisen mitan käytöstä johtuen tulos on jokaisessa rakennuksessa erilainen. Kertaalleen laskettuja alapohjan ja ulkoseinän liitosten ψ_k -arvoja ei voida käyttää toisissa rakennuksissa.

Keski-Euroopassa käytetään saksalaisen standardin DIN 4108 (2006) liitteessä 2 esitettyä yksinkertaistettua tapaa laskea maahan rajoittuvien rakenteiden kylmäsillat, joka ei ole rakennuksen mitoista riippuvainen. Koska tässä oppaassa tarkastellaan rakenteita yleisellä tasolla, liittämättä niitä mihinkään konkreettiseen rakennukseen, on maanvastaiset kylmäsillat laskettu standardin DIN 4108 mukaan.

DIN 4108 (2006) liitteen 2 mukaisessa laskutavassa maaperä jätetään pois rakenteen mallinnuksessa, ja sen sijaan rakennuksen maahan rajoittuvalle pinnalle annetaan oma vakioämpötila. Normirakenteen maahan johtuvan lämmön määrää korjataan lisäksi ns. korjauskertoimella. Normin

DIN V4108-6 taulukko 3 esittää korjauskertoimeksi 0,6, jos alapohja on maanpinnan yläpuolella tai korkeintaan metrin sen alapuolella. Korjauskertoimen F avulla määritetään maaperän lämpötilakerroin f, joka on 1-F. Jos F on 0,6, on f siten 0,4. Tämän avulla lasketaan maaperän lämpötila, joka on

ulkolämpötila + fg x (sisälämpötila – ulkolämpötila).

Esimerkki: Jos ulkolämpötila on -5 °C ja sisälämpötila 20 °C, on maaperän lämpötila tällöin -5 °C + 0,4 x (20 °C - (-5 °C)) = 5 °C

Suomen oloissa -26 °C ulkolämpötilaa ja lämpötilakerrointa 0,4 käyttäessä maan lämpötila olisi pakkasen puolella, mikä ei vastaa todellista tilannetta. Tämä ei kuitenkaan estä laskentatavan käyttöä. Voidaan joko käyttää yllä esitettyjä lämpötiloja (sisäilma 20 °C, ulkoilma -5 °C, maan lämpötila 5 °C) tai käyttää mitä tahansa Suomeen sovellettua lämpötila-arvoa (esimerkiksi sisäilma 20 °C, ulkoilma -26 °C, maan lämpötila 5 °C), mutta käyttää niiden mukaista korjauskerrointa psi-arvon laskennassa (lämpötilakerroin f = 5 °C - (-26 °C) / 20 °C - (-26 °C) = 0,67 eli korjauskerroin energialaskennassa 1-0,67 = 0,33). Molemmilla tavoilla laskettuna tulokset eroavat toisistaan jonkin verran, mutta antavat arvokkaita tuloksia verrattuna tilanteeseen, että kylmäsilta jätettäisiin laskematta.

Tässä tapauksessa alapohjan maahan rajoittuvan pinnan lämpötilaksi asetettaisiin 5 °C ja suoritettaisiin tarkastelu laskentaohjelmalla. Kun lasketaan todellisen ja teoreettisen lämmönjohtumisen eroa, on muistettava käyttää alapohjan teoreettisen lämpövuodon laskennassa korjauskerrointa 0,6.

Tämä yksinkertaistettu laskutapa laskea maahan rajoittuvien rakenteiden kylmäsillat on karkea, mutta käyttökelpoinen tapa laskea maanvastaisten rakenteiden kylmäsiltoja, ja sen tuloksia voi yleistää koskemaan myös muiden rakennusten vastaavia rakenteita, mutta se on ympäristöministeriön kylmäsiltaoppaan (Kylmäsiltaopas, ympäristöministeriö 2012) vastainen.

Pistemäisen kylmäsilan laskeminen

Pistemäisten kylmäsiltojen laskeminen vaatii lämmönsiirron laskentaa 3D-laskentaohjelmassa. Pistemäisiä kylmäsiltoja ei SRakMK:n osan D5 mukaan tarvitse ottaa huomioon energialaskennassa. Pistemäiset kylmäsillat, jotka aiheutuvat kiinnikkeistä, voidaan ottaa huomioon laskennassa usein riittävän tarkasti kiinteillä lisäkonduktanssi-tilukkoarvoilla. Siksi pistemäisiin kylmäsiltoihin ei tämän oppaan kohdalla tarkemmin puututa.

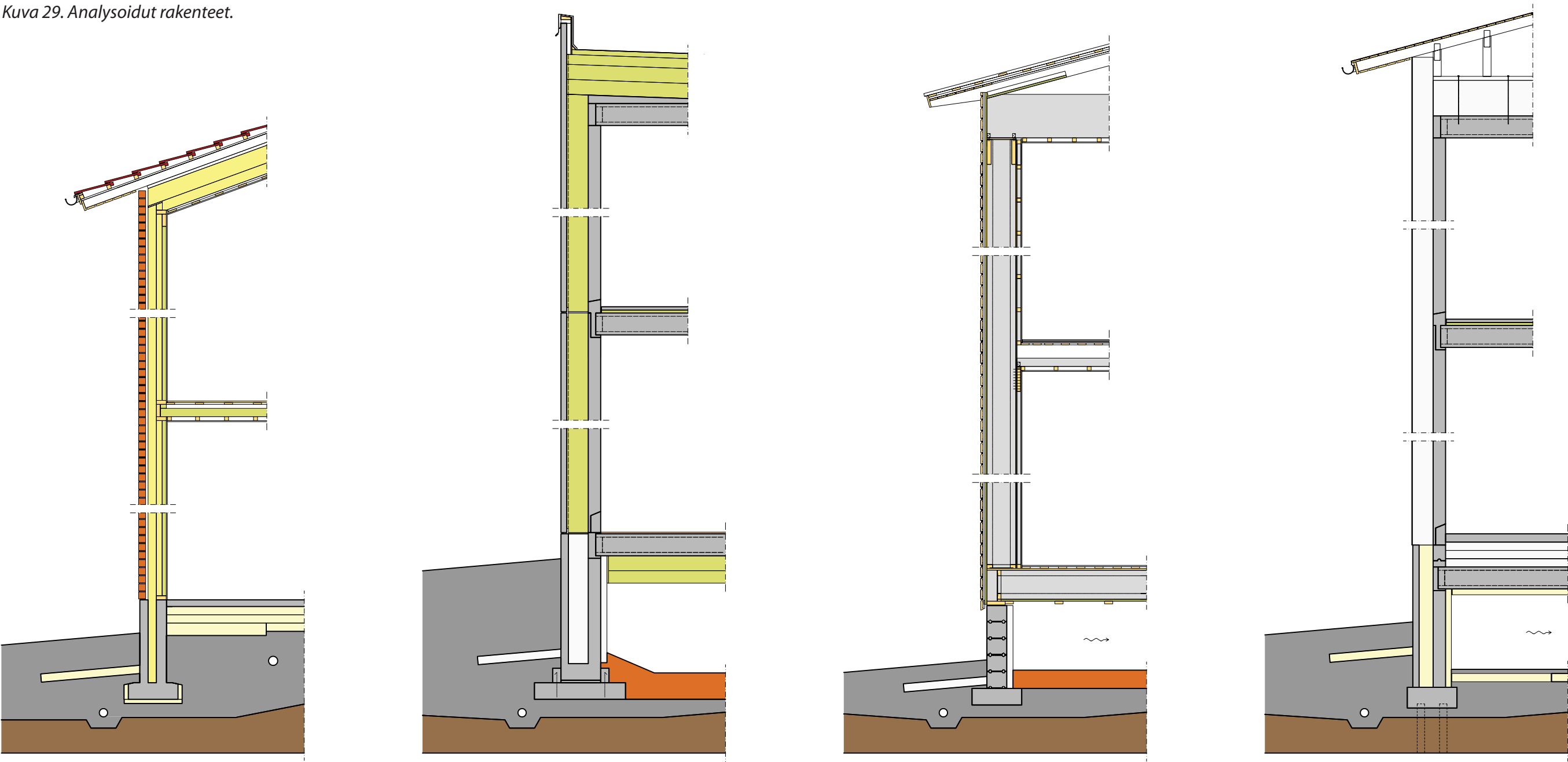
5.3.4 Kylmäsillat tyypillisissä rakenteissa – ongelmat ja ratkaisut

Tässä luvussa perehdytään tyypillisiin kylmäsiltoihin rakennuksissa. Kustakin liitoksesta tutkittavat rakennetyypit on esitetty kuvassa 29. Huom! esitettyjä detaljeja ei ole tässä optimoitu kylmäsiltilaskennan avulla. Analysoidut detaljit on valittu edustamaan tyypillisiä rakennusosien liitoksia eri eriste- ja runkomateriaaleilla. Rakennetyypit vastaavat pääosin liitteessä 1 kuvattuja rakennetyyppejä, joille rakennusfysikaalinen toimivuus on analysoitu liitteissä 2–4 ja kuvattu luvussa 6.

Laskentatulokset on esitetty taulukossa 11. Kutakin tyypillistä liitosta verrataan ohjeen SRakMK D5 taulukkoarvoon (SRakMK D5 2012, taulukko 3.1) ja esitetään myös parannusehdotus, mikäli sellainen on saavutettavissa.

Rakenne 1	US: puurunko ja polyuretaanieriste, muurattu tiiliulkoverhous YP: vesikaton suuntainen puupalkisto ja polyuretaanieriste, betonitiilikate aluskatteella (YP8) AP: maanvarainen tb-laatta, EPS- tai XPS-eriste (AP1/AP2) VP: puupalkisto
Rakenne 2	US: sandwich-elementti ja mineraalivillaeriste (US7) YP: ontelolaatta ja mineraalivillaeriste, hitsattu bitumikermikate AP: ontelolaatta ja mineraalivillaeriste, tuuletettu ryömintätila VP: ontelolaatta
Rakenne 3	US: puurunko ja selluvillaeriste, puu-ulkoverhous (US5) YP: naulalevyristikot ja selluvillaeriste, profilipeltikate aluskatteella (YP2) AP: puupalkisto ja selluvillaeriste, tuuletettu ryömintätila (AP5) VP: puupalkisto
Rakenne 4	US: tb-sisäkuorielementti ja rapattu EPS-eriste (US2b) YP: ontelolaatta ja harmaa EPS-eriste AP: ontelolaatta ja harmaa EPS-eriste, tuuletettu ryömintätila (AP10) VP: ontelolaatta

Kuva 29. Analysoidut rakenteet.



Rakenne 1	Ψ D5	
	laskettu Ψ	taulukko 3.1
US-YP	0,020	0,05
US-VP	0,026	0,05
US-AP	0,083	0,10

Rakenne 2	Ψ D5	
	laskettu Ψ	taulukko 3.1
US-YP	0,079	0,08
US-VP	0,000	0,00
US-AP	0,277	0,28

Rakenne 3	Ψ D5	
	laskettu Ψ	taulukko 3.1
US-YP	0,034	0,05
US-VP	0,005	0,05
US-AP	0,039	0,06

Rakenne 4	Ψ D5	
	laskettu Ψ	taulukko 3.1
US-YP	0,068	0,08
US-VP	0,000	0,00
US-AP	0,128	0,28

Taulukko 11. Kylmäsilta-analyysin tulokset.

Sokkelin ja ulkoseinän liitos

Sokkelin ja ulkoseinän liitos on sekä betoni- että puurunkoisessa rakennuksessa ongelmallinen kylmäsilta, koska rakennusrungon kuormat tulisi välittää perustuksille ilman katkoa ulkovaipan lämmöneristyksessä. Edes halkaistu sokkeli ei ratkaise tätä ongelmaa. Ohjeen SRakMK D5 taulukkoarvo on molemmille runkotyypeille suhteellisen korkea – betonirungossa 0,24 W/mK ja puurungossa 0,10 W/mK. Nämä ovat käytännössä kuitenkin realistisia arvoja, kuten oheiset analyysit osoittavat.

Sokkelin kylmäsilta on kuitenkin minimoitavissa. Halkaistun betonisokkelin sisäkuoressa tarvitaan kylmäsiltakatko alapohjan eristeen kohdalla. Pientaloissa voidaan tutkia kantavan, reunavahvistetun laatan käyttöä perustustapana, jolloin laatta valetaan lämpöeristeen päälle.

Kantavan väliseinän perustus

Kantavan väliseinän perustus on tyypillisesti psi-arvoltaan koko rakennuksen heikoin kohta. Kaikki sellaiset ratkaisut, joissa kantava väliseinä on perustettu maahan rajautuvan anturan päälle, ovat ongelmallisia. Ratkaisuna voidaan käyttää esimerkiksi kantavaa tb-laattaa vahvistettuna, jolloin kantavan väliseinän perustus ei lainkaan lävistä alapohjan lämmöneristekerrosta. Laatan vahvistuksen alle asennetaan riittävän puristuslujuuden omaava lämmöneriste.

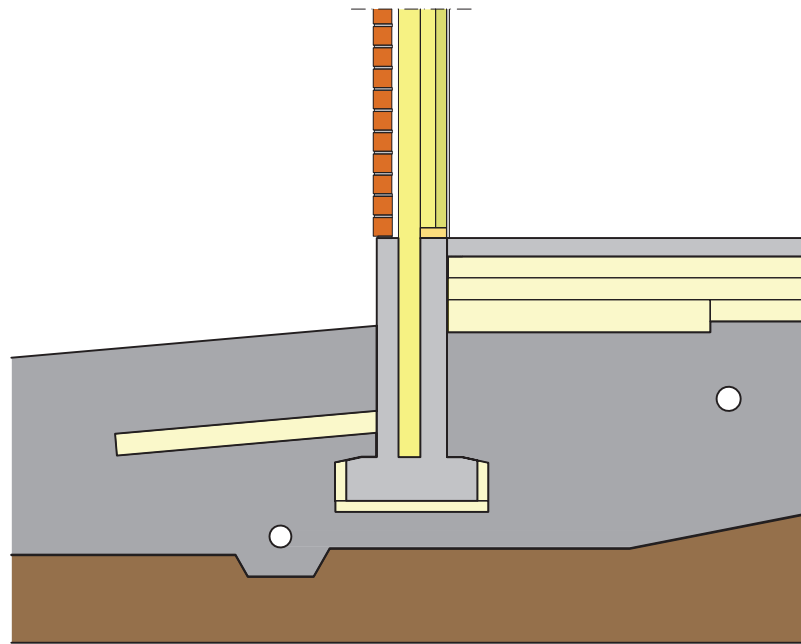
Ohjeen SRakMK D5 mukaan kantavan väliseinän sokkelia ei huomioida lainkaan rakennuksen E-luvun laskennassa.

Ulkoseinän ja välipohjan liitos

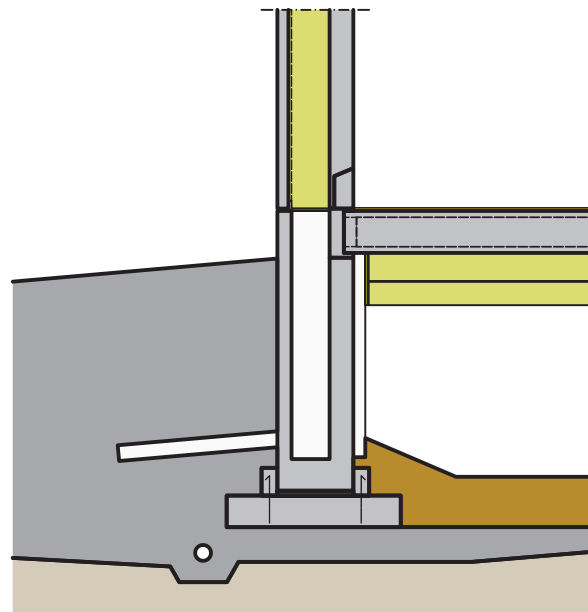
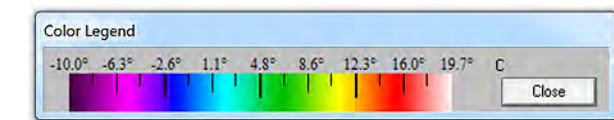
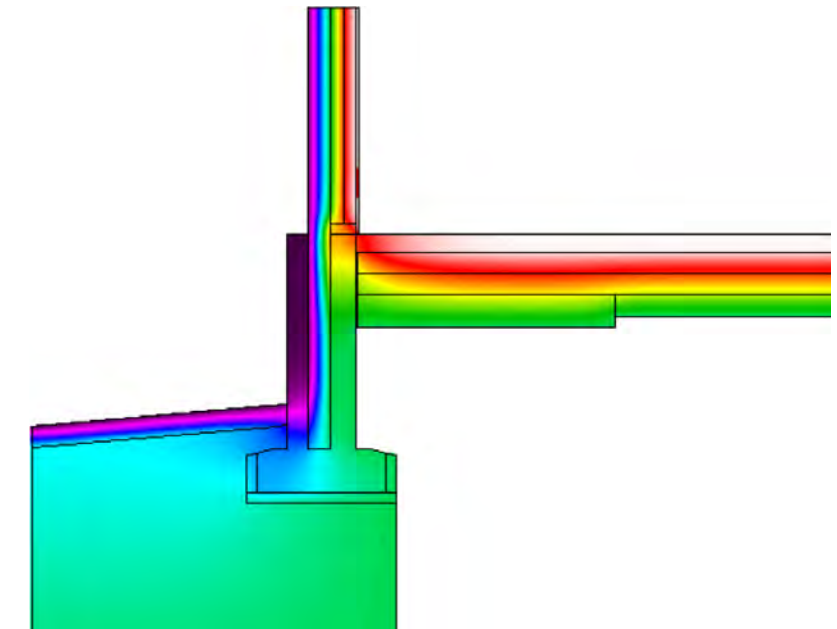
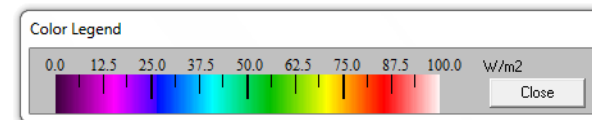
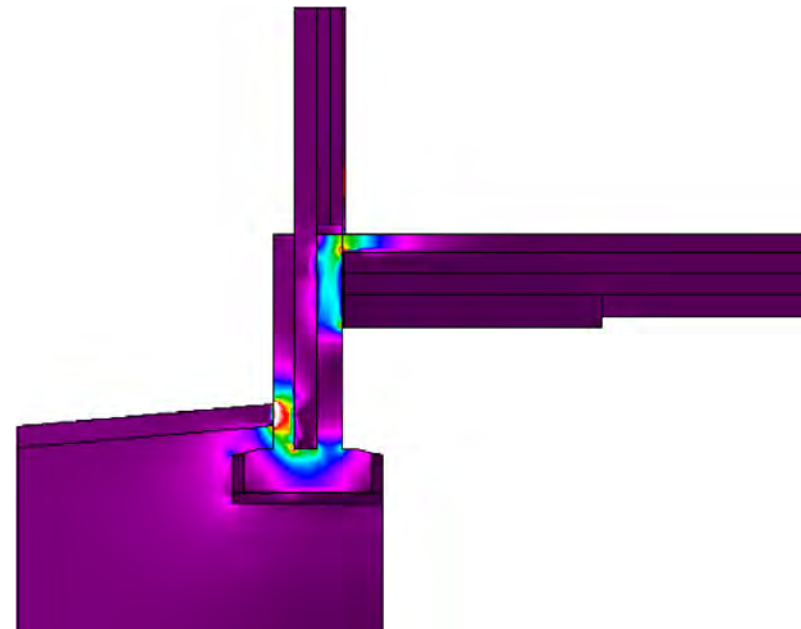
Ulkoseinän ja välipohjan liitoksesta tutkitaan poikkeuksellisesti vain puurunkorakenne, koska välipohja betonirunkoisessa rakennuksessa tyypillisesti aiheuta minkäänlaista kylmäsiltaa. Puurunkorakenteita on kuitenkin tutkittava kaksi – sivu- ja päätydetalji. Ψ_k -arvoiltaan liitokset eivät ole ongelmallisia, mutta höyrynsulun sijaintiin tulee kiinnittää huomiota.

Ulkoseinän ja yläpohjan liitos

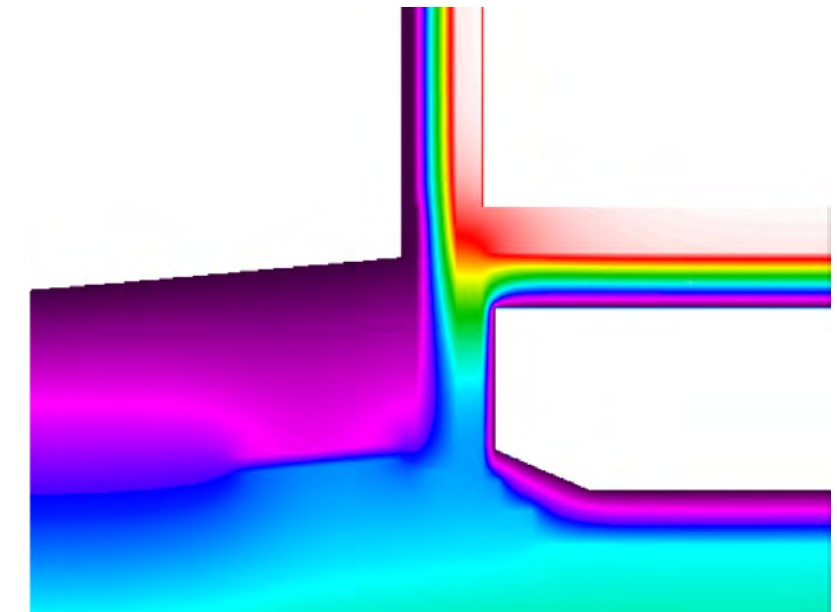
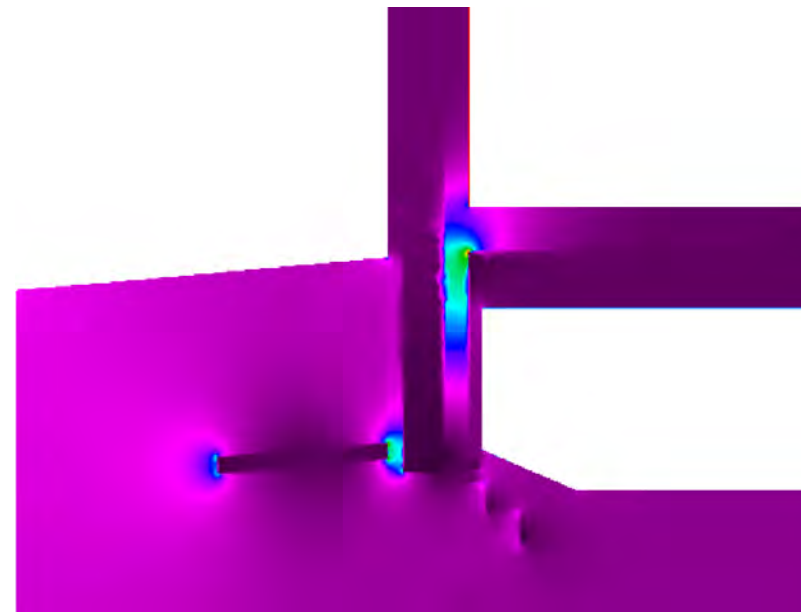
Ulkoseinän ja yläpohjan liitos on molemmilla runkotyypeillä yleensä suhteellisen ongelmaton johtuen yläpohjan eristepaksuudesta.

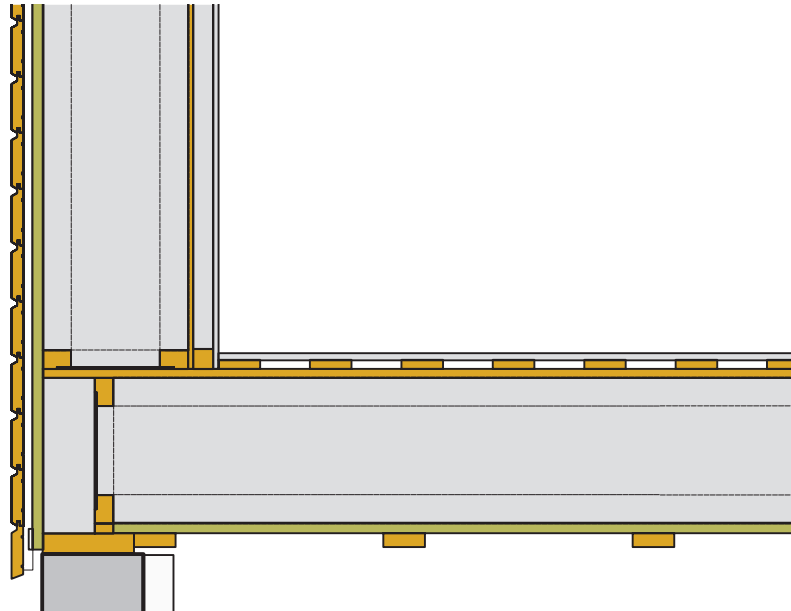


Kuva 30. Ulkoseinän ja alapohjan liittymä, rakenne 1 (puurunko ja polyuretaanieriste–maanvarainen laatta ja XPS- tai EPS-eriste). Lämmön johtuminen (kesk.) ja lämpötilojen jakautuminen (oik.).

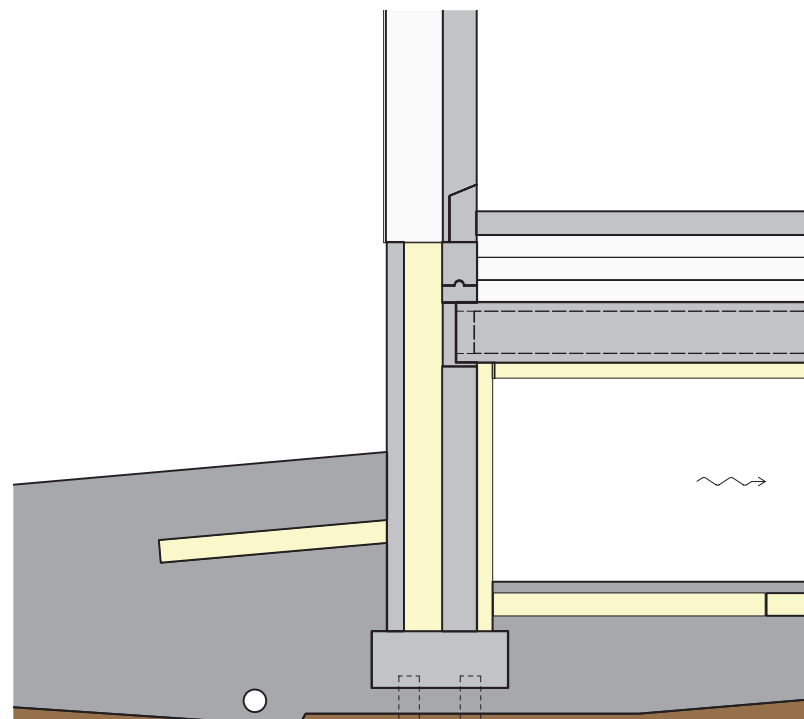
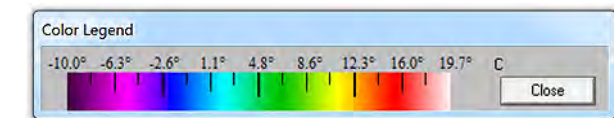
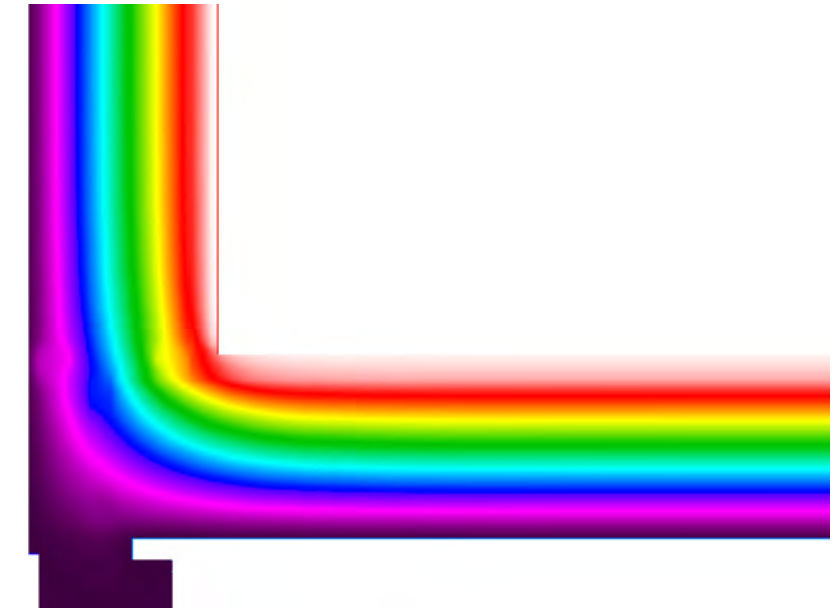
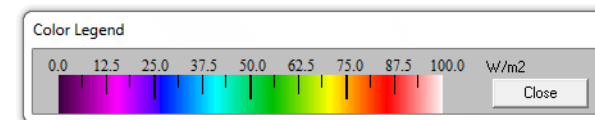


Kuva 31. Ulkoseinän ja alapohjan liittymä, rakenne 2 (sandwichelementti ja mineraalivillaeriste–tuuletettu ontelolaatta-alapohja ja mineraalivillaeriste). Lämmön johtuminen (kesk.) ja lämpötilojen jakautuminen (oik.).

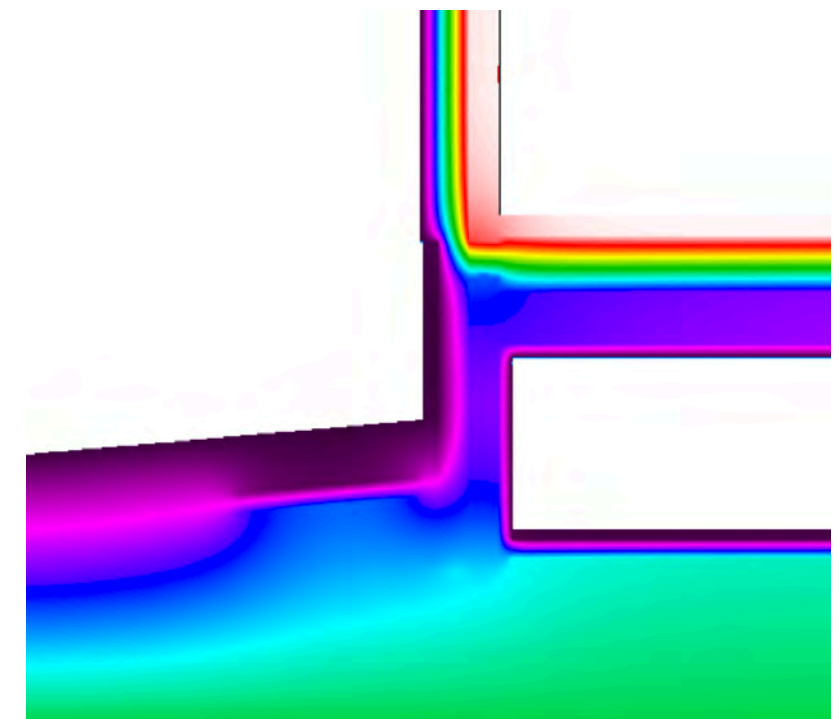
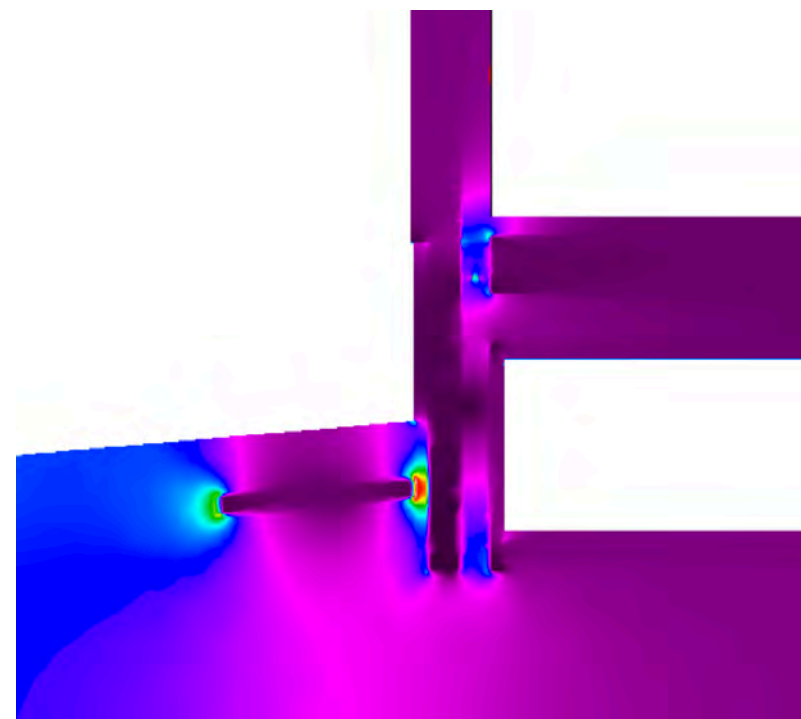


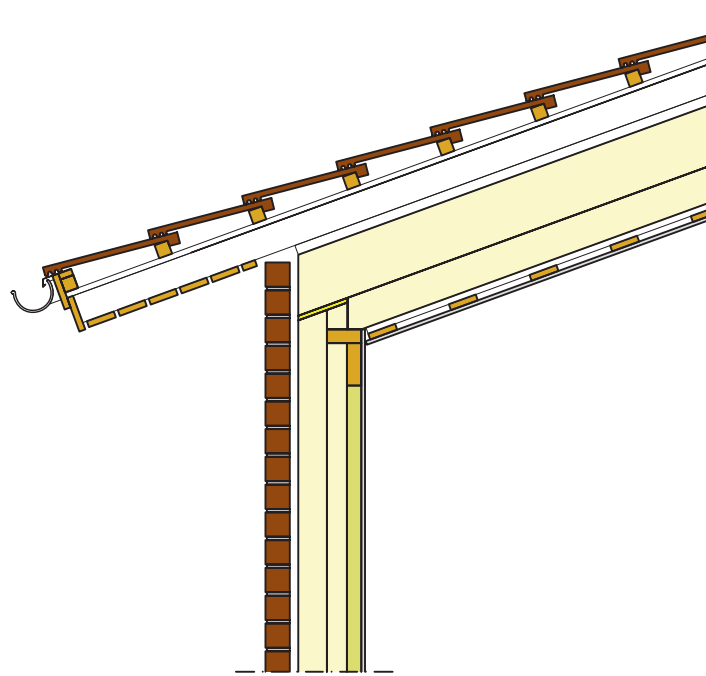


Kuva 32. Ulkoseinän ja alapohjan liittymä, rakenne 3 (puurunko ja puukuitueriste–tuuletettu puurakenteinen alapohja ja puukuitueriste). Lämmön johtuminen (kesk.) ja lämpötilojen jakautuminen (oik.).

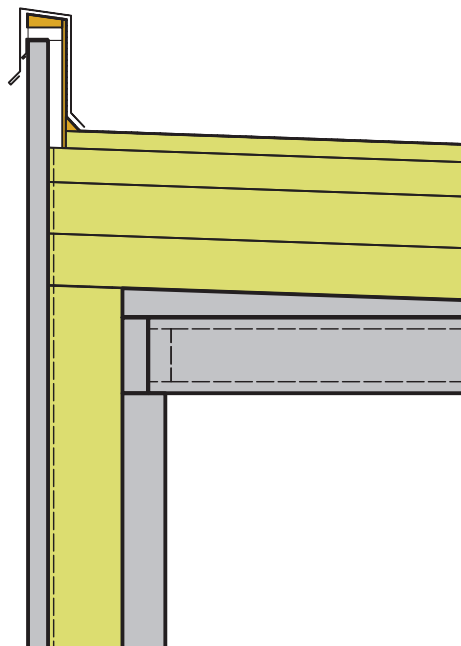
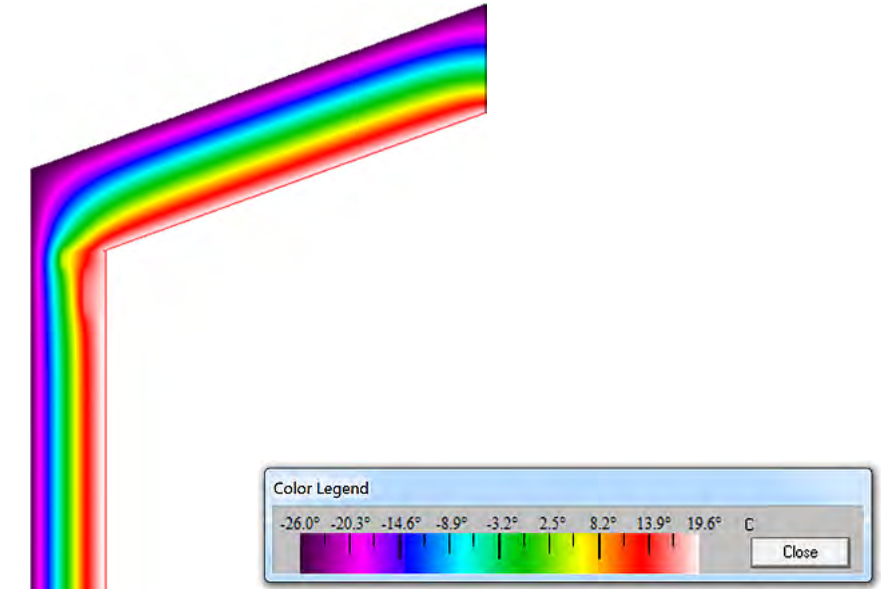
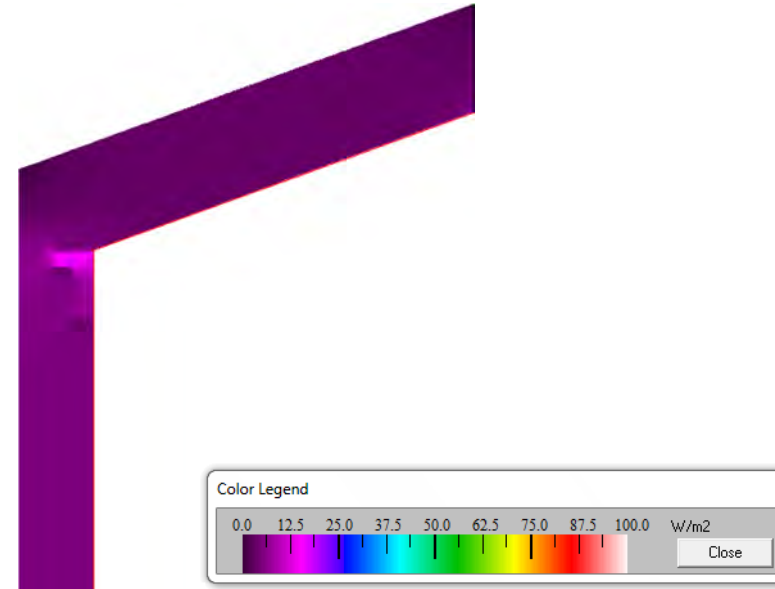


Kuva 33. Ulkoseinän ja alapohjan liittymä, rakenne 4 (tb-sisäkuorielementti ja harmaa EPS-eriste – tuuletettu ontelolaatta-alapohja ja harmaa EPS-eriste). Lämmön johtuminen (kesk.) ja lämpötilojen jakautuminen (oik.).

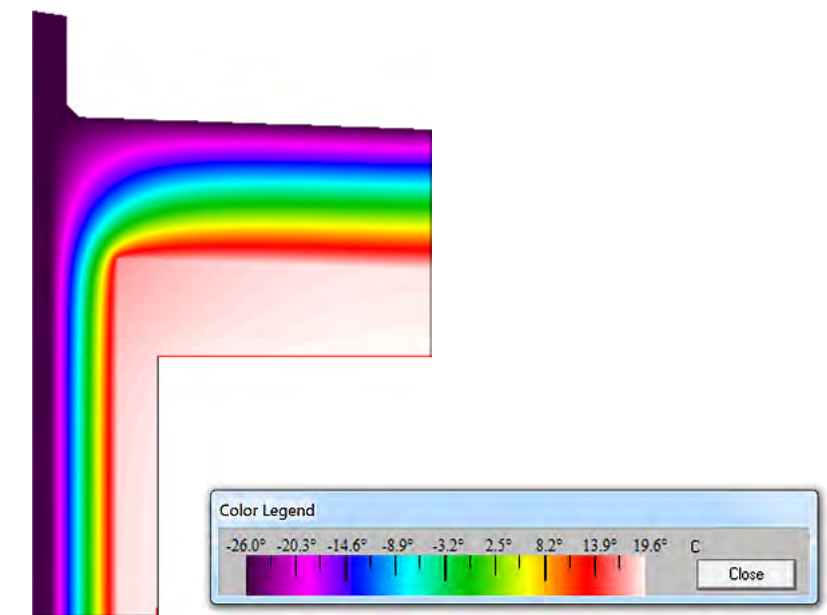
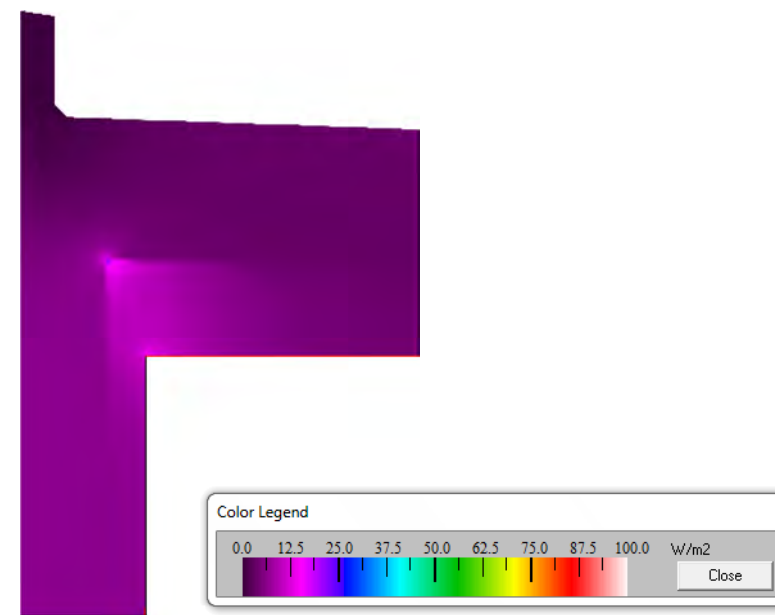


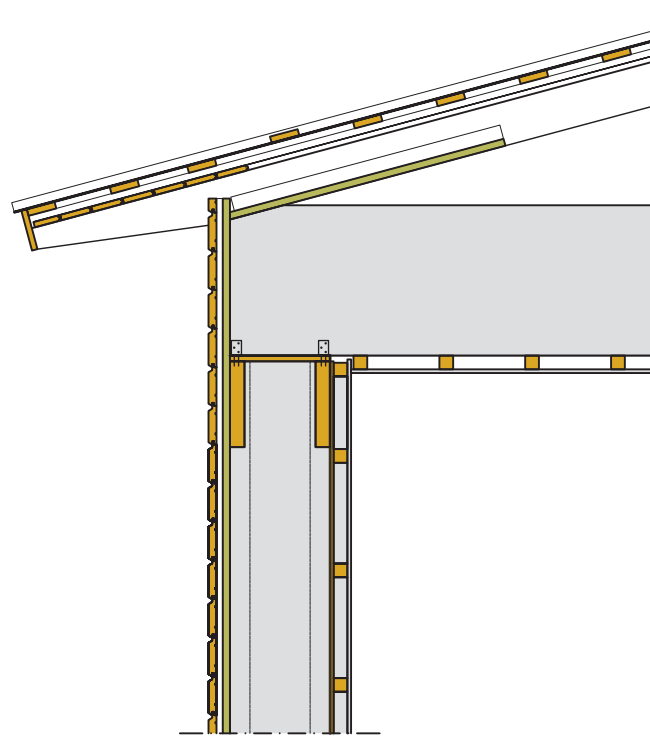


Kuva 34. Yläpohjan ja ulkoseinän liittymä, rakenne 1 (puurunko ja polyuretaanieriste–puurakenteinen yläpohja ja polyuretaanieriste). Lämmön johtuminen (kesk.) ja lämpötilojen jakautuminen (oik.).

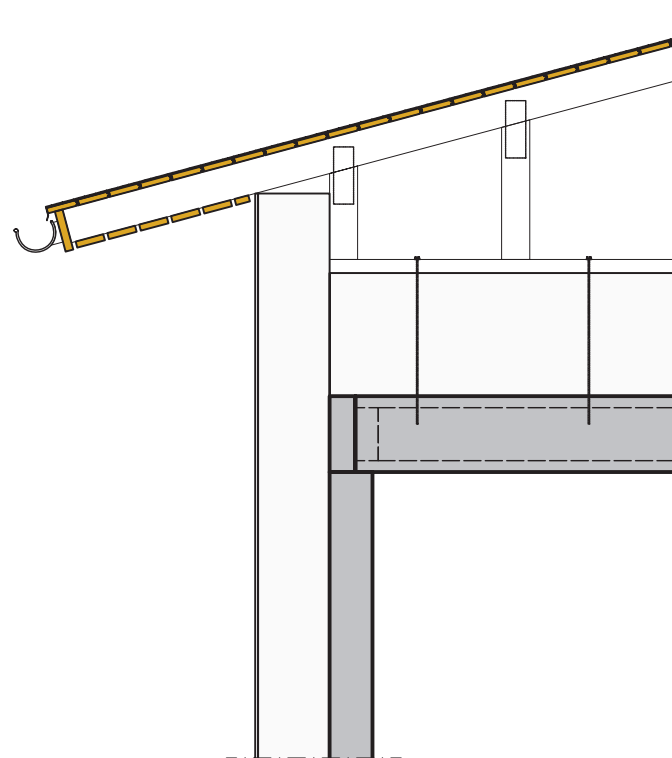
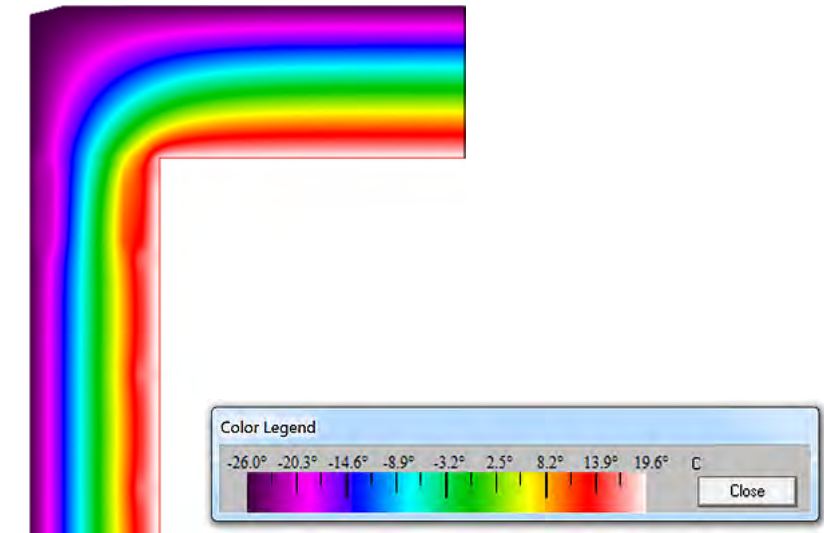
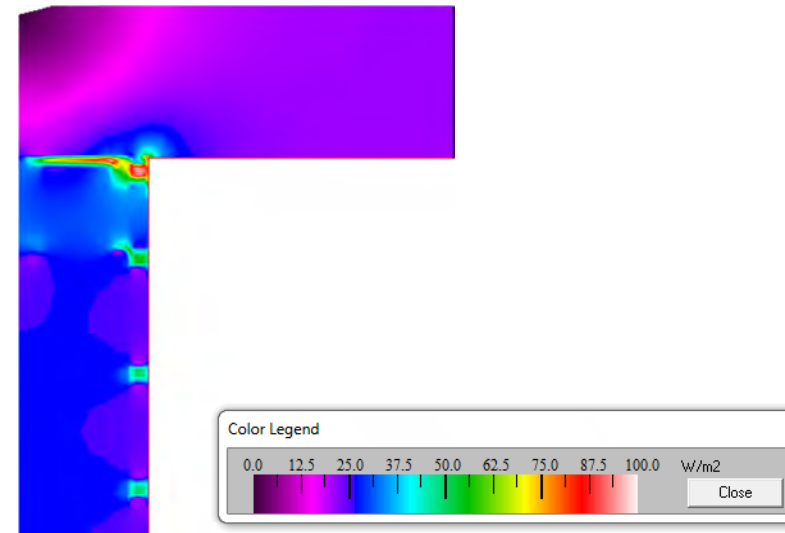


Kuva 35. Yläpohjan ja ulkoseinän liittymä, rakenne 2 (sandwich-elementti ja mineraalivillaeriste–ontelolaattayläpohja ja mineraalivillaeriste). Lämmön johtuminen (kesk.) ja lämpötilojen jakautuminen (oik.).

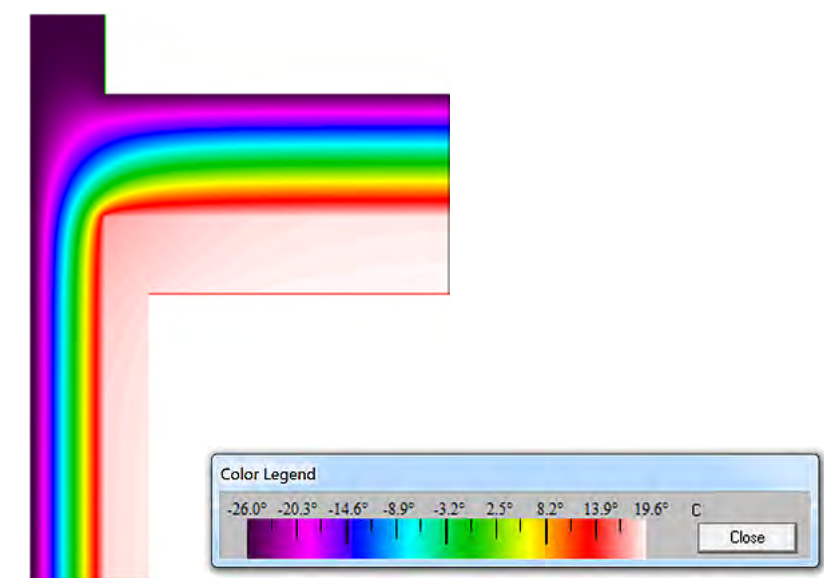
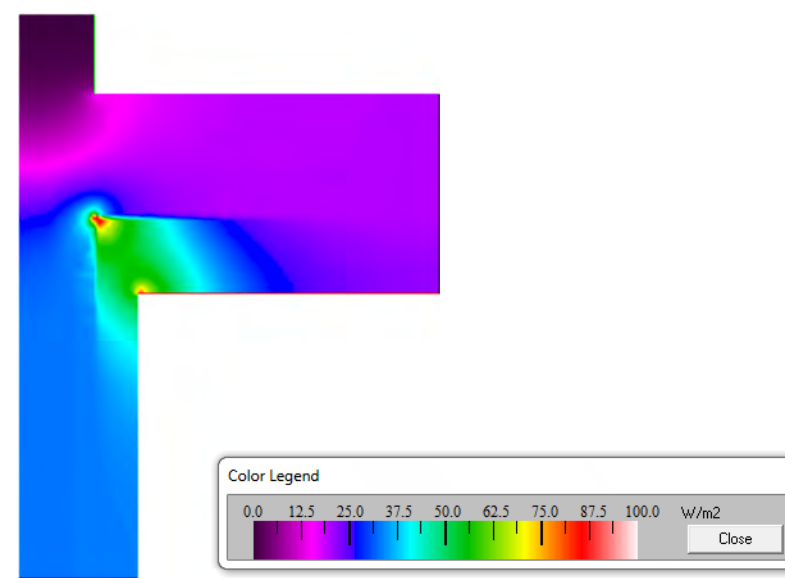




Kuva 36. Yläpohjan ja ulkoseinän liittymä, rakenne 3 (puurunko ja puukuitueriste–tuuletettu ristikkorakenteinen yläpohja ja puukuitueriste). Lämmön johtuminen (kesk.) ja lämpötilojen jakautuminen (oik.).



Kuva 37. Yläpohjan ja ulkoseinän liittymä, rakenne 4 (tb-sisäkuori-elementti ja harmaa EPS-eriste–ontelolaatta ja harmaa EPS-eriste). Lämmön johtuminen (kesk.) ja lämpötilojen jakautuminen (oik.).



Ulkoseinän ulkonurkka

Ulkoseinän ulkonurkka on betonirunkoisessa rakennuksessa tyypillisesti hyvin ongelmaton. Puurunkoisessa rakennuksessa ongelmaksi saattaa muodostua höyrynsulun sijainti, koska eristetyn asennustilan ansiosta lämpötila höyrynsulun pinnalla voi laskea talvipakkasilla jopa pakkasen puolelle. Monilla rakennustyömailla tämä on havaittu myös käytännössä. Helpoin ratkaisu ongelmaan on tuoda höyrynsulku lähemmäksi seinän sisäpintaa tai käyttää levymäistä höyrynsulkua.

Ulkoseinän ja ikkunan liitos

Energiatehokkaan rakentamisen ohjeistuksessa ikkuna neuvotaan yleensä asentamaan seinän eristekerroksen keskilinjaan. Tyypillinen suomalainen kaksipuitteinen ikkuna ei kuitenkaan ole kovin herkkä reagoimaan sijoituskohdalle rungossa, kun taas kiinteä ikkuna on sitä selvästi enemmän. Tarkalleen ottaen eristekerroksen kanssa samaan linjaan tulisi mitoittaa eristyslasi, joka ei yleensä ole karmin keskilinjassa.

Seuraavassa on tarkasteltu 2+2 –lasitetun puu-alumiini-ikkunan sijoittelua eri syvyyksille puurunkoisessa seinässä, jossa on 100+300+50 mm mineraalivillaeristettä.

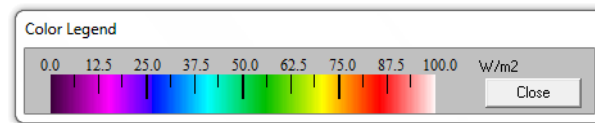
- V1: karmin sisäpinta on samassa linjassa höyrynsulun kanssa
- V2: karmin ulkopinta on samassa linjassa tuulensuojavillan ulkopinnan kanssa
- V3: karmin ulkopinta on samassa linjassa ulkoverhouksen ulkopinnan kanssa
- V4: karmin ulkopinta on samassa linjassa rungon ulkopintaan asennetun levyn kanssa.

Tulokset on esitetty kuvissa 38–39 sekä taulukossa 12.

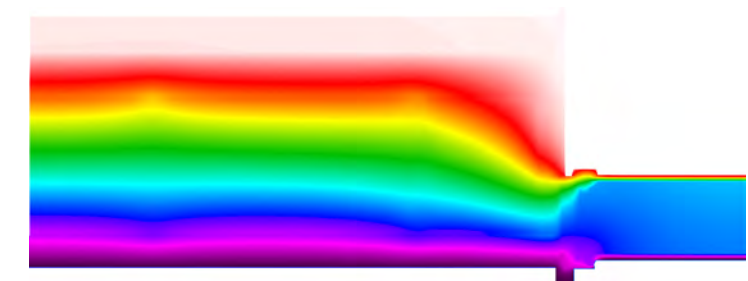
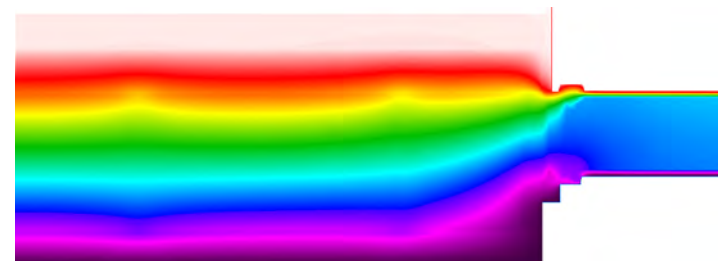
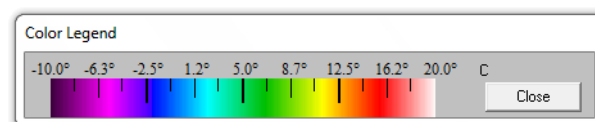
Epäedullisinkin sijoittelu (V3) tuottaa pienemmän laskennallisen Ψ_k -arvon kuin SRakMK D5:n antama taulukkoarvo (0,04). Tarkastelu osoittaa, että kaksipuitteisessä ikkunatyypissä ikkunaliittymän kylmäsilta ei tyypillisesti muodostu kovin suureksi.

Taulukko 12. Ikkunaliittymän Ψ_k -arvo (viivamainen lisäkonduktanssi eli kylmäsilta) W/mK, kun karmi asemoidaan syvyyssuunnassa eri kohtiin puurunkoa.

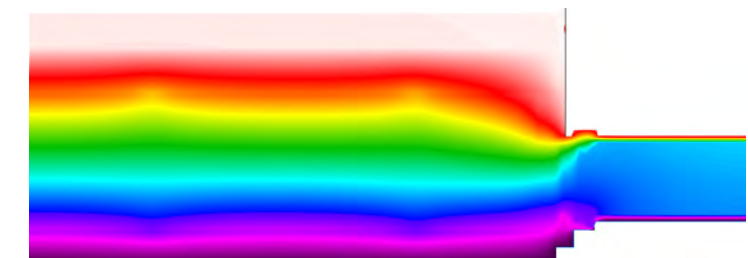
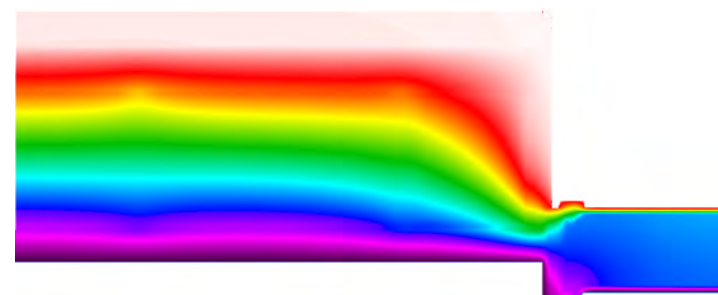
	V1 V	2	V3 V	4
Ψ -arvo	0,015	0,019	0,037	0,009



Kuvat 38. Lämmön johtuminen ikkunaliittymässä, kun kaksipuitteisen ikkunan karmi asennetaan eri syvyyksille puurunkoiseen seinään.



Kuvat 39. Lämpötiöjen jakauminen ikkunaliittymässä, kun kaksipuitteisen ikkunan karmi asennetaan eri syvyyksille puurunkoiseen seinään.



5.3.5 Parhaat käytännöt

Keskieurooppalaisessa passiivirakentamisessa käytetään usein sertifioituja passivitalorakenteita, joiden rakennusfysikaalinen toimivuus ja viivamainen kylmäsilta on valmiiksi analysoitu. Kylmäsiltojen hankekohtainen analysointi on tavallista passiivitalojen suunnittelussa. ”Kylmäsillattomaksi rakenteeksi” kutsutaan detaljia, jossa viivamainen lisäkonduktanssi Ψ_k on $\leq 0,01 \text{ W/mK}^{14}$. Passiivitalojen energialaskentaan tarkoitettussa PHPP-ohjelmassa kylmäsillaton liitos voidaan jättää huomioimatta.

Suomessakin talotehtailla, materiaalivalmistajilla ja rakennusliikkeillä on detaljikirjastoja ratkaisuille, joille on tehty kylmäsilta-analyysi.

SRakMK D5:n antamat taulukkoarvot kannustavat laskemaan viivamaisen lisäkonduktanssin, sillä oikein suunnitellun detaljin laskentatulos on lähes poikkeuksetta taulukkoarvoa parempi. Vaikutus voidaan huomioida sekä E-luvussa että tavoite-energiankulutuksen laskennassa.

Yksinkertaistettujen 2D-kylmäsilta-analyysien tekemisen yleistyminen rakennussuunnittelussa lisäisi ymmärrystä liitosten lämpöteknisestä toimivuudesta ja auttaisi eliminoimaan virheellisiä rakenteita. Viivamaisen lisäkonduktanssin määrittäminen olisi hyödyllistä erityisesti

- ulkoseinän ja alapohjan liitokselle sekä
- ovi- ja ikkunasovitukselle.

¹⁴ Passiivitalojen kohdalla käytetään ulkomittoja, jolloin Ψ_k -arvon 0,01 saavuttaminen on hyviksi todetuilla rakennustavoilla mahdollista. Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaisilla laskentatavoilla mainittu arvo on erittäin haastava tai mahdoton saavuttaa.

5.4 ULKOVAIPAN ILMANPITÄVYYS

5.4.1 Ulkovaipan ilmanpitävyyden merkitys

Rakenteiden yli vaikuttava paine-erot pyrkivät siirtämään ilmaa rakenteen läpi. Paine-erot syntyvät tuulen, ilmanvaihdon ja kylmänä vuodenaikana sisä- ja ulkoilman lämpötilaerosta johtuvan termisen paine-eron vaikutuksesta. Viimeksi mainittu kohdistuu voimakaimmin rakennuksen ylimpään kerrokseen ja erityisesti yläpohjan ja ulkoseinän liitokseen. Termisen paine-eron vaikutuksesta juuri rakennuksen ylimmät osat ovat alttiita sisältä ulos tapahtuville ilmavirtauksille. Ulkovaipan läpi tapahtuvat ilmavirtaukset sisältä ulos kuljettavat mukaan sisäilman kosteutta rakenteeseen. Ulkoa sisälle suuntautuvat ilmavirtaukset voivat kuljettaa ulkoilman tai rakenteissa olevia epäpuhtauksia sisäilmaan, viilentää talvella rakenteiden sisäpintoja, heikentää lämpöviihtyvyyttä sisätiloissa vetona ja viileistä pinnoista aiheutuvana ns. kylmävedon tunteena.

Ilmavuodot lisäävät myös rakennuksen lämpöhäviöitä. Ilmavuotojen vaikutus rakennuksen lämmitystarpeeseen on 15 - 30 % pientalossa, jonka ilmavuotoluku n_{50} on 4 1/h (Ahio & Korpi 2009). Ilmavuotoluvun parannus arvosta $q_{50}=4,0 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ arvoon $q_{50}=0,5 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ merkitsee tyypillisessä omakotitalossa n. 320 €:n vuosittaista säästöä (Jussila 2015).

Ilmanvaihdon lämmön talteenoton tehokkuus heikkenee ilmavuotojen johdosta. Tyypillisiä Ilmavuotokohtia ovat rakennusosien liitospaikat, elementtisaumat, ikkunoiden ja ovien liitokset sekä talotekniikka-asennukset ja savuhormien läpiviennit.

Rakennuksen ulkovaipan ilmanpitävyys on energiatalouden kannalta tärkeä suunnittelukohde, sillä sen merkitys on suuri ilmanvaihdon oikean toiminnan kannalta. Tiivis ulkovaippa edellyttää koneellisen ilmanvaihdon säädöltä tarkkuutta, mutta samalla pienemmät vuotoilmavirrat helpottavat oikeiden säätöasetusten löytämistä. Jotta haluttu ilmanvaihtotapa toimisi mahdollisimman energiataloudellisesti, on ilmanvaihto myös suunniteltava painovoimaisen ilmanvaihdon rakennuksissa.

Rakennuksen ulkovaipan ilmanpitävyyden on kuitenkin sanottu heikentävän sisäilman laatua. ”Pullotalo” syntyy, kun tiiviin talon ilmanvaihto ei toimi. Käytännössä ”pullotalo” on ulkovaipaltaan tiivis rakennus, jonka painovoimaista ilmanvaihtoa ei ole suunniteltu kunnollisesti. Sisäilman laatu heikkenee, kun ilmanvaihto toimii puutteellisesti. Painovoimaisella ilmanvaihdolla toimivassa ”pullotalossa” raitista ilmaa saadaan tuulettamalla ikkunoiden kautta. Painovoimainenkin ilmanvaihto voidaan suunnitella toimivaksi, mutta ilmanvaihdon lämpöhäviö tulee korvata muilla energiatehokkuusratkaisuilla kuten juuri ulkovaipan paremmalla lämmöneristyksellä.

Rakennuksen ulkovaipan ilmanpitävyys perustuu kunnolliseen ja ehyeen ilmansulkuun. Tuulensululla estetään kylmien ilmavirtausten pääsy eristyskerrokseen. Rakennuksen rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden ja sisäilmaston vedottomuuden varmistamiseksi ulkovaipan ilmanpitävyydelle voidaan asettaa tavoitearvoksi $1 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$. Tavoitearvo on pienempi kuin SRakMK D3:n mukaisen energiaselvityksen tasauslaskennan vertailutalolle asetettu arvo $2 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$. Tavoitearvo ja sitäkin parempi ilmanpitävyys ovat kuitenkin perusteltuja rakennuksen pitkäaikaisen toimivuuden varmistamiseksi. Kokemukset toteutetuista kohteista ovat osoittaneet, että hyvä ilmanpitävyyden arvo voidaan saavuttaa huolellisella suunnittelulla ja toteutuksella. Esimerkkejä rakennuksista, joissa tavoitearvo alitetaan selvästi, on taulukossa 9.

Rakennuksen ulkovaipan ilmanpitävyyden mittaaminen on yksinkertainen keino varmistua ulkovaipan lämpöteknisestä laadusta. Samalla mitattu ilmavuotoluku on myös kosteusteknisen toimivuuden indikaattori.

5.4.2 Ilmavuotoluvun mittaaminen

Rakennuksen ilmanpitävyys varmistetaan mittauksella. Mittaus perustuu standardiin *SFS-EN 13829 - Rakennusten lämpötekniset ominaisuudet. Ilmanpitävyyden määrittäminen. Paineekoe*. Ohjeita mittauksen tekemiseen on mm. *RT 80-10974 Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje*. Mittauksiin käytetään Suomessa EN-standardin B-menetelmää, joka soveltuu tarkoitukseen, kun tarkistetaan rakennuksen vaipparakenne.

Rakennuksen ilmavuotoluvun määrittäminen tapahtuu ali- ja ylipaineistamalla rakennus. Paine-eromenetelmässä tutkittavaan tilaan aiheutetaan 50 Pa:n paine ulkoilmaan nähden. Paine-ero saadaan aikaan puhaltimella. Puhallin asennetaan ulko-oven tai ikkunan tuuletusluukun paikalle. Vuotokäyrä ajetaan 5-10 Pa:n välein 0-55 Pa välillä. Paine-eron ylläpitämiseksi tarvittava ilmamäärä mitataan. B-menetelmässä yleiset ulkovaipan tiivistykset ovat: ilmanvaihtokanavat, tulisija, liesituuletin, viemärit. SFS-EN 13829:n mukaan luonnollinen paine-ero ennen mittausta ja sen jälkeen ei saa ylittää ± 5 Pa. Tuulen nopeuden tulee olla alle 6 m/s. Sisä- ja ulkolämpötilojen erotus kerrottuna rakennuksen korkeudella ei saa ylittää arvoa 500, koska savupiippuilmillä olisi liian suuri vaikutus mittaustuloksiin.

Ilmavuotoluvun mittausta voidaan tukea lämpökuvauksella, joka auttaa löytämään mahdolliset lämmöneristyksen asennusvirheet, ilmansulun vuodot ja suuret pintalämpötilojen poikkeamat. Kun lämpökuvaus tehdään ilmavuotomittauksen yhteydessä ennen rakennuksen alipaineistusta ja sen jälkeen, voidaan arvioida kohdat ja reitit, joista ilmavirtaus sisätiloihin tapahtuu. Lämpökuvaus edellyttää vähintään 15 °C:n lämpötilaeroa sisä- ja ulkoilman välillä.

Suotuisissa olosuhteissa lämpökuvaus voi myös auttaa rakenteen kosteiden alueiden löytämisessä, mutta se ei korvaa kosteusmittausta kosteustason ja sen laajuuden arvioinnissa. Lämpökuvaus voi osoittaa esimerkiksi vesikiertoisen lattialämmityksen vuotokohtia.

Lämpökuvaus liitetään usein rakenteen pintalämpötilan tason arviointiin (Paloniitty). Lämpötilaindeksillä arvioidaan rakennuksen vaipan lämpötekniistä toimivuutta silloin, kun lämpötilojen mittauksia ei voida tehdä vakio-olosuhteissa ($-5\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$:n ulkolämpötilassa ja $+20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ sisälämpötilassa). Lämpötilaindeksi on suuntaa antava menettely ulkovaipan lämpötekniikan kunnon arvioinnissa, mutta sitä ei voida pitää rakenteen toimivuuden ainoana mittarina.

Lämpötilaindeksi määritellään kaavalla

$$TI = (T_{sp} - T_o) / (T_i - T_o) \times 100 \text{ [\%]}$$

jossa	TI	= lämpötilaindeksi, %
	T _{sp}	= sisäpinnan lämpötila, °C (mitattu esim. lämpökameralla)
	T _i	= sisäilman lämpötila, °C
	T _o	= ulkoilman lämpötila, °C

Lämpökuvaajille voidaan myöntää VTT:n sertifikaatti, joka osoittaa kuvaajan pätevyyden. Ohjeita lämpökuvauksen tekemiseen on esimerkiksi RT-kortissa *RT 14-10850 Rakennuksen lämpökuvaus. Rakenteiden lämpötekniikan toimivuus*.

Rakentamismääräysten mukaan ilmavuotoluku n_{50} saa olla enintään 4. Kun rakennuslupahakemukseen liitettävissä laskelmissa käytetään pienempää arvoa, ilmavuotoluku on mitattava tai osoitettava muulla menettelyllä. Tasaustalaskelmassa vertailuarvo on 2. Ohjeellisenä suosituksena on käytetty arvoa $n_{50} \leq 1$ 1/h.

Ilmavuotoluvulle on Suomessa käytetty yksikköä q_{50} 1.7.2012 alkaen. Ulkovaipan ilmavuotoluku q_{50} ($\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$) on vaipan läpi 50 Pascalin paine-erolla yhden tunnin aikan virtaava ilmamäärä suhteutettuna rakennuksen vaipan pinta-alaan. Aiemmin käytössä ollut n_{50} -luku ilmoitti ilmavuodon sisätilavuutta kohden. Yksikerroksisissa pientaloissa q_{50} -luku voi olla lähes sama kuin vanha n_{50} -luku. Kerrostaloissa arvo voi olla jopa 1,5–2,0 kertaa suurempi.

5.4.3 Parhaat käytännöt

Ilmavuotoluvulle annetaan jo rakentamista koskeissa määräyksissä tunnuslukuja, joiden täyttämässä ei pitäisi olla ongelmia. Kuvas-
sa 40 on esitetään tiiveysmittausluokitus, jota käyttävät sertifioidut ilmatiiveysmittaajat. Asteikko kuvaa hyvin q_{50} -ilmavuotolukujen
tyypillisiä arvoja. Kun rakennuslupavaiheen energiaselvityksessä ilmavuotoluvun vertailuarvo on $2 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$, on toteutetuista koh-
teista mitattu selvästi alle $1 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ ilmavuotolukuja. Passiivitaloista on mitattu ilmavuotoluvun arvoja $0,3\text{--}0,8 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$, ja Mänty-
harjulle rakennetusta mallitalosta jopa $0,1 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$. Hyvän ilmanpitävyyden saavuttaminen on mahdollista aivan tavanomaisessakin
rakentamisessa ilman erityisiä toimenpiteitä, kunhan laatuvarmistus ohjaa rakentamista.

Esimerkiksi Vertia Oy:n vuonna 2014 mitaamista pientaloista alle yhden q_{50} -arvoon pääsi n. 39 % pientalokohteista, ja 94 %:ssa arvo
oli alle $3 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$. Kerrostaloissa ilmavuotolukuun $q_{50} \leq 0,5 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ pääsi n. 28 % vuonna 2014 mitatuista kohteista. 83 % kohteista
alitti arvon $1,2 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ (Jussila 2015).

Oulun rakennusvalvonta ohjaa rakentamista ilmanpitävyyteen tiiveyskortilla ja tilastoimalla mittaustuloksia systemaattisesti. Tulos-
ten tilastointiin ja vertailuarvoja parempien tiiveyslukujen käyttämiseen rakennuslupaa haettaessa on luotu omat, toimivat käytän-
nöt. Vuonna 2014 kahdeksan talotoimittajaa ja rakennusliikettä mittasi kaikki Oulun alueella valmistuneet talot. Ilmavuotoluvun q_{50}
arvot vaihtelivat välillä $0,6\text{--}2,0 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$. Neljä parasta yritystä sai kaikissa mittaustuloksissaan ilmanvuotoluvuksi alle $1,0 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$.

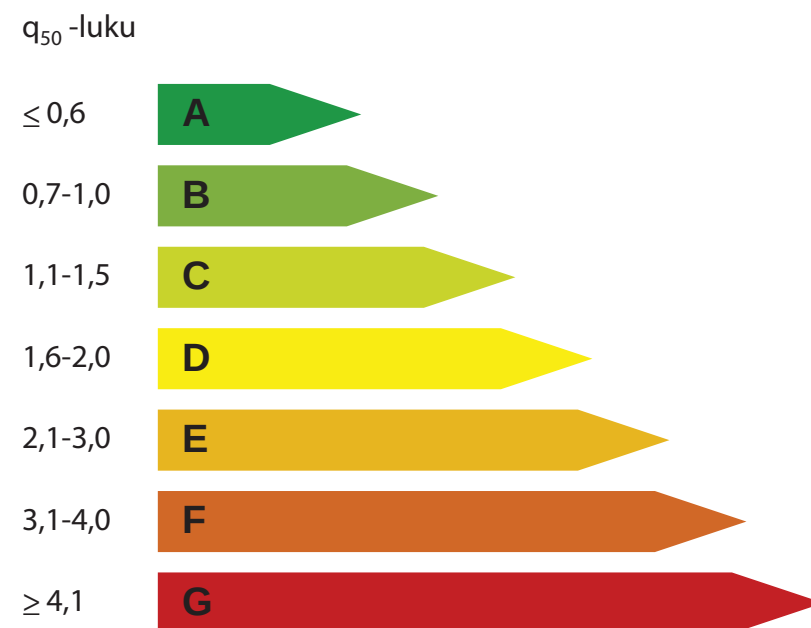
Oulun rakennusvalvonnan tiiveystilastossa (kuva 41) kolmeen taulukkoon on ryhmitelty eri kriteerein pientalojen rakennusten ulko-
vaiapan ilmavuotolukuja. Yrityksen ovat teettäneet mittaukset ja vastaavat tulosten oikeellisuudesta. mittaukset on tehty ja tulokset
käsitelty RT 80-10974 ohjeen mukaisesti. Mittaajat antavat kirjallisen lausunnon, jossa on laskettu tilastollinen ilmanvuotoluku ja va-
kuutettu, että yrityksen kaikki mittaustulokset ovat mukana käsittelyssä.

Osapuolten toivomuksesta ja uskottavuuden varmistamiseksi mittausprosessia valvotaan pistokokeilla, joissa tarkistetaan laitteiden
kalibrointitodistukset ja mittaajien pätevyydet sekä todetaan kohteen mittauskelpoisuus. Laadunvarmennuksena rakennustarkastaja
voi edellyttää välittömästi tehdyn mittauksen jälkeen ulkopuolista uusintamittausta 1–3 kertaa vuodessa talotoimittajan kohteisiin.
Laadunvarmennusmittauksen kustannuksesta vastaa yritys.

Kaikista mittauksista ilmoitetaan etukäteen (viim. viikkoa ennen) rakennusvalvontaan, jotta mittauksia voidaan tarvittaessa tulla seu-
raamaan. Ryhmärakennus- ja rivitalotoimittajat, jotka määrittävät ilmanpitävyyden tilastollisest, pyytävät etukäteen (vähintään viik-
koa ennen mittausta) rakennusvalvontaa määrittämään mitattavat asunnot.

Tilastoon otetaan mukaan päivitystilanteesta taaksepäin vuoden tulokset. Jos kohteita on alle 12, tulee täydentää mittaussarjaa edel-
lisillä tuloksilla siten, että tilastokäsittelyssä on vähintään 12 asuntoa. ilmanpitävyyden mittauskuva on esitetty Oulun rakennusval-
vonnan tiiveyskortissa ja henkilösertifiointikoulutuksessa.

Ulkovaipan ilmanpitävyys on syytä suunnitella perustuvaksi sellaisiin liitoksiin ja saumauksiin, jotka säilyttävät ilmanpitävyytensä pit-
källäkin aikavälillä. Esimerkiksi *Passivhaus Institut* ohjeistaa käyttämään ensisijaisesti mekaanisia tiivistyksiä varmistettuna tarkoituk-
seen tarkoitettulla teipillä.



Kuva 40. Tiiveysmittausluokitus

TAULUKKO 1. Talotoimittajat, jotka mittauttavat kaikki vuonna 2014 valmistuneet talot. Mittausraportti tarkistetaan käyttöönottokatselmuksessa ja mitattua ilmanvuotolukua käytetään kohteen energiaselvityksen päivityksessä.

Yritys	Talon rakennetyyppi	Mittauksia v. 2014, kpl	q _{50 ilm} [hajonta]
Rakennusliike A. Vänntilä Oy, muuttovalmis	Pientalo, puu	alle 50	0,6 [0,2...0,7]
Puroila Oy	Pientalo, puu	alle 50	0,6 [0,3...0,9]
Rakennuspalvelu Kokko, muuttovalmis	Pientalo, puu	alle 50	0,7 [0,3...0,7]
JT-TALO	Pientalo, puu	alle 50	0,7 [0,3...0,9]
Kastelli-talot Oy, muuttovalmis	Pientalo, puu	yli 100	0,8 [0,2...1,5]
Jopera	Pientalo, puu	alle 50	0,8 [0,3...1,5]
Siklatalot, muuttovalmis	Pientalo, puu	alle 50	
Pohjolan Design-Talo Oy	Pientalo, puu	yli 100	1,0 [0,3...1,5]
Dekotalo	Pientalo, puu	50...100	
Kontiotuote	Pientalo, hirsi	Yli 100	1,6 [0,3...2,0]

TAULUKKO 2. Talotoimittajat, jotka mittauttavat vähintään 12 taloa ja määrittävät ilmanpitävyyden tilastollisesti RT 80-10974 ohjeen mukaisesti. Energiaselvityksessä käytettävä ilmanvuotoluku määritetään tiiveyskortissa.

Yritys	Talon rakennetyyppi	Mittauksia v. 2014, kpl	q _{50 ilm} [hajonta]
Lammi-Kivitalot Oy	Pientalo, betoni	alle 50	
Finnlamelli Oy	Pientalo, hirsi	alle 50	1,3 [0,7...1,4]
Omatalo Oy	Pientalo, puu	50...100	2,2 [1,2...3,2]

Suositus on mitata kaikki valmistuvat kohteet. Tiiveyskortin mukaan rakennuksessa ilman mittausta saa käyttää ilmanpitävyytenä 1,5 [m³/(hm²)], jos yllä olevissa taulukoissa q_{50ilm} on pienempi kuin 1,5.

TAULUKKO 3. Ryhmärakennus- ja rivitalotoimittajat, jotka määrittivät ilmanpitävyyden tilastollisesti. Rakennusvalvonta määrittää mitattavat asunnot ennen mittausta. Mitataan 20 % asunnoista, kuitenkin vähintään 6 asuntoa.

Yritys	Talon rakennetyyppi	Mittauksia v. 2014, kpl	q _{50 ilm} [hajonta]
OKV-Tekniikka Oy	Rivitalo, puu-betoni	alle 50	0,3 [0,2...0,5]
Nastarakennus Oy	Rivitalo, puu-betoni	alle 50	0,8 [0,6...0,9]
Sonell Oy	Pien-/pari-/rivitalo, puu	alle 50	0,8 [0,3...1,0]
Oulun Rakennusteho Oy	Pien-/paritalo	alle 50	0,8 [0,3...1,1]

Taulukon 3 yritykset voivat käyttää energiaselvityksessä ilmanpitävyytenä 1,5 · q_{50ilm}-arvoa mittaamatta kohdetta **(niin kauan kun rakennusjärjestelmä säilyy samana)**, kuitenkin korkeintaan vuoden 2016 loppuun, jonka jälkeen mittaussarja tulee päivittää ja laskea uusi q_{50ilm}. Pistokokeet tänä aikana ovat kuitenkin mahdollisia.

Kuva 41. Oulun kaupungin rakennusvalvonta seuraa ja tilastoi rakennusliikkeiden ja talotoimittajien ilmavuotolukumittauksia. Tilasto perustuu vuonna 2014 valmistuneiden kohteiden mittauksiin (Oulun rakennusvalvonta. www.ouka.fi/rakennusvalvonta).

Kerrostalojen tiiveysmittauksen haasteena on erottaa huoneistojen väliset ilmapuodot ulkovaipan ilmapuodoista. TTY:n tutkimuksessa (Heljo, Kurvinen & Korhonen 2008) tarkasteltiin sisäisten ilmapuotojen osuutta 1970-luvulla rakennetussa asuinkerrostalossa ns. vastapainekokeella. Vastapainekokeen suorittamisperiaatteena oli, että ensin mitattiin huoneiston normaali ilmapuotoluku standardin EN 13829 menetelmän B ohjeiden mukaisesti. Tämän jälkeen suoritettiin toinen mittaus, jota ennen mitattavaa huoneistoa ympäröiviin huoneistoihin aiheutettiin toisella mittauslaitteistolla yhtä suuri vastapaine, jolla saatiin eliminoidua sisäisen puodon osuus kokonaisilmapuodosta. Jälkimmäisellä mittauksella saatiin selvitettyä ulkovaipan puodon osuus kokonaisilmapuodosta. Laskemalla edelleen näiden kahden mittauksen tulosten erotus saatiin selville huoneiston sisäisen puodon määrä. Vastapainekokeella selvitettyjen sisäisten ilmapuotojen osuus kokonaisilmapuodoista näyttäisi vaihtelevan, mutta olevan keskimäärin noin 30–40 %. (Heljo, Kurvinen & Korhonen 2008).

Ilmapuotoluvun mittaus suositellaan tehtäväksi kahdessa vaiheessa. Ensimmäinen mittaus on syytä tehdä heti ilmatiiviin kerroksen valmistuttua, jolloin mahdolliset puotokohdat ovat helposti paikallistettavissa ja korjattavissa. Ilmapuotoluku kannattaa mitata vielä toisen kerran rakennuksen valmistuttua, jolloin voidaan varmistua siitä, että viimeistelyvaiheen asennukset eivät ole aiheuttaneet ilmapuotoja. Ilmanpitävyystavoitteen toteutumiseen voidaan vaikuttaa erityisesti liitosten, liittymien ja läpivientien detaljisuunnittelulla sekä työn huolellisella toteutuksella. Rakennuksen huoltokirjassa on syytä mainita, ettei ilmanpitävyyttä saa myöhempien korjausten, asennusten tai muutosten yhteydessä heikentää.

5.5 VARAAVA MASSA

Massa vaikuttaa lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutukseen sekä kevät- ja kesäajan sisälämpötiloihin. Massan vaikutus riippuu monista tekijöistä, mm. rakennuksen tyypistä ja muodosta, ikkunoiden koosta ja suuntauksesta, sisälämpötilojen asetusarvoista, paikallisesta säästä ja ympäristön varjostuksesta. Siksi sen vaikutusta ei pysty ilmoittamaan yleispätevästi. Massan vaikutus tilojen jäähdytystarpeeseen on kuitenkin selvästi suurempi kuin lämmitystarpeeseen (Kalema et al. 2006, 78).

Nordic Thermal Mass –tutkimushankkeen (Kalema et al. 2006) tulosten mukaan massan vaikutus lämmitysenergiankulutukseen on 3 %–14 % ääritapausten välillä, ikkunapinta-alasta riippuen. TKT Miimu Airaksinen ja TKL Mika Vuolle tarkastelivat tutkimuksessaan energiankulutusta ja massan vaikutusta huipputehoon IDA-ICE-simulointityökalulla. Simulointitulosten mukaan massan vaikutus on pienentalossa vähäinen jo vuoden 2012 rakentamismääräysten vertailuarvojen mukaisella energiatehokkuustasolla, ja sen merkitys erittäin energiatehokkaassa rakennuksessa muodostuu yhä pienemmäksi. (Airaksinen & Vuolle 2013, 240). Toisaalta lämpöä varaava massa tukee esimerkiksi aurinkoenergian passiivista hyödyntämistä.

Massan vaikutusta tulisi kuitenkin arvioida aina tapauskohtaisesti rakennuksen suunnitteluvaiheessa, ja sen positiivisia vaikutuksia hyödyntää mahdollisuuksien mukaan.

6. Rakennusfysikaalinen toimivuus ja kosteudenhallinta

6.1 RAKENTEIDEN KOSTEUS- JA HOMERISKIT JA NIIDEN ARVIOINTI

6.1.1 Rakenteiden vikasietoisuus ja homeriskit

Lähes nollaenergiatalon taloudelliset ratkaisut perustuvat rakennuksen kokonaissuunnitteluun ja optimointiin. Tämä tarkoittaa, että rakenteiden lämmöneristämisen taso riippuu oleellisesti käytettävistä talotekniikan ja uusiutuvan energian ratkaisuista. Nyt voimassa olevien rakennusten energiatehokkuutta koskevien määräysten (SRakMK D3 2012) rakenteiden lämmönläpäisykertoimien vertailuarvoihin nähden lämmöneristystason parantamisen tarve voi olla hyvin maltillinen. Lämmöneristäminen on kuitenkin edullinen tapa pienentää rakennuksen lämmitystarvetta. Siksi lämmöneristystason valinnan tulisi perustua riittävään analyysiin keinoista, joilla haluttu energiantarpeen taso voidaan saavuttaa.

Lämmöneristystason kasvattamista on julkisuudessa pidetty riskinä. Rakenteen lämmöneristävyys parantamisen seurauksena lämpöhäviöt rakenteiden kautta pienenevät, mikä samalla heikentää rakenteen kuivumiskapasiteettia. Tämän on katsottu heikentävän rakenteiden vikasietoisuutta. Rakenteiden kosteus- ja homevauriot liittyvät kuitenkin aina virheisiin, joita on syntynyt huonon suunnittelun, rakennusvirheiden, huollon ja ylläpidon puutteiden tai rakentamisen ja korjaustöiden puutteellisen kosteudenhallinnan johdosta. Kosteudenhallinnan tavoitteena on estää rakenteiden kastuminen rakentamisen, korjaustöiden ja käytön aikana.

Rakenteiden homeenmuodostuksen riskejä voidaan arvioida rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden perusteella. Homeriskisanalyysi perustuu VTT:n kehittämään homeen kasvun malliin, kuva 42. Mallin perusteella lasketaan rakenteen homehtumisherkkyydelle homeindeksi, joka kuvaa homeen kasvun mahdollisuutta asteikolla 0–6, taulukko 13. Homeindeksi lasketaan rakenteen tarkastelukohdan lämpötilan ja suhteellisen kosteuden viiden laskentavuoden vaihteluiden perusteella.

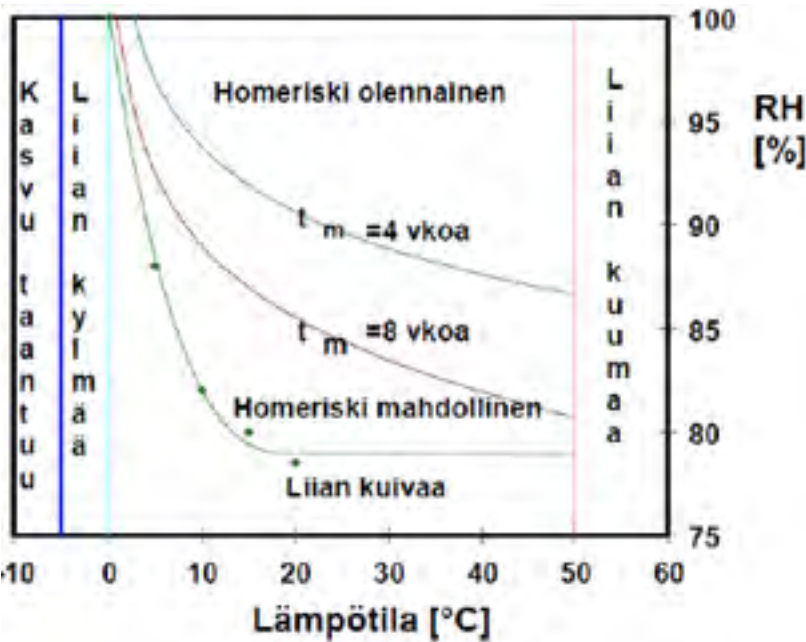
Homeriskien arvioinnissa otetaan huomioon rakenteen materiaalin homehtumisherkkyys. Materiaalit on jaoteltu neljään luokkaan, taulukko 14. Lisäksi otetaan huomioon tarkastelukohdan lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihteluiden aiheuttama kasvun taantuma.

6.1.2 Kosteus- ja homeriskien laskennallinen tarkastelu

Homeindeksin tarkoituksena on osoittaa rakenneperiaatteesta, rakentamistavasta, rakentamisen laadusta tai rakentamisen aikaisista olosuhteista johtuvia mahdollisia riskejä rakenteiden suunnittelun ja toteutuksen tueksi. Homeenkasvun mahdollisuus rakenteissa riippuu kuitenkin monesta eri tekijästä, joiden yhteisvaikutus voi aiheuttaa riskin toteutumisen, kuva 43.

Selvityksessä tarkasteltiin hyvin lämmöneristettyjen rakenteiden kosteusteknistä toimivuutta. Tarkastelut tehtiin laskennallisesti. Rakenteiden kosteusvaihtelut laskettiin viiden vuoden ajalta. Laskentaohjelmina käytettiin yksiulotteista WUFI Pro (versio 5.3) ja kaksiulotteista WUFI2D-3 ohjelmia.

Kuva 42. Homeenkasvun malli (Viitanen & Ojanen 2007). Homevaurioiden syntyminen on mahdollista, kun rakenteessa valitsevat lämpötila ja suhteellinen kosteus ovat homeenkasvulle sopivalla alueella kasvun syntymisen kannalta riittävän pitkän ajan. Rakenteen hetkellinen kosteus ei vielä aiheuta homeriskin kasvua.



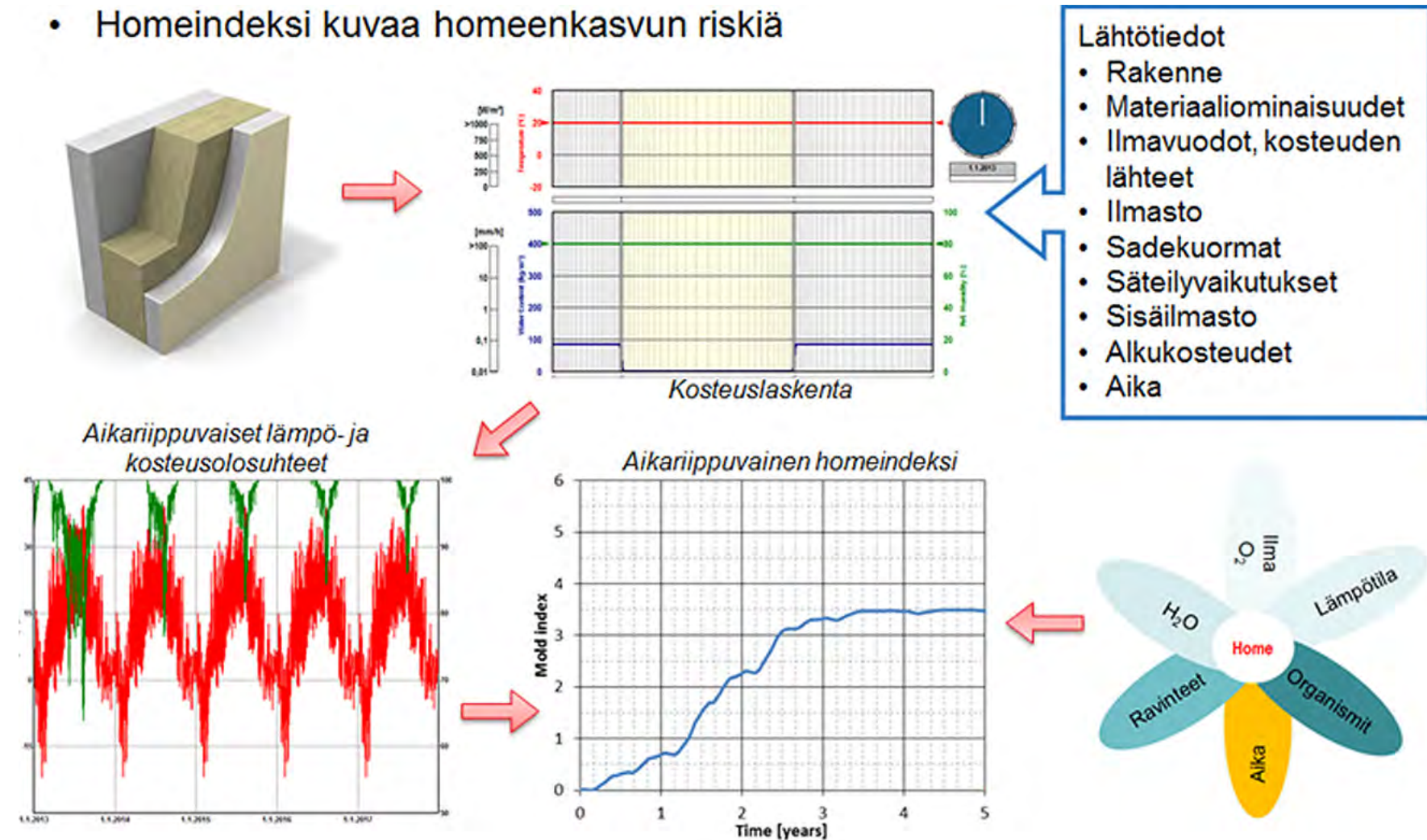
Taulukko 13. Homeindeksi eli materiaalien homehtumisherkkyyden luokitus (Viitanen & Ojanen 2007).

Homeindeksi	Luokitus perusteet
0	Ei kasvua, puhdas pinta
1	Mikroskoopilla havaittava kasvu, paikoin alkavaa kasvua, vähäinen määrä rihmastoa
2	Mikroskoopilla havaittava kasvu, useita rihmastopesäkkeitä muodostunut
3	Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto alle 10 % pinta-alasta (alkavaa itiöiden muodostusta) Tai Mikroskoopilla havaittava kasvu, rihmaston peitto alle 50 % pinta-alasta
4	Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto noin 10 – 50 % pinta-alasta Tai Mikroskoopilla havaittava kasvu, rihmaston peitto yli 50 % pinta-alasta
5	Silmin havaittava, paikoin runsas kasvu tai rihmaston peitto yli 50 % pinta-alasta
6	Erittäin runsas kasvu, rihmaston peitto yli 80 % pinta-alasta.

Taulukko 14. Rakennusmateriaalien homehtumisherkkyyden luokitus (Viitanen & Ojanen 2007).

Luokka	Homehtumisherkkyyden luokitus
1. Erittäin herkkä	Herkin taso vastaa käsittelemätöntä männyn pintapuuta.
2. Herkkä	Homehtumisherkkyyden luokka herkkä vastaa tyypillisesti puupohjaisia tai paperipintaisia tuotteita, höylättyä kuusta ja kipsilevyä.
3. Kohtalaisen kestävä	vastaa sementti- ja muovipohjaisten materiaalien sekä mineraalivillatuotteiden homehtumisherkkyyttä.
4. Kestävä	Homeetta vastustava taso 4 vastaa lasi-, metalli- yms. pintoja sekä materiaaleja, jotka on käsitelty homeen kasvua estävillä tuotteilla

- Homeindeksi kuvaa homeenkasvun riskiä



Kuva 43. Homehtumisen riskin arviointiprosessi (kuva: Sweco Rakennetekniikka Oy).

Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden suunnittelun kriteereiksi on ehdotettu esimerkiksi seuraavia menettelytapoja (ANSI/ASH-RAE 160-2009):

- Rakenteet säilyvät kuivina rakentamisen aikana, jolloin suunnittelun perusteena on rakennusmateriaalien tasapainokosteus ilmassa, jonka suhteellinen kosteus on 80 %. Poikkeuksena ovat betonirakenteet, joissa betonin tasapainokosteus vastaa ilman suhteellista kosteutta 90 %. Näiden raja-arvojen käyttö edellyttää, että rakentamisen aikana on toteutettu riittävät suojaustoimenpiteet rakenteen kastumisen estämiseksi.
- Rakenteet kastuvat rakentamisen aikana, jolloin materiaaleille käytettävät kosteuspitoisuudet ovat kaksinkertaiset edellä mainittuihin tasapainokosteuksiin verrattuna.

Selvitystyössä tarkasteltiin kahta tilannetta: Rakenne säilyy rakentamisen aikana kuivana, tai rakenne kostuu rakentamisen aikana. Lähtökohtana on, että rakentamisen kosteudenhallintaan on kiinnitetty riittävästi huomiota. Kuivan rakenteen kosteutena käytetään rakennusmateriaalien tasapainokosteutta ilmassa, jonka suhteellinen kosteus on 80 %. Kostuneen rakenteen kosteutta kuvataan tasapainokosteudella ilmassa, jonka suhteellinen kosteus 95 %. Molemmissa tapauksissa rakenteiden kaikkien kerrosten kosteudet vastaavat edellä mainittuja tasapainokosteuden arvoja betonia lukuun ottamatta. Tarkastelu rajaa pois vaihtoehdot, joissa rakenne on ollut pitkäaikaisesti alttiina sateelle.

Tarkastelut tehtiin tyypillisille ulkoseinä-, alapohja- ja yläpohjarakenteille. Tarkasteluiden rakennevaihtoehdot, tarkastelukohdat ja materiaalien ominaisuudet on esitetty liitteissä 2–4. Simuloinnissa on käytetty ohjeellisia materiaalitietoja. Pääosin on käytetty laskentaohjelman materiaalikirjaston tietoja lämmöneristeiden, betonin ja puurakenteiden lähtötietoina.

Tarkastelussa käytetyt reunaehdot ovat taulukossa 15. Rakennuksen julkisivuille osuvan viistosateen määrä lasketaan ottamalla huomioon rakennuksen korkeus sekä rakennuspaikan avoimuus tuulelle ja viistosateelle, kuva 44. Viistosateen määrä lasketaan standardin ANSI/ASHRAE Standard 160-2009 (ASHRAE 2009) mukaisesti.

Tuuletettavien julkisivurakenteiden tuulettavuudelle (tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus $n = 1/h$) käytetään vakioarvoa, joka perustuu FRAME-tutkimusohjelmassa (Mäkitalo 2012) saatuihin arvoihin, kuva 45.

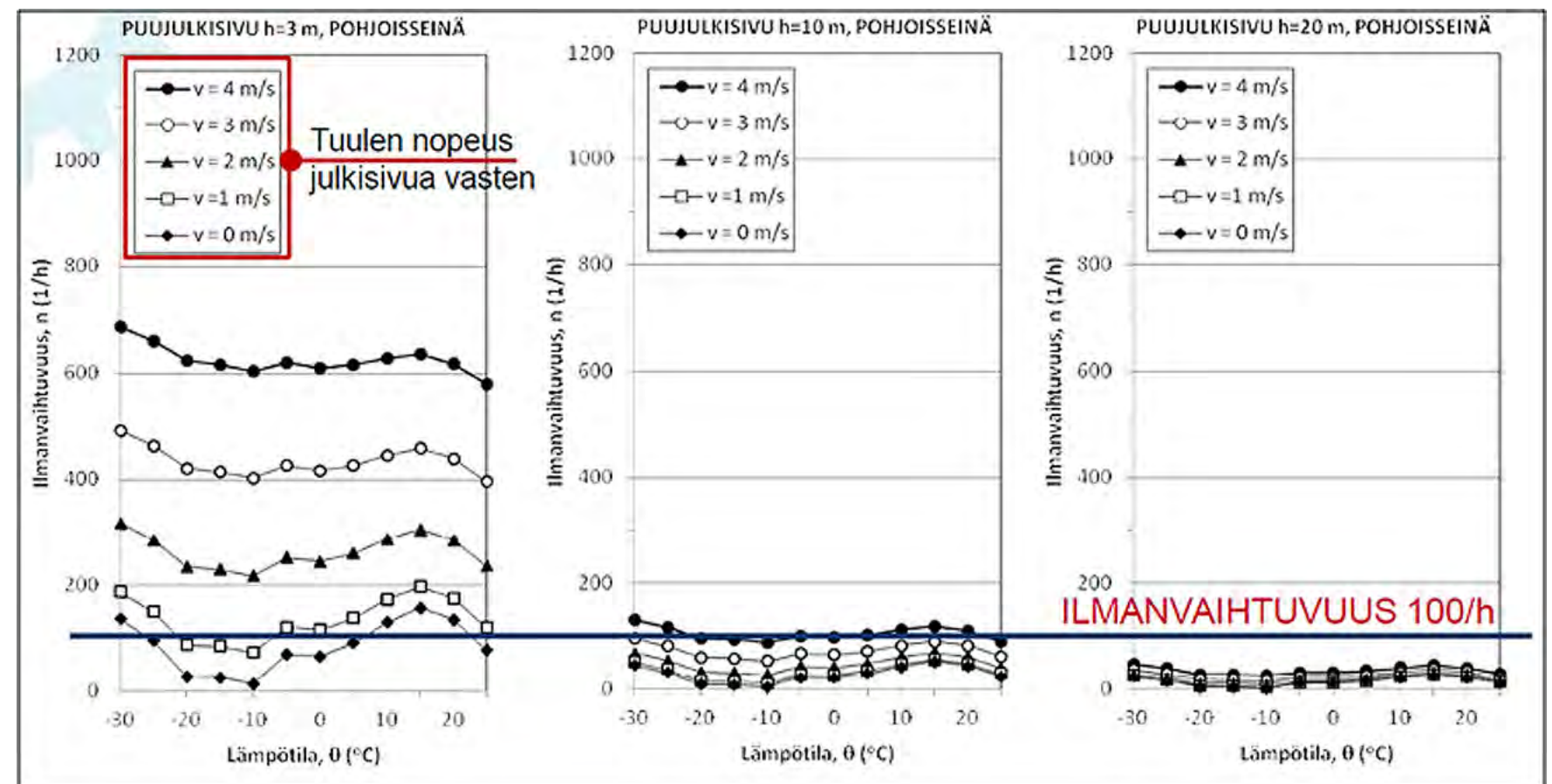
Suure	Arvo	Selite
Lämpö- ja kosteuslähteet		
Sateen aiheuttama kosteusrasitus	1 %	Osuus viistosateesta, ASHRAE 160 (ASHRAE 2009) mukaan. Tyvek-pintaisissa tuulensuojalevyissä ei ei ulkopuolista kosteuskuormaa.
Tuuletusraon ilmanvaihtoluku	100 h ⁻¹	Kuvan 45 mukaan
Geometria		
Kallistuskulma	90° / 180°	
Rakennuskorkeus	Tapaus 1	Kuvan 44 mukaan
Pinnan siirtokertoimet		
Ulkopinnan lämmönvastus	0,04 m ² K/W	SRakMK C4:n mukaan
Ulkopinnan S _d -arvo	-	
Lyhytaaltainen absorptiokerroin	0,4	Vaalea väri
Sateen absorptiokerroin	0,7	Kallistuksen ja rakennetyypin mukaan
Sisäpinnan lämmönvastus	0,13 m ² K/W	SRakMK C4:n mukaan
Sisäpinnan S _d -arvo	-	
Alkuolosuhteet		
Alkukosteus	80 % 95 %	Normaali tilanne Kostunut
Alkulämpötila	10 °C	
Laskentajakso		
Tarkastelu aika	5 vuotta	Laskentavuosi 1.1. – 31.12.
Simuloinnin aika-askel	1 h	

Taulukko 15. Kosteusteknisen toimivuuden arvioinneissa käytetyt reunaehdot. Reunaehdot riippuvat rakennetyypistä (ulkoseinä, alapohja, yläpohja).

Kuva 44. Simuloinnissa käytettävä rakennuskorkeus ja viistosa-
dekertoimien määrittely.



Kuva 45. Puu-/paneelijulkisivun ilmanvaihtuvuuden vertailuar-
voja (Mäkitalo 2012). Tässä tutkimuksessa on käytetty ilman-
vaihtolukua 100 1/h. Puujulkisivuja koskevat palomääräykset
edellyttävät toimenpiteitä palon leviämisen estämiseksi tuule-
tusvälissä. Siksi voi myös olla tarpeellista syytä jakaa korkeiden
rakennusten julkisivujen tuulettaminen 2–3 kerroksen korkui-
siin osiin.



6.1.3 Ulkoilmaston merkitys

Tarkasteluissa on käytetty kahta ilmastotyyppiä. Perustarkastelut tehtiin Ilmatieteen laitoksen ennusteeseen perustavalla Vantaa 2030 säällä. Ennusteen mukaan säätila muuttuu sateisemmaksi, eli rakenteisiin kohdistuva kosteusrasitus kasvaa. Vertailulaskenta tehtiin taulukon 16 rakennusfysikaalisen testivuoden ilmastolla. Sisäilman suhteellinen kosteus pohjautuu RIL:n ohjeiden mukaiseen sisäilman kosteuskuorman mitoitusarvoon (RIL 107-2012).

Taulukko 16. Tarkastelussa käytetyt ilmastotiedot

Suure	Arvo	Selite
Ulkoilmasto	Vantaa 2007	Taulukon 17 mukaan
Ilmansuunta	Pohjoinen / etelä	Taulukon 17 mukaan
Sisäilman lämpötila	21 °C	
Sisäilman kosteuslisä	Käyrä 2	Kuva 46
Sisäilman suhteellinen kosteus	Käyrä A	Kuva 47

Rakennusten rakennusfysikaalisia tarkasteluja varten on valittu kaksi rakennusfysiikan ilmastollista testivuotta (Vantaa 2007 ja Jokioinen 2004). Referenssivuosien aikana sääolosuhteet olivat selvästi tavanomaista suotuisampia homeen kasvulle ja kosteuden tiivistymiselle rakenteisiin. Käytettävä ilmasto ja ilmansuunta valintaan seuraavasti:

Rakenteet, joissa sade vaikuttaa niiden sisäosan kosteustekniseen toimintaan, esimerkiksi: - tiiliverhotut ulkoseinät - eristerapatut ulkoseinät - betonisandwich-rakenteet ^(*) - harkkorakenteet ^(*) - käännetyt katot	Vantaa 2007 Ilmansuunta seinärakennetarkasteluissa: etelä
Rakenteet, joiden sisäosat on suojattu sateen vaikutukselta, esimerkiksi: - puu- ja metalliverhotut ulkoseinät - betonisandwich-rakenteet ^(*) - harkkorakenteet ^(*) - sisäpuolelta eristetyt massiivirakenteet - yläpohjat, joissa on vesikate - ryömintätilaiset alapohjat	Jokioinen 2004 Ilmansuunta seinärakennetarkasteluissa: pohjoinen

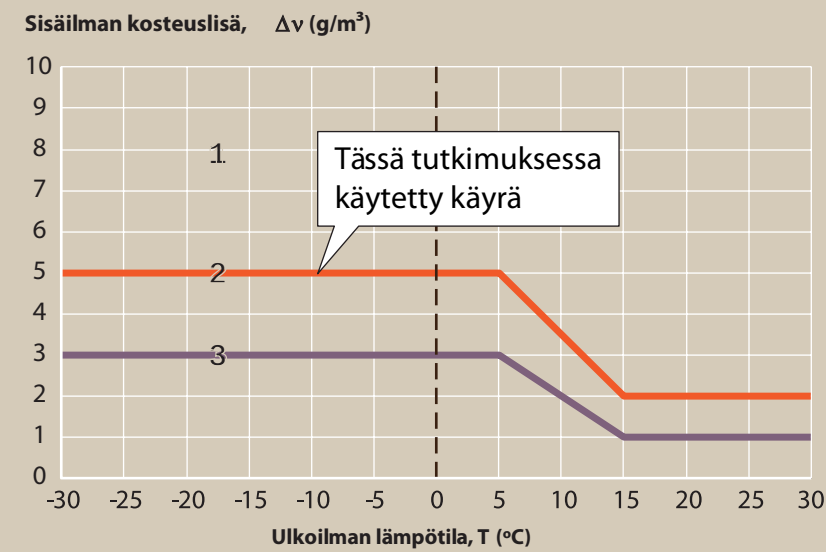
Taulukko 17. Ulkoilmaston valintaperusteet (Mäkitalo 2012, Ilmatieteen laitos).

*) Rakenteesta riippuen kumpi tahansa referenssivuosista voi olla kriittisempi. Rakenteen toiminta on suositeltavaa tarkistaa kummallakin referenssivuodella.

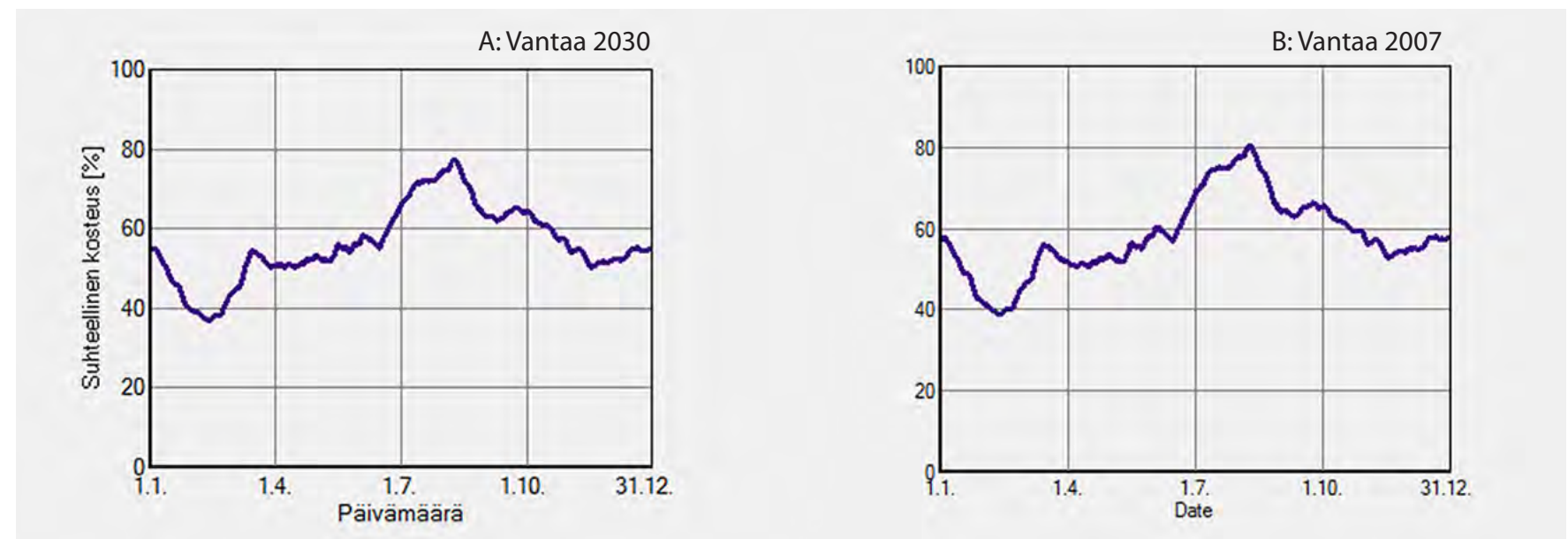
6. Rakennusfysikaalinen toimivuus ja kosteuden hallinta

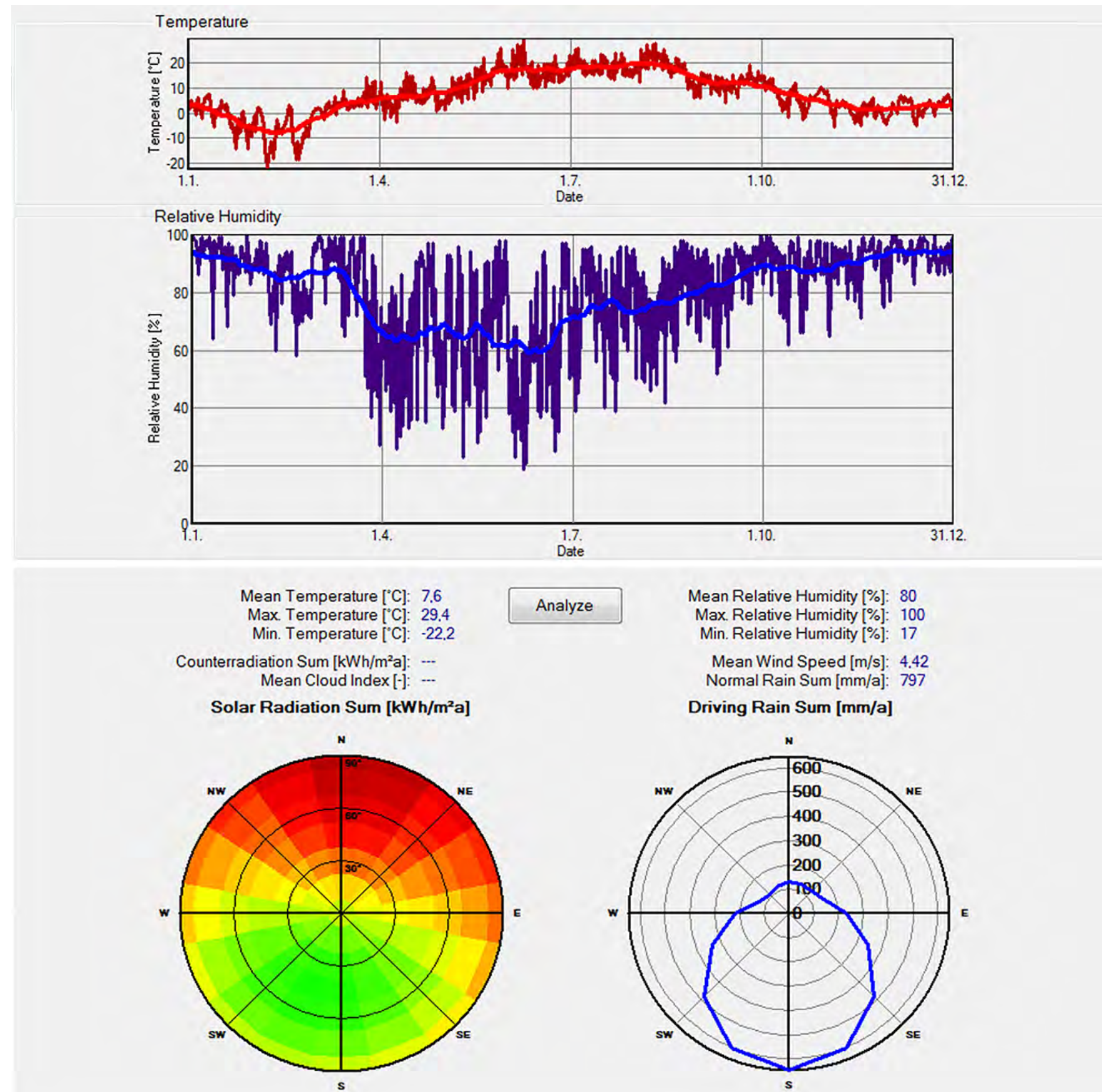
- 1 Kylpylät, uimahallit, laitoskeittiöt, pesulat, panimot, kirjapainot, kasvihuoneet, kostutetut tilat, ratsastusmaneesit, maatalouden tuotantorakennukset, eläinsuojat, teollisuuden kosteusrasitetut tilat
- 2 Asuinrakennukset, toimisto- ja liikerakennukset, hotellit ja majoitusrakennukset, ravintolat, kokoontumis- ja juhlatilat, opetusrakennukset ja päiväkodit, sairaalat ja hoitolaitokset, museot, liikuntahallit ja -tilat, jäähallit ja jäähdytetyt liikuntatilat, kylmä- ja pakkashuoneet, talviasuttavat vapaa-ajan asunnot
- 3 Vapaa-ajan asunnot, puolilämpimät tai kylmillään olevat rakennukset, varastot ja säilytystilat, ajoneuvosuojat

Kuva 46. Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot (Mäkitalo 2012, Ilmatieteen laitos).



Kuva 47. Sisäilman suhteellinen kosteus, kun sisälämpötila on 21 C°.





Kuva 48. Vantaa 2030.

6.2 RAKENTEIDEN TOIMIVUUS

6.2.1 Johtopäätöksiä laskentatuloksista

Viiden vuoden laskentajakson perusteella oikein toteutettujen rakenteiden kosteusteknisessä toimivuudessa ei ole ongelmia. Kosteuden aiheuttamaa homeriskin kasvua arvioitiin kahdessa tilanteessa. Rakenteen alkukosteudeksi oletettiin tasapainokosteus ilmassa, jonka suhteellinen kosteus on 80 %. Tämä vastaa tilannetta, jossa rakenteet on suojattu varastoinnin ja rakentamisen aikana. Lisäksi rakennuskosteudeksi oletettiin tasapainokosteus ilmassa, jonka suhteellinen kosteus on 95 % lukuun ottamatta betonია, jonka tasapainokosteudeksi oletettiin kaikissa tapauksissa 90 %. Jälkimmäinen tarkastelutapa kuvaa tilannetta, jossa rakenne on päässyt kostumaan rakentamisen aikana¹⁵. Tarkastelut tehtiin Ilmatieteenlaitoksen ennusteeseen ilmaston muuttumisesta lähitulevaisuudessa perustuvalla Vantaa 2030 säätilalla.

Rakenteiden kosteusriskeille herkimmille rajapinnoille laskettiin homeindeksit, jotka kuvaavat rakenteen eri osien herkkyyttä homeenkasvulle. Rakenteiden kosteus- ja homeriskianalyysien tulokset ja rakennetyypikohtaiset arviot ovat liitteissä 2–4. Laskennallisten tarkastelujen perusteella lämmöneristysten kasvattaminen ei vaikuta rakenteiden toimivuuteen. Samoin on selvää, että rakentamisen kosteudenhallinnan merkitys on rakenteiden toimivuuden kannalta ratkaiseva. Kun rakentamisen kuivaketju on kunnossa, tarkasteltujen rakenteiden kosteusteknisessä toimivuudessa ei ole ongelmia. Lisäksi myös hyvin lämmöneristetyillä rakenteilla on riittävä kuivumiskapasiteetti rakentamisen aikaisen vähäisen kostumisen kuivattamiseen.

Rakenteiden homehtumisherkkyyden tarkastelut ovat riskiarvioita. Laskentatuloksien lievä homeindeksin kohoaminen ei automaattisesti johda homeen kasvuun käytännön rakenteissa. Lisäksi oleellista on tarkastelukohdan sijainti rakenteessa. Rakenteen uloimpien osien lievä homeriski ei vaikuta rakennuksen sisäilmastoon, jos rakennuksen ulkovaippa on riittävän ilmanpitävä.

Rakenteiden pitkäaikaiseen toimivuuteen voidaan vaikuttaa rakentamisen kosteudenhallintaan liittyvillä toimenpiteillä, joita kuvataan yksityiskohtaisemmin seuraavassa luvussa.

Rakenteiden toimivuus hellejaksojen aikana

Hyvin eristettyjen rakenteiden toimivuus on varmistettu sekä laskennallisesti että pitkäaikaisten seurantamittausten avulla. Pitkäaikaisemmat mittaukset on tehty rakennuksista, jotka on rakennettu 1990-luvun alussa. Kosteus siirtyy rakenteissa pääsääntöisesti sisältä ulos. Paksuihin lämmöneristyskerroksiin liittyy oletus, että kuumina auringonpaisteisina päivinä kosteusvirran suunta vaihtuu rakenteen ulkopinnalta sisäänpäin, koska rakenteen uloimmat kerrokset lämpenevät sisäilman lämpötilaa selvästi korkeammiksi. Rakenteiden kosteuslaskennassa tämä otetaan huomioon. Kun rakenteen ulkopinta suuntautuu etelän-lounaan suuntaan, aurinkoisella paikalla olevan rakennuksen ulkoseinän lämpötilan nousu on suurin. Laskennallisten tarkastelujen perusteella tämä ei kuitenkaan aiheuta kosteusriskiä rakenteen sisäpuolen rakennekerroksissa. Koska kosteuden nousu on lyhytaikainen, kosteuden nousu ei aiheuta kosteusriskiä.

¹⁵ 95 % on joillekin eristetyypeille teoreettinen arvo, koska eristeen kosteus ei voi nousta näin korkeaksi varastoinnin aikana. Tarkastelut on kuitenkin haluttu tehdä kaikille rakennetyypeille yhdenmukaisin lähtötiedoin.

6.2.2 Parhaat käytännöt

Hyvin lämmöneristettyjen rakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta on jo olemassa myös pitkäaikaista seurantatietoa. Esimerkiksi Pietarsaareen 1994 valmistuneen IEA5 Aurinkotalon rakenteet ovat toimineet moitteettomasti jo yli 20 vuotta. Rakennuksen ulkoseinien U-arvo on 0,14 W/m²K, yläpohjan 0,09 W/m²K ja tuuletetun alapohjan 0,1 W/m²K. Rakennuksessa tehtiin seurantamittauksia kolmen vuoden ajan. Seurannan jälkeen talon toimivuutta arvioitiin yhteistyössä rakennuttajan kanssa vuoteen 2014 saakka. Rakennus sijaitsee meren rannalla, joten käyttöolot ovat tavanomaista ankarammat.

Kolmivuotisessa FRAME-tutkimushankkeessa syvennyttiin matalaenergiarakenteiden suunnittelun ja toteutuksen haasteisiin. FRAME-hankkeessa tunnistettiin lukuisia riskejä ja huolenaiheita, mutta osoitettiin myös ratkaisuja havaittuihin ongelmakohtiin.

Hankkeessa arvioitiin lämmöneristykseen lisäämisen heikentävän monien vaipparakenteiden kosteusteknistä toimintaa. Toisaalta hankkeen loppuraportissa todetaan, että on olemassa monia vaipparakenteita, joissa ilmastonmuutos ja lämmöneristedimension kasvu ei vaikuta rakenteen toimivuuteen.

Tutkimustulosten mukaan rakennusaikaisen kosteudenhallinnan merkitys korostuu (Vinha 2012). FRAME-hankkeen tulosten raportoinnissa kuitenkin todetaan, että lähes kaikki vaipparakenteet saadaan toimiviksi myös seuraavan 100 vuoden aikana rakenteellisten muutosten ja toteutusohjeiden muutosten avulla. Rakenteiden kosteusteknistä toimintaa voidaan parantaa merkittävästi rakenteita muuttamalla ja detaljien erilaisella toteutuksella (Vinha et al. 2013, 337).

Koska ulkovaipan rakenteet ovat pitkäaikaisia investointeja, niiden suunnittelussa on syytä ennakoida tulevat ilmaston ja sään ääri-ilmiöiden muutokset. FRAME-hankkeen loppuraportissa (Vinha et al. 2013) suositellaan mm. seuraavia rakenneratkaisuja:

- Tiiliverhottuun puurankaseinään tarvitaan hyvin lämpöä eristävä ja homehtumista kestävä tuulensuojalevy. Vuoden 2050 ilmastossa tuulensuojalevyksi soveltuu esimerkiksi 50 mm mineraalivillalevy. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää teräspeltiprofiilista tehtyä ristikoolausta puurungon ulkopinnassa. Korkeisiin tiiliverhottuihin rakenteisiin FRAME-hanke suosittelee vesitiivistä, molemmin puolin tuuletettua rakennekerrosta tiiliverhouksen tuuletustilaan (Vinha 2012, 11).
- Yläpohjarakenteisiin suositellaan hankkeen tulosten perusteella lämpöä eristävää aluskatetta. Vuoden 2050 ilmastossa riittävä aluskatteen lämmönvastus saavutetaan esimerkiksi n. 20 mm XPS-eristeellä. Yläpohjaa tulee tuulettaa kohtuullisesti, ja sen ilmatiiviyteen tulee kiinnittää erityistä huomiota (Vinha 2012, 14).
- Ryömintätilan maapohja tulee lämmöneristää varsinkin puurakenteista tuuletettua alapohjaa käytettäessä. Vuoden 2050 ilmastossa eristeeksi soveltuu esimerkiksi 50 mm EPS- tai XPS-eristettä tai 150 mm kevytsoraa. Alapohjarakenteen ilmatiiviyteen tulee kiinnittää erityistä huomioita. Oikein suunniteltu ja toteutettu tuulettuva alapohja ei tarvitse koneellista kuivatusta tai lämmitystä (Vinha 2012, 15).

Toimivia ratkaisuja on ohjeistettu mm. TTY:n tutkimusraportissa *Matalaenergia- ja passiivitalojen rakenteiden ja liitosten suunnittelu- ja toteutusohjeita* (Lahdensivu et al. 2012).

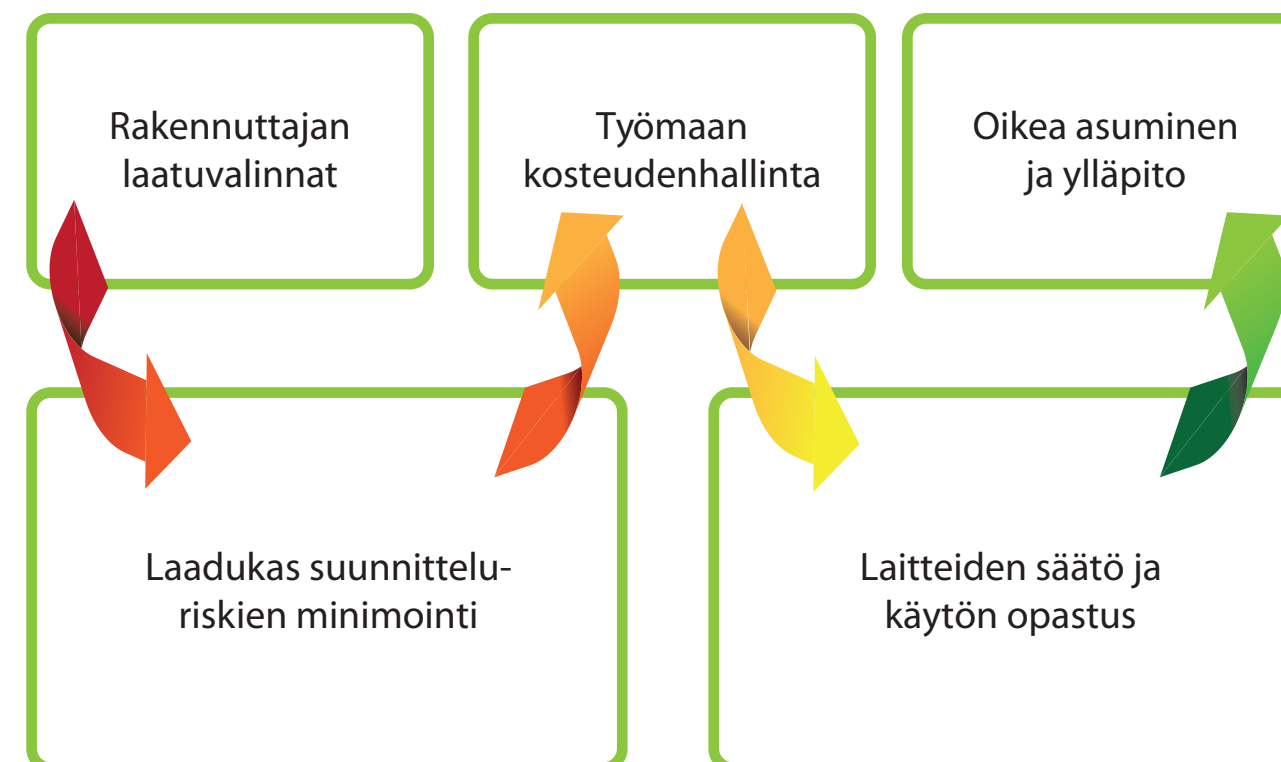
6.3 KOSTEUDENHALLINTA

Merkittävä osa rakennusten kosteus- ja homeongelmista pystytään estämään systemaattisella kosteudenhallinnalla, joka kattaa koko rakentamisprosessin hankesuunnittelusta rakennuksen ylläpitoon (kuva 49).

6.3.1 Kosteudenhallinnan laatutavoitteet

Kosteudenhallinnan laatutavoitteet asetetaan hankesuunnitteluvaiheessa pääsuunnittelijan johdolla, yhteistyössä rakennuttajan ja hankkeen muiden suunnittelijoiden kanssa. Kosteudenhallinta kohdistuu sekä rakentamisprosessiin että toteutettavaan rakennukseen.

RAKENNUSPROSESSIN KOSTEUDEN HALLINTA



Kuva 49: Rakennusprosessin kosteudenhallinta (Oulun rakennusvalvontavirasto).

6.3.2 Kosteusriskien arviointi

Hankkeen suunnittelijat toteuttavat pääsuunnittelijan johdolla kosteusriskien arvioinnin. Tavanomaisissa hankkeissa riittää kokemukseen perustuva riskiarvio, jossa luetteloidaan yleiset riskikohdat ja määritellään niihin liittyvät toimenpiteet suunnittelussa, rakentamisessa ja valvonnassa.

Hankkeen kosteusriskiluokka määritellään asteikolla 1–3 pääasiassa hankkeen vaativuuden perusteella. Myös mahdollisen vaurion seurausten vakavuus voi vaikuttaa kosteusriskiluokkaan. Kosteusriskiluokan mukaan valitaan

- normaali menettely
- osittain tehostettu menettely
- tehostettu menettely.

Tehostettu menettely kohdennetaan riskiarvion osoittamiin riskialttiisiin ratkaisuihin. Kosteusriskiluokkaa voivat nostaa esimerkiksi

- rakennuspaikan erityisolosuhteet (sijainti meren rannalla tms.)
- suunnitteluratkaisut (tuuletettu alapohja, räystäätön julkisivu, käytöstä johtuvat suuret kosteusrasitukset tms.).

6.3.3 Kosteudenhallintasuunnitelma

Kosteudenhallintasuunnitelman laadinta alkaa suunnittelun alkuvaiheessa. Sitä täydennetään ja noudatetaan suunnittelun ja rakentamisen aikana. Kosteudenhallinta-suunnitelmasta saadaan olennaisia tietoja myös rakennuksen huoltokirjaan.

Kosteudenhallintasuunnitelman rakenne on seuraava (RIL 250-2011):

- Hankkeen yleistiedot
- Rakennuttajan kosteudenhallinnan laadun tavoitetaso
- Kosteusriskien arviointi
- kosteusriskiluokka
- kriittiset rakenteet ja laatutekijät
- Rakenteiden kuivumisaika-arviot
- Työmaaolosuhteiden hallinnan suunnittelu
- Kosteusmittaussuunnitelma.

6.3.4 Työmaa-aikainen kosteudenhallinta

Rakenteiden ja rakennustuotteiden varastoinnilla työmaalla on merkittävä vaikutus rakenteiden toimivuuteen. Varastoinnille on annettu mm. seuraavia ohjeita:

- Ulkona peitettynä varastoitavat:
 - Betonituotteet
 - Metallituotteet
 - Muovipohjaiset lämmöneristeet
- Kosteudelta ja auringolta suojattavat:
 - Muuraustuotteet
 - Runkopuutavara
 - Julkisivutuotteet
 - Lämmöneristeet
- Kylmävarastossa (kontissa) varastoitavat:
 - Ikkunat ja ovet
 - Arvokas talotekniikka, laitteet, valaisimet, kaapelit
- Lämpimässä ja kuivassa varastoitavat:
 - Pintatuotteet kuten parketit, tapetit, maalit, tasoitteet
 - Kalusteet, varusteet, hanat, kodinkoneet
- Varastointi rakennuksessa rakennustöiden aikana:
 - Holveille varastoitaessa huolehditaan siitä, että materiaaliniput eivät hidasta rakenteiden kuivumista.

Rakenteet ja materiaalit tulee suojata myös kuljetusten aikana. Suositeltavaa on käyttää kuljetuksissa katettuja rekkoja tai kuorma-autoja tai varmistaa rakenteiden ja materiaalien kuivana pysyminen erillisillä suojauksilla.

Rakentamisen laadun varmistaminen perustuu eri osapuolten yhteistyöhön ja säännöllisiin työmaakatselmuksiin. Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden varmistamiseksi voidaan tehdä suunnitelmien rakennusfysikaalinen tarkastus ja työmaan säännölliset tarkastukset ulkopuolisen tahon toimesta, tehdä tarvittavat kosteusmittaukset rakentamisen eri vaiheissa, varmistaa rakentamisen suunnitelmien mukaisuus yms.

Erityisesti puurunkoisen rakennuksen kosteudenhallinnassa on suunniteltava rungon ja rakennusosien suojaus työmaa-aikana. Yhä useamman rakennuksen runko tehdään teltan suojaamana. Suuri suojatelta lisää kustannuksia, mutta olosuhteet ovat vastaavasti koko ajan hallittavissa. Hyvä säänsuojaus voidaan toteuttaa myös esimerkiksi tilaamalla kattoristikon räystäskannattimet ylipitkinä siten, että niiden varaan voidaan rakentaa vesikaton jatkeeksi runkoa ympäröivä, säältä suojattu työskentelytila. Räystäskannattimet katkaistaan oikeaan mittaansa ja räystäs viimeistellään, kun säänsuoja puretaan rakennuksen ympäriltä.

Rakentamisen toteutustapa ja kosteudenhallinta eri työvaiheissa on syytä huomioida rakenteita suunniteltaessa. Esimerkiksi paikan päällä tehtävän puurungon alajuoksu altistuu helposti kosteudelle, jos sen eteen sokkelin päälle muodostuu vaakahylly ennen tuulensuojavillan asennusta. Jos puurunko tuulensuojavilloineen tehdään elementteinä, vesihyllyä ei muodostu.

Kosteusteknisessä laskennassa oletetaan rakennusmateriaalikerrosten olevan puhtaat. Todellisuudessa suunnittelemattomat aineet (sahanpuru, puuosat jne) rakenteissa saattavat aiheuttaa kondensoitumista ja homehtumista. Työmaa-aikaisessa valvonnassa ja toteutuksessa tulee kiinnittää erityistä huomiota em. asioihin.

Ongelma korostuu paksummissa lämmöneristyskerroksissa, jolloin kuivuminen tapahtuu hitaammin.

6.3.5 Käytön ja ylläpidon ohjeistus

Käyttöönoton yhteydessä opastetaan rakennuksen käyttäjät ja ylläpitäjät hoitamaan rakennusta ja sen järjestelmiä oikein. Tämä käsittää mm. salaojien, vesikaton, julkisivujen ja lvi-järjestelmän toimivuuden sekä oikeat siivoustavat. Erityisesti on kuvattava rakennuksen erikoispiirteet ja mahdolliset poikkeukselliset kosteusrasitukset. Huoltokirjassa kuvataan rakennusosien ja teknisten järjestelmien hoito- ja huoltajaksot sekä huoltotoimenpiteet.

Rakennuksen kunnon tarkkaileminen ja kosteus-vaurioiden ennakointi on tärkein keino estää vakavien vaurioiden syntyminen. Kosteusvaurion ja/tai homeen merkkejä ovat mm.

- tummat pisteet tai alueet rakenteiden pinnoilla ulkona tai sisällä
- kosteusläiskät seinäpinnoitteessa
- paikoitellen väriä muuttanut tapetti
- irtoava tapetti, maali, kaakelit tai muovimatto
- laatoituksen tummat saumat
- parketin paikoittaiset tummumiset
- muurahaisten ilmestyminen sisätiloihin
- ikkunoiden jatkuva huurtuminen
- maakellarimainen ”vanhan talon” haju
- näkyvä homekasvu.

Käyttäjän tehtäviä kosteudenhallinnassa ovat mm.

- vesikalusteiden ja vettä käyttävien laitteiden kunnosta huolehtiminen
- pintamateriaalien kunnosta huolehtiminen erityisesti märkätiloissa
- ulkovaipan rakenteiden kunnon ja toimivuuden seuraaminen
- ilmanvaihdon toimivuuden seuraaminen ja huolehtiminen
- putkivaurioiden havaitseminen ja niistä ilmoittaminen
- tarkoituksenmukaisten siivousmenetelmien käyttö
- muun kosteudentuoton hallitseminen. (RIL 250-2011)

6.3.6 Parhaat käytännöt

Oulun rakennusvalvontavirasto on lanseerannut *rakennuksen kuivaketju* -ajattelun, jossa edellytetään elintarvikkeiden kylmäketju-ajattelua mukaillen, että rakennusmateriaalit ja -tuotteet päätyvät valmiin rakennuksen osiksi siten, että niiden kosteusolosuhteet ovat hallitut kaikissa prosessin vaiheissa. Kuivaketju ei saa päästä katkeamaan.

Rakennuksen suunnitelmien ja toteutustietojen perusteella voidaan määritellä rakennuksen kosteuslaatuluokka asteikolla A–D. Määrittely perustuu seuraaviin tekijöihin:

- 1) Rakennuksen ilmanpitävyys
 - ilmatiiviysmittaus
- 2) Kylmäsiltojen määrä
 - lämpökamerakuvaus
- 3) Rakenteiden kuivumiskyky
 - rakennesuunnittelijan arvio
- 4) Työmaan kosteudenhallinta
 - vastaavan työnjohtajan tai valvojan arvio
- 5) Talotekniikan toimivuus
 - LVI-suunnittelijan arvio.

Pääsuunnittelija kerää tulokset yhteen ja määrittää niiden perusteella rakennuksen lopullisen kosteuslaatuluokan. Rakennuksen kosteuslaatuluokka määräytyy viiden osatekijän huonoimman tuloksen eli ”ketjun heikoimman lenkin” mukaan. A-kosteuslaatuluokan rakennuksessa kaikki edellä kuvatut osa-alueet ovat kunnossa.

7. Rakenteellisen energiatehokkuuden taloudellinen kannattavuus

7.1 LÄMMÖNERISTÄMISEN KUSTANNUSVAIKUTUKSET

7.1.1 Vaikutus investointikustannuksiin

Rakenteiden hyvä lämmöneristys on edullinen keino pienentää rakennuksen lämmitystehon tarvetta. Rakennusten lämmöneristystason johdannaisvaikutuksia ovat lämmitystehontarpeen pienentyminen ja lämmönjakoratkaisusta riippuen lämmönjakojärjestelmän yksinkertaistaminen. Pienimmillään paremman lämmöneristyksen lisäkustannus on pelkkä materiaalikustannus. Yleensä rakenteita joudutaan kuitenkin muuttamaan paksumman lämmöneristyksen johdosta. Nykyistä (2012) määräystasoa paremman lämmöneristyksen rakentamien aiheuttaa seuraavia lisäkustannuksia:

- Rakennuspaikkaan ja maatöihin liittyvä kaivu- ja täyttötyö ja materiaalit
- Materiaalikustannukset: lämmöneriste, runkorakenteiden muutokset
- Rakenteen paksuuden vaikutus ikkuna- ja oviaukkojen sekä perustus- ja yläpohjaliitoksiin
- Elementtirakenteiden valmistuskustannus
- Paksumpien elementtirakenteiden kuljettamisen lisäkustannus
- Elementtien asentaminen
- Paikalla rakentamisen työkustannus
- Työmaavalvonnan lisäkustannukset
- Rakennuttamisen lisäkustannukset
- Arvonlisäveron lisäys
- Vaikutus työmaan katteeseen

Edellä mainitut kustannukset ovat osa rakennusteknisiä töitä, ja ne ovat aina tapauskohtaisia. Lisäkustannusten osuus rakennusteknisistä töistä on rakennustyyppistä riippuen tyypillisesti noin 3–8 % ja riippuen yleensä siitä miten aikaisessa vaiheessa rakentamisprosessia rakenteellisen energiatehokkuuden parantamispäätös tehdään.

Energiatehokkuusinvestointien kannattavuuden laskentaan on erilaisia menetelmiä. Yksityisen rakennuttajan kannalta selkein tapa on laskea investoinnin suora takaisinmaksuaika. Menettelyssä verrataan kahta rakentamistapaa; määräystenmukaista ratkaisua ja energiatehokasta ratkaisua. Vertailua varten lasketaan kaikki energiatehokkuuden parantamiseen liittyvät kustannukset ja verrataan niitä saavutettuun energiakustannusten säästöön. Tuloksena saadaan aika vuosina, jona energiatehokkuuden lisäkustannus katetaan säästetyn energian hinnalla.

Nykyarvomenetelmä on pitkäaikaisten investointien elinkaaren aikaisen kannattavuuden laskentaan soveltuva laskentamenetelmä. Menetelmässä investoinnin kustannukset ja sen tuomat tuotot eli energiatehokkuuden aikaansaamat kustannussäästöt lasketaan diskonttaamalla nykyarvoon. Laskentakorko voi sisältää myös investoinnin tuottovaatimuksen ja rahan arvon muuttumisen pitoajalle eli laskentajakson pituudelle. Rakennuksen käyttöikä on pitkä, jolloin tässä mielessä rakennuksen koko käyttöiän kestävät rakenteet sekä usein huollettavien ja vaihdettavien koneiden ja laitteiden lähtökohdat elinkaarikustannuslaskentaan ovat erilaiset. Kuitenkin elinkaarilaskentaan liittyy rakennuksen pitkän käyttöiän johdosta epävarmuuksia, jonka takia energiatehokkuusmääräysten laadintaan liittyvässä asuinrakennusten elinkaarikustannuslaskennassa käytetään 30 vuoden laskenta-ajanjaksoa ja muille rakennuksille tätä lyhyempää aikaa 20 vuotta (Fi-Cost-optimal-2013).

Rakennuksen rakentamisen ja käytön elinkaarikustannukset muodostuvat investointi-, energia-, huolto-, kunnossapito- ja uusimiskustannuksista. Elinkaarikustannusten laskennassa otetaan huomioon suoran takaisinmaksuajan laskentaa yksityiskohtaisempia tietoja, kuten huoltotarve, laitteiden ja tarvikkeiden käyttöikä ja uusimisen tarve, energian hinnan muutokset, rahan arvo ja lainojen korkokustannukset. Huolto- ja kunnossapitokustannukset ovat vertailtavien rakentamistapojen osalta yleensä kohtuullisella tarkkuudella yhtä suuria, joten niitä ei tavallisesti oteta huomioon laskennassa.

Energiankäytöllä, sen hinnalla ja hinnan kehityksellä on suuri merkitys tarkastelukohteiden elinkaarikustannuksiin. Energian hinnan ennustamiseen vuosien päähän liittyy kuitenkin merkittäviä epävarmuustekijöitä. Liian korkeaksi arvioitu energian hinta antaa liian optimistisia tuloksia. Juuri investoinnin pitkä pitoaika eli aika, jolle elinkaarilaskenta tehdään, heikentää tuloksen luotettavuutta.

Laskennassa voidaan ottaa huomioon myös jäännösarvo, joka tarkoittaa investoinnin arvoa investointiajanjakson lopulla. Taloteknisten järjestelmien käyttöiät ovat yleensä huomattavastikin lyhyempiä kuin rakennuksen kantavien tai lämmöneristysrakenteiden käyttöikä. Jäännösarvon suuruuden arviointi on myös suhteellisen vaikeaa, jolloin se usein jätetään ottamatta huomioon laskennassa.

RTT:n eristeteollisuuden teettämässä Optiplan Oy:n tekemässä selvityksessä (Salonen & Ryyänen 2015) asuinkerrostalon rakenteiden lämmöneristystason parantamisen takaisinmaksuajaksi saatiin rakennetyypistä riippuen 3–25 vuotta. Takaisinmaksuaika laskettiin olettamalla energian hinnannousuksi 4,6 % vuodessa. Laskentakorkoa ja inflaatiota ei otettu huomioon.

RTT:n eristeteollisuuden teettämässä Insinööritoimisto Vesitaito Oy:n selvityksessä (Vesitaito 2015) tarkasteltiin pientalon rakenteiden lämmöneristystason vaikutusta sähkö- ja maalämpötalossa. Paremman lämmöneristystason takaisinmaksuajat olivat 6–22 vuotta. Energian hinnannousuksi oletettiin 4,6 % vuodessa. Laskentakorkoa ja inflaatiota ei otettu huomioon.

Ympäristöministeriön ja tutkimusorganisaatioiden yhteistyönä tehdyssä selvityksessä (Fi-Cost-optimal-2013) tarkasteltiin pientalon ja asuinkerrostalon lämmitystavan, rakenteiden ja talotekniikkaratkaisujen vaikutusta elinkaarikustannuksiin 30 vuoden tarkastelujaksolla. Tarkasteluissa diskonttokorko vaihteli 10 ja 1 % välillä. Energian hinnan nousuksi oletettiin joko kaikilla energiamuodoilla 2 % vuodessa tai hinnannousu vaihteli polttoaineittain (pelletti 3 %, sähkö ja kaukolämpö 4 % ja öljy 6 % vuodessa). Laskentaparametreihin liittyvillä oletuksilla on merkittävä vaikutus tulokseen. Selvityksen energiatehokkaimman pientalon perusinvestointikustannus on 10–12 % määräysten mukaista taloa suurempi. Rakennettujen passiivipientalojen rakentamiskustannukset määräystasoon verrattuna ovat vaihdelleet 3 ja 10 % välillä.

7.1.2 Parhaat käytännöt

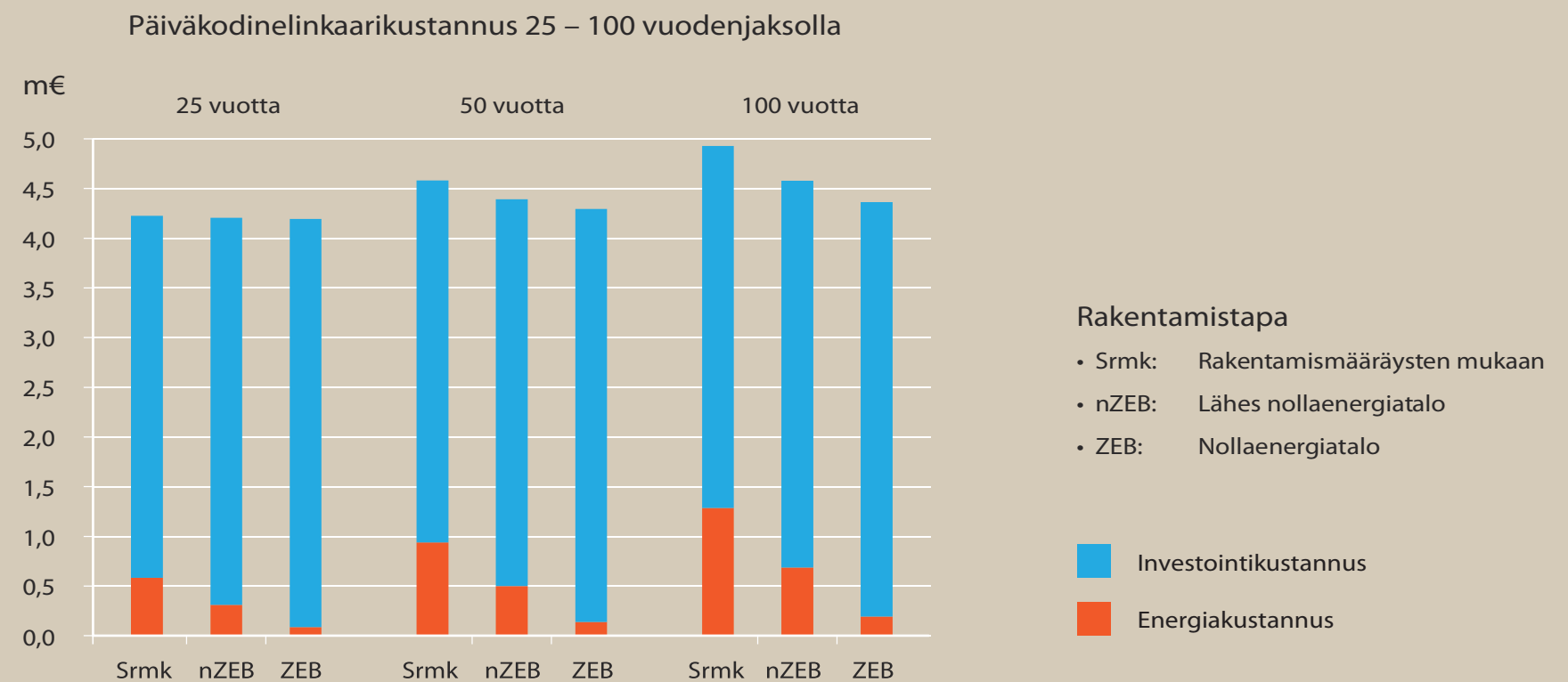
Lähes nollaenergiatalon ulkovaipan lämmöneristämisen lisäkustannukset verrattuna määräystason rakennuksen rakennustekniisiin töihin ovat suuruusluokaltaan 1 - 3 %. Vantaalle suunniteltavan Leinelän II päiväkodin (kuva 50) lähes nollaenergiavaihtoehdon paremman lämmöneristystason lisäkustannukset rakennustekniisiin töihin verrattuna olivat 1,5 %. Kaikkien rakennusteknisten töiden lisäkustannus verrattuna määräystason rakennukseen oli noin 3,8 %. Lähes nollaenergiavaihtoehdon lisäkustannus oli noin 7 %. Rakennuksen elinkaarikustannukset laskettiin nykyarvomenetelmällä. Kustannusvertailussa päiväkodin lähes nollaenergiavaihtoehto oli 25 vuoden pitoajalla edullisempi kuin määräystason rakennus, kuva 51.

Vantaalle 2011 valmistuneen Paroc-passiivitalon lisäkustannuksiksi laskettiin 4,2 % verrattuna vuoden 2012 rakentamismääräysten (SRakMK D3 2012) mukaiseen taloon. Rakennuksen energiatehokkuus perustuu pääasiassa rakenteiden hyvään lämmöneristystasoon ja tiiviiseen ulkovaippaan.

Rakennuksessa on maalämmönvaihdin raitisilman esilämmitykseen ja viilennykseen. Maalämmönvaihtimen tuotoksi laskettiin noin 1000 kWh vuodessa (Kouhia, Nieminen & Holopainen 2013). Taulukoissa 18 ja 19 ovat rakennuksen ominaisuudet ja kustannustiedot. Passiivitalon kustannuksia on tarkasteltu vain rakennuksen paremman lämmöneristystyksen kannalta.



Kuva 50. Leinelän II päiväkoti, ehdotussuunnitelma. Rakennuksen alapohjan parempi lämmöneristys ja osa ulkoseinien rakenteista ovat vaikeita tai erittäin vaikeita lämmöneristämisen kannalta, mikä on otettu huomioon rakennusosakohtaisissa kustannuksissa.



Kuva 51. Päiväkodin elinkaarikustannukset (Nieminen & Laitinen 2014).

7. Rakenteellisen energiatehokkuuden taloudellinen kannattavuus

Taulukko 18. Paroc-passiivitalo ja vertailutalo.

Ominaisuus	Paroc-passiivitalo		D3 2012
Tontti, m ²	786		
Rakenteiden U-arvot, W/m ² K			
Ulkoseinä	0,09		0,17
Yläpohja	0,07		0,09
Alapohja	0,1		0,16
Ikkunat	0,7		1,0
Ovet	0,7		1,0
Lämmitetty ala, m ²	374		
Lämmitetty tilavuus, kellari, m ³	720		
Lämmitetty tilavuus, 1. kerros, m ³	830		
Ikkunat ja ovet, % nettoalasta	17		

Taulukko 19. Paroc-passiivitalon kustannukset.

Kustannus	Paroc- passiivitalo	D3 2012
Rakentaminen, €	589 400	561 300
Oma työ, €	119 000	115 000
Kokonaiskustannus ilman tontin hintaa, €	708 400	676 800
Kokonaiskustannus, €/m ²	1894	1809
Lisäkustannus, € - Ei maalämmönvaihdinta, ikkunat U=1,0 W/m ² K	28 000	
Lisäkustannus, €/m ²	75	
Lisäkustannus, %	4,2	

7. Rakenteellisen energiatehokkuuden taloudellinen kannattavuus

Energiatehokkuusinvestoinnille voidaan antaa tuottovaatimus. Energiansäästötoimenpiteiden kannattavuutta arvioitaessa tuottovaatimuksena voidaan käyttää reaalista laskentakorkoa. Kurvinen & Heljo (2013) suosittelevat laskentakorkokannan valintaa väliltä 3–5 %. Valtiokonttorin antama suositus reaalikoroksi vuodelle 2015 on -0,4 % (nimelliskorko 0,6 % ja inflaatio 1,0 %).

Energiansäästötoimenpiteiden kannattavuutta suhteessa asetettuun tuottovaatimukseen voidaan arvioida sisäisen koron periaatteella. Paroc-passiivitalon kannattavuuslaskelmissa tuottovaatimukseksi asetettiin reaalikorko.

Taulukossa 20 on laskettu passiivitalon ja vertailutalon lämmityksen energiakustannukset. Taulukossa 21 on arvioitu investoinnin kannattavuutta eri laskentatavoilla. Laskentakoron valinnalla on suuri vaikutus aikaan, jona investointi tulee kannattavaksi. Paroc-passiivitalon kokonaisratkaisua ei suunniteltu kustannusoptimin kautta. Rakennuksen arkkitehtuuri, tilat ja tekniset ratkaisut olivat rakennuttajien valintoja. Rakentamisella haluttiin myös osoittaa hyvin lämmöneristetyin talon lämmöneristysten toimivuus.

Taulukko 20. Paroc-passiivitalon ja vertailutalon lämmityskustannukset.

	Paroc- passiivitalo	D3 2012
Tilojen lämmitysenergia, kWh/m ² - Ei maalämmönvaihdinta, ikkunat U = 1,0 W/m ² K	37	71
Lämmityskustannus vuodessa, € (0,15 €/kWh)	2 076	3 983
Suorat lämmityskustannussäästöt vuodessa, €	1 907	

Taulukko 21. Energiatehokkuusinvestoinnin kannattavuustarkastelut.

	Paroc- passiivitalo
Suorat lämmityskustannussäästöt vuodessa, €	1907
Lisäkustannusten (28 600 €) suora takaisinmaksuaika, v	14,7
Suora takaisinmaksuaika, jos energian hinta nousee 1 %/v	13,7
Nykyarvoon perustuva takaisinmaksuaika, laskentakorko -0,4 %	14,3
Nykyarvoon perustuva takaisinmaksuaika, laskentakorko 4,0 %	22,5

8. Uusiutuvan energiantuotannon integrointi

Uusiutuvalla omavaraisenergialla tarkoitetaan rakennuksessa tai sen välittömässä läheisyydessä tapahtuvaa uusiutuvan energian tuotantoa. Käytännössä uusiutuva omavaraisenergia on aurinkolämpöä, aurinkosähköä, tuulisähköä tai lämpöpumppujen tuottamaa energiaa.

Uusiutuvan omavaraisenergian kannattavuus on yleensä syytä arvioida jo hankesuunnitteluvaiheessa, jotta mahdollinen integrointi rakennukseen voidaan huomioida rakennussuunnittelussa.

Uusiutuvan omavaraisenergian tuotto vaikuttaa SRakMK D3 2012:n tarkoittamaan rakennuksen E-lukuun. E-luvun laskemiseksi on määriteltävä tontilla tapahtuvasta aurinko- ja tuulienergian vuosituotosta se osuus, joka pystytään käyttämään rakennuksessa. Tätä laskentamenettelyä ei ole ohjeistettu SRakMK D5:ssä.

Tuoton ja kulutuksen ajallinen vastaavuus on keskeinen kysymys myös uusiutuvan energian tuottojärjestelmää mitoitettaessa. Periaatteessa kysymys on koko vuoden kattavasta tuoton ja kulutuksen tehotarkastelusta, jossa sähkö- ja lämpöenergiaa on tarkasteltava erillisissä taseissa. Käytännössä hyödyksi saatava osuus on usein määritelty tuntitasoisella energiantuoton ja -kulutuksen tarkasteluilla. Menettelyä varten on muodostettava sähköenergiankulutuksen tuntitasoinen käyttöprofiili, joka kattaa kaiken sähköenergiankulutuksen, jota uusiutuvalla energiantuotannolla on määrä kattaa. Aurinkosähköjärjestelmiä mitoitetaan yleisesti rakennuksen sähköenergiankulutuksen pohjatehon mukaan. Molempien mitoitustapojen tavoitteena on välttää tilanteet, joissa uusiutuvan energian hetkellistä huipputuottoa ei pystytäkään käyttämään kokonaan rakennuksessa.

Hyödynnettävissä olevaa osuutta (tuoton ja kulutuksen ajallista vastaavuutta) voidaan kasvattaa esimerkiksi

- varastoimalla sähköä akkuihin
- varastoimalla lämpöä vesivaraajaan
- aurinkopaneelien ja -keräinten suuntauksella
- kulutuksen ohjauksella.

SRakMK D3 2012:n mukaan verkkoihin vietyä uusiutuvaa energiaa ei saa laskea hyödyksi rakennuksen E-luvussa. Standardin EN 15978 ja *Greenhouse Gas Protocol* -laskentaohjeen mukaan sen ei myöskään lasketa pienentävän kiinteistön energiankäytön kasvihuonekaasupäästöjä, koska investointi ei korvaa verkkosähkötuotannon investointeja. Omaan käyttöön tuotettu aurinko- ja tuulisähkö sekä aurinkolämpö pienentävät rakennuksen kasvihuonekaasupäästöjä, ostoenergiankulutusta ja E-lukua.

Taloudellisen kannattavuuden näkökulmasta tilanne on yleensä vastaava: omaan käyttöön tuotettu energia korvaa ostoenergiaa, ja lämpö- tai sähköverkkoon viedystä energiasta saatava korvaus on tyypillisesti ostoenergian hintaa pienempi.

Tuuli- ja aurinkoenergiajärjestelmien suunnittelua ohjeistetaan esimerkiksi ohjeessa RIL 265-2014 *Uusiutuvien lähienergioiden käyttö rakennuksessa*.

8.1 AURINKOSÄHKÖ

Aurinkosähköinvestoinnin kannattavuus tulee arvioida hankekohtaisesti. Kannattavuus arvioidaan laskemalla aurinkosähköjärjestelmän tuotto-odotus ja siitä rakennuksessa hyödynnettävä osuus. Investointikustannuksia arvioitaessa on huomioitava myös aurinkopaneelien asennustapa ja tarvittavat tukirakenteet.

Mitä pohjoisempana rakennetaan, sitä vartenotettavammasi vaihtoehdoksi tulee aurinkopaneelien pystysuuntainen sijoittaminen, jossa lumipeite yleensä vältetään. Vuosituotto muodostuu pienemmäksi kuin optimikulmassa, mutta se jakautuu tasaisemmin eri kuukausille.

Aurinkopaneelien luonteva integrointi rakennukseen edellyttää yleensä niiden sijoittamista rakennuksen pääkoordinaatiston suuntaisesti niin katolla kuin seinissäkin. Mikäli eteläsuuntauksesta joudutaan merkittävästi poikkeamaan, aurinkosähköpaneelien tuotto heikkenee aina käytännössä jonkin verran. Pienempi tuotto voidaan kompensoida suuremmalla paneelipinta-alalla, mutta samalla investoinnin kannattavuus heikkenee.

Kun aurinkopaneelit sijoitetaan rakennuksen katolle, talotekniikan tarvitsemat läpiviennit on systemaattisesti sijoitettava siten, etteivät ne varjosta paneelipintaa.

Integroitavien aurinkopaneelituotteiden kannattavuutta parantaa tuotekorvaavuus; toisin sanoen niillä voidaan korvata osa ulko-vaipan verhousteriaaleista (esimerkiksi julkisivuverhouk, aluskatteen päälle asennettava vesikate tai parvekekaide). Integroitavat tuotteet ovat kuitenkin toistaiseksi olleet erikoistuotteita, joiden investointikustannus on tavanomaista aurinkopaneelia selvästi korkeampi.

Koska aurinkosähköjärjestelmien hintakehitys on ollut laskeva ja taloudellinen kannattavuus useassa tarkastelussa hyvä jo tällä hetkellä, aurinkopaneeleille tehtävät tilavaraukset saattavat olla järkeviä, vaikka järjestelmän toteutusta ei sisällytettäisi rakennushankkeeseen.

8.2 AURINKOLÄMPÖ

Aurinkolämpöjärjestelmissä aurinkokeräimet tuottavat lämpöenergiaa vesivaraajaan. Aurinkolämmöllä voidaan Oulun eteläpuolella kattaa enintään puolet omakotitalon käyttöveden lämmityksestä sekä tarvittaessa mukavuuslattialämmitys ja pieni osa tilojen lämmitystarpeesta. Aurinkolämpöjärjestelmä on suunniteltava osana rakennuksen lämmitysjärjestelmää. Sen kannattavuus riippuu olennaisesti muusta lämmöntuottojärjestelmästä sekä varaajamitoituksesta.

Pientalojen aurinkokeräinpinta-alat ovat tyypillisesti pieniä, ja niiden integroiminen on tästä syystä yleensä kaupunkikuvallisesti ongelmattomampaa kuin pinta-alaltaan laajojen aurinkosähköjärjestelmien. Kun aurinkokeräimet sijoitetaan rakennuksen katolle, talotekniikan tarvitsemat läpiviennit on systemaattisesti sijoitettava siten, etteivät ne varjosta keräinten pintaa. Sijoittelussa on huomioitava keräinten korkea pintalämpötila ja käyttäjäturvallisuus.

8.3 PIENTUULIVOIMA

Tuulivoimalle sopivimmat sijoituspaikat löytyvät yleensä rannikolta, saaristosta, vesistöjen ääritä, peltoaukioilta ja kukkuloiden huipulta. Jos voimala on esteen, kuten rakennuksen tai metsän läheisyydessä, voimalan tulisi olla vähintään 7–10 m estettä ylempänä. Rakennuksen katolle sijoitetun voimalan tulee olla vähintään 10 m rakennuksen katon ylimmän kohdan yläpuolella (RIL 265-2014, 62).

Rakennuspaikan soveltuvuutta tuulienergian tuotantoon voidaan luotettavimmin arvioida mittaamalla tuuliolosuhteita rakennuspaikalla, mieluiten kalenterivuoden ympäri. *Tuuliatlas*-tietokannan antamat tiedot kertovat tuuliolosuhteista 50 metrin korkeudella, joka on pientuulivoimaa ajatellen yleensä liian suuri korkeus. Tuulimittauksen kustannukset on syytä sisällyttää investoinnin kannattavuusarviointiin.

Kun tuuliturbiini asennetaan rakennuksen katolle, on huomioitava kiinnityskohtien vaimennus, jotta värähtely ei kulkeudu ääninä talon rakenteisiin (RIL 265-2014, 62).

Aurinkosähköjärjestelmään verrattuna tuuliturbiinin etuna on sähköntuotto myös talvella. Pientuulivoimalalla tuotetun uusiutuvan omavaraissähkön osuus rakennuksen sähköenergiankulutuksesta jää kuitenkin tyypillisesti vähäiseksi. Merkittävä tuulisähkön tuotto edellyttäisi tuulisen rakennuspaikan lisäksi verrattain suurikokoisen turbiinin sijoittamista korkealle. Tämänkaltaisen järjestelmän toteuttaminen asuin ympäristön laatua vaarantamatta on haastavaa.

8.4 PIEN- JA MIKRO-CHP

CHP¹⁶-voimalat tuottavat polttoaineesta yhtäaikaaisesti lämpöä ja sähköä. Polttoaineena voidaan käyttää esimerkiksi kaasua, biomassaa, haketta tai pellettejä. Pien-CHP-laitokset (10-1000kWe) soveltuvat esimerkiksi rakennusryhmän, pienen asuinalueen tai suuren rakennuskokonaisuuden energialähteeksi. Mikro-CHP-laitteet (1-10kWe) soveltuvat esimerkiksi maatiloille ja yksittäisten rakennusten energiantuotantoon. CHP-laitteet tuottavat sähköä ja lämpöä eri suhteissa riippuen käytettävästä tekniikasta.

Pien- ja mikro-CHP-laitteilla tuotettua energiaa ei varsinaisesti lueta uusiutuvaksi omavaraisenergiaksi, vaan esimerkiksi E-lukutarkasteluissa rakennuskohtaista chp-laitetta tarkastellaan kuten kattilalaitosta. Uusiutuvaa energiaa (tyypillisesti puuhake ja pelletit) käyttävän chp-laitteen etuna E-lukutarkastelussa on se, että taserajan sisälle tuotavalle polttoaineelle käytetään pientä energiamuodon kerrointa, mutta laitteen tuottama sähkö korvaa korkean kertoimen omaavaa ostosähköä. Sähkön ja lämmön tuottaminen kiinteistön tai alueen omalla, puupolttoainetta käyttävällä CHP-laitoksella on kiinnostava vaihtoehto silloin, kun

- alueella ei ole kaukolämpöä
- tavoitellaan mahdollisimman vähäpäästöistä energiaratkaisua
- tavoitellaan mahdollisimman suurta energiaomavaraisuutta tai riippumattomuutta lämpö- ja sähköverkosta
- puupolttoainetta on saatavilla helposti ja edullisesti

CHP-laitteen tai -laitoksen sijoittelussa on huomioitava kattilalaitosten palo-osastointivaatimukset sekä CHP-laitteen aiheuttama matalataajuinen ääni.

¹⁶ CHP = *combined heat and power*

Lähteet

STANDARDIT

ANSI/ASHRAE Standard 160-2009. Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings. ISSN 1041-2336.

EN 15978 Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method.

SFS-EN 13187 Vaipan kylmäsiltojen toteaminen. Lämpökamerakuvaus.

SFS-EN 13829 Rakennusten lämpötekniset ominaisuudet. Ilmanpitävyyden määrittäminen.Painekoe.

SFS-EN ISO 10211 Rakenteiden kylmäsilat. Lämpövirrat ja pintalämpötilat. Yksityiskohtaiset laskentamenetelmät.

DIN 4108 (2006) Wärmeschutz in Hochbau

DIN V 4108-6 Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs.

RAKENTAMISMÄÄRÄYKSET JA DIREKTIIVIT

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/31/EU, annettu 19 päivänä toukokuuta 2010, rakennusten energiatehokkuudesta (uudelleenlaadittu). <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:FI:PDF>

Suomen rakentamismääräyskokoelma C4. Lämmöneristys. Ohjeet 2003. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto 2002.

Suomen rakentamismääräyskokoelma D3. Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto, Helsinki 2011.

Suomen rakentamismääräyskokoelma D5. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Ohjeet 2012. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto, Helsinki 2013.

Suomen rakentamismääräyskokoelma. G1. Asuntosuunnittelu. Määräykset ja ohjeet 2005. Ympäristöministeriö.

Valtioneuvoston asetus 9/2013 rakennuksissa käytettävien energiamuotojen kertoimien lukuarvoista. Annettu Helsingissä 10. päivänä tammikuuta 2013. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130009> (viitattu 31.08.2015).

OHJEET

RIL 107-2012 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohje. Suomen Rakennusinsinöörien liitto 2012.

RIL 249-2009 Matalaenergiarakentaminen. Asuinrakennukset. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki 2009.

RIL 250-2011 Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki 2011.

RIL 265-2014 Uusiutuvien lähienergioiden käyttö rakennuksissa. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki 2014.

RIL 255-2014 Rakennusfysiikka 1. Rakennusfysiikkaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki 2014.

RT 14-10850 Rakennuksen lämpökuvaus. Rakenteiden lämpötekniinen toimivuus.

RT 80-10974 Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje.

Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas. Ohje rakennusosien välisten liitosten viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaan. Ympäristöministeriö 27.4.2012

RT 07-10946 Sisäilmaluokitus 2008.

MUUT LÄHTEET

Ahio, Hanna & Korpi, Minna: Ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten toteutus asuinrakennuksissa. Tutkimusraportti 141. Tampereen teknillinen yliopisto 2009. ISSN 1797-9161.

Airaksinen, Miimu & Vuolle, Mika: Heating Energy and Peak-Power Demand in a Standard and Low Energy Building. *Energies* 6/2013. ss. 235–250. 17 s.

Andersson, Albert: Tuulen aiheuttaman ilmanvirtauksen simulointi rakennusfysikaalisen toiminnan analysoinnin ja suunnittelun työkaluna. Diplomityö 14.4.2015, Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, Rakennustekniikan laitos. 86 s. + liitteet 11 s.

Asp, Ari, Sydorov, Yaroslav, Keskikastari, Mikko & Niemelä, Jarmo: Rakennusten sisätiloissa esiintyvien matkapuhelinten kuuluvuus-ongelmien ratkaisuvaihtoehtojen kartoitus. Loppuraportti. Tampereen Teknillinen Yliopisto, Elektroniikan ja Tietoliikennetekniikan laitos 2013. 103 s. + liitteet. http://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/rakentamisen-kehittaminen/matkapuhelinten_kuuluvuusongelmat_raportti.pdf (viitattu 18.8.2015)

Beck, Wouter (toim.), Dolmans, Dick, Dutoo, Gonzague, Hall, Anders & Seppänen, Olli: Aurinkosuojaus. Aurinkosuojauksen suunnittelu kestävän kehityksen mukaisiin rakennuksiin. REHVA ja ES-SO, Bryssel, Belgia, 2011. ISBN 978-952-92-9554-8. 70 s. + liitteet 3 s.

Erat, Bruno, Erkkilä, Vesa, Nyman, Christer, Peippo, Kimmo, Peltola, Seppo & Suokivi, Hannu: Aurinko-opas. Aurinkoenergiaa rakennuksiin. Aurinkoteknillinen yhdistys, 2008. ISBN 978-952-9-2721-1. 196 s. + liitteet 12 s.

Eriksen, Kurt Emil & Rode, Carsten: Active House Specification – evaluation of comfort, energy and environment in buildings. *REHVA Journal*, May 2013, ss. 10–14.

Fi-Cost-optimal-2013. Energiatohokkuutta koskevien vähimmäisvaatimusten kustannusoptimaalisten tasojen laskenta. SUOMI. Rakennusten energiatohokkuusdirektiivin (2010/31/EU) 5 artiklan mukainen ilmoitus Euroopan komissiolle 25.2.2012.

GBC Finland - Rakennusten elinkaarimittarit (2013). Bionova Consulting. Green Building Council Finland, Helsinki 2013.

Hilliaho, Kimmo: Parvekelasituksen energiataloudelliset vaikutukset. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetun ympäristön tiedekunta 2010. 147 s. + liitteet 8 s.

Hänninen, Pekka: Ekologisesti kestävä pientaloasuminen. 13 pientalon vertailu. Ympäristöministeriön raportteja 20/2014. Helsinki 2014. ISBN 978-952-11.4324-3. 36 s. + liitteet 15 s.

Jokisalo, Juha & Kurnitski, Jarek: Simulation of Energy Consumption in Typical Finnish Detached House. Preliminary report. Report B74. Teknillinen korkeakoulu, konetekniikan ostasto, LVI-tekniikan laboratorio, Espoo 2002. ISBN 951-22-6267-3. 51 s.

Jussila, Heikki: Ilmatiiveys ja vuotokohdat uusissa pientaloissa 4/2014. Vertia Oy 11.1.2015. <http://www.vertia.fi/images/raportit/Ilmatiiveys%20ja%20vuotokohdat%20uusissa%20pientaloissa%204-2014.pdf> (viitattu 18.8.2015).

Jylhä, Kirsti, Kalamees, Targo, Tietäväinen, Hanna, Ruosteenoja, Kimmo, Jokisalo, Juha, Hyvönen, Reijo, Ilomets, Simo, Saku, Seppo & Huttila, Asko: Rakennusten energialaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastonmuutoksen vaikutuksista. Ilmatieteen laitos, raportteja 2011:6. Helsinki 2011.

Jääskeläinen, Maija: Hyvin suunniteltu pientalo – Työkalu pientalon suunnitteluun. Oulun rakennusvalvonta 2010.

Kalema, Timo, Pylsy, Petri, Hagengran, Per, Jóhannesson, Gudni, Airaksinen, Miimu, Dokka, Tor Helge, Öberg, Mats, Pöysti, Mikko, Rapp, Kristian & Keski-Opas, Jarmo: Nordic Thermal Mass – Effect on Energy and Indoor Climate. Tampere University of Technology, Institute of Energy and Process Engineering, Report 184, Tampere 2006. 79 s. + liitteet 26 s.

Kouhia, Ilpo & Nieminen, Jyri: IEA5-aurinkotalo. VTT tiedotteita 1828. VTT Rakennustekniikka, Espoo 1997. ISBN 951-38-5104-4. 26 s. + liitteet 5 s.

Kouhia, Ilpo, Nieminen, Jyri & Holopainen, Riikka: Paroc-passiivitalo – kylmän ilmaston energiaratkaisu. Espoo 2013. VTT Technology 78. 57 s. ISBN 978-951-38-7915-0.

Kuismanen, Kimmo: Climate-conscious architecture – Design and wind testing method for climates in change. Acta Universitatis Ouluensis C Technica 307. Oulun yliopisto, Oulu 2008. ISBN 978-951-42-8911-8. 404 s. + liitteet 38 s.

Kurvinen, Antti & Heljo, Juhani: Energiansäästötoimenpiteiden kannattavuusmalli. Tampereen teknillinen yliopisto 2011.

Köymäri, Mira: Minimim maksimointi. Muuntojousto energiatehokkaan suunnittelun avaintekijänä. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Taiteiden ja suunnittelun korkeakoulu, Arkkitehtuurin laitos, 2015. 109 s. + liitteet 20 s.

Lahdensivu, Jukka, Suonketo, Jommi, Vinha, Juha, Lindberg, Ralf, Manelius, Elina, Kuhno, Vesa, Saastamoinen, Kari, Salminen, Kati & Lähdesmäki, Kimmo: Matalaenergia- ja passiivitalojen rakenteiden ja liitosten suunnittelu- ja toteutusohjeita. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka. Tutkimusraportti 160, Tampere 2012. ISBN 978-952-15-2951-1. 121 s. + liitteet 1 s.

Lappalainen, Markku: Energia- ja ekologiakäsikirja. Suunnittelu ja rakentaminen. Helsinki 2010. ISBN 978-951-682-945-9. 198 s. + liitteet 2 s.

Laukkarinen, Anssi: Ryömintätilaisten alapohjien toiminta. FRAME -projektin päätösseminaari, Tampere 8.1.2012.

Leppänen, Pekka: Säästävä pientalo. Rannanpeltotalon mittaustulokset ja kokemukset 1997–2004. Helsinki 2004. ISBN 951-682-765-9.

Lisälämmöneristysten elinkaarikustannuslaskenta. Insinööri-toimisto Vesitaito Oy 2015.

Lylykangas, Kimmo, Andersson, Albert, Bjørge, Eilif, Juhonen, Eero, Hakanen, Erkki, Kiuru, Jari, Kuismanen, Kimmo, Kuismanen, Marita, Mäki-Pollari, Seppo, Nieminen, Jyri, Pentikäinen, Juha, Päättalo, Juha, Sipilä, Markus, Sormunen, Piia ja Stammeier, Hanna: Vantaan lähes nollaenergiapäiväkotikonsepti. Raportti ver 1.1 14.10.2014. 69 s. + liitteet 82 s.

Lylykangas, Kimmo, Jodat, Timo, Juntunen, Mikko, Kiuru, Jari, Karjalainen, Erkki, Päättalo, Juha & Vuolle, Mika: Aktiivisen ja passiivisen aurinkoenergian huomioon ottaminen asemakaavoitus- ja rakennussuunnitteluvaiheissa Oulun kaupungin alueella, selvitys. Oulun rakennusvalvonta, Oulu 2014. 87 s.

Lylykangas, Kimmo, Jodat, Timo, Juntunen, Mikko, Kiuru, Jari, Karjalainen, Erkki, Päättalo, Juha & Vuolle, Mika: Aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen, ohje. Oulun rakennusvalvonta, Oulu 2014. 87 s.

Matkapuhelimien kuuluvuus sisätiloissa – Energiatehokas uudis- ja korjausrakentaminen. Suunnitteluohje ver 1.0 1.10.2013. RT Rakennusteollisuus.

Matkaviestinverkon kuuluvuusongelmat matalaenergiarakennuksissa. Työryhmän raportti. Liikenne- ja viestintäministeriö, Julkaisu 26/2013. http://www.lvm.fi/docs/fi/2497123_DLFE-21835.pdf http://www.lvm.fi/docs/fi/2497123_DLFE-21835.pdf (viitattu 18.8.2015).

Moisio, Malin: Arkkitehtuurin vaikutus pientalon energiatehokkuuteen, Talo Saunaranta ja 47 variaatiota. Diplomityö 3.3.2010. Tampereen Teknillinen Yliopisto, Rakennetun ympäristön tiedekunta, Arkkitehtuurin laitos. Tampere 2010.

- Mäkitalo, Mikael: Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto 2012. 134 s. + liitteet 38 s.
- Niemelä, Jarno, Asp, Ari & Sydorov, Yaroslav: Radiosignaalin vaimennusmittauksia nykyaikaisissa asuintaloissa. Loppuraportti. Tampereen teknillinen yliopisto. Tietoliikennetekniikan laitos. Tutkimusraportti 2012: 1. ISBN 978-952-15-2885-9. 36 s. + liitteet 25 s.
- Nieminen, Jyri, Andersson, Albert, Bjørge, Eilif, Juhonen, Eero, Hakanen, Erkki, Kiuru, Jari, Kuismanen, Kimmo, Kuismanen, Marita, Lylykangas, Kimmo, Mäki-Pollari, Seppo, Pentikäinen, Juha, Päätaalo, Juha, Sipilä, Markus, Sormunen, Piia & Stammeier, Hanna: Lähes nollaenergiapäiväkodin elinkaarikustannukset. Raportti ver 1.0 01.11.2014. Vantaan kaupunki 2014.
- Paloniitty, Sauli: Rakennusten tiiviysmittaus. Luentoaineisto.
<http://paloniitty.fi/files/TIIVIYSMITTAUS%201h%20luento.pdf> (viitattu 18.8.2015)
- Rakenteellisen energiatehokkuuden passiivitaso malliratkaisut 2012. Rakennusteollisuus ja ympäristöministeriö, 2012 (kirjoittajan hallussa).
- Romppainen, Ilkka: Lämmin Puutalo. Ohjeet ilmanpitävään ja energiaa säästävään rakentamiseen. Rakennustieto Oy, Helsinki 2010. ISBN 978-951-682-953-4. 68 s.
- Rongen, Ludwig: Very Small Passive Houses. In Conference Proceedings. 12th International Conference on Passive Houses 2008. 11.–12. April 2008 Nuremberg. Darmstadt, Saksa 2008. ss. 411–416.
- Saari, Mikko, Kukkonen, Petri, Ruotsalainen, Risto & Nyman, Mikko: Tasauskalkulaatio 2012. Rakennuksen lämpöhäviön määräysten mukaisuuden osoittaminen. 24.11.2011. 30 s. + liitteet 61 s.
- Salonen, Teemu & Ryyänen, Joonas: Lisäeristämisen elinkaarikustannukset asuinkerrostalossa. RTT Eristeollisuus, Optiplan Oy 13.2.2015 (kirjoittajan hallussa).
<http://www.ym.fi/download/noname/%7B4A826B40-9B82-4749-B6BA-7A3537EA9DAE%7D/40514> (viitattu 18.8.2015).
- Shemeikka, Jari, Lylykangas, Kimmo, Ketomäki, Jaakko, Heimonen, Ismo, Pulakka, Sakari & Pylsy, Petri: SunZEB – Plusenergiaa kaupungissa. Uusiutuva energia asumiseen ja toimistoon. VTT Technology 219, Espoo 2015. 86 s. + liitteet 14 s.
- Thalfeldt, Martin, Pikas, Ergo, Kurnitski, Jarek & Voll, Hendrik: Facade design principles for nearly zero energy buildings in a cold climate. Energy and Buildings, vol. 67, 2013. ss. 309–321.
- Toimivat katot 2013. Kattoliitto ry, Helsinki 2013. ISBN 978-952-269-092-0 (pdf).
- Tuominen, Pekka, Holopainen, Riikka, Eskola, Lari, Jokisalo, Juha & Airaksinen, Miimu: Calculation method and tool for assessing energy consumption in the building stock. Building and Environment 75 (2014), 153–160. Viitanen, Hannu & Ojanen, Tuomo: Improved Model to Predict Mold Growth in Building Materials, ASHRAE Buildings X, 1–8, 2007.
- Vikberg, Hanna: Valoisa asunto. Luonnonvalon hyödyntäminen suomalaisissa kerrostaloasunnoissa. Diplomityö 26.8.2014, Aalto-yliopisto, Arkkitehtuurin laitos, Espoo 2014. 120 s. + liitteet 2 s.
- Vinha, Juha: Frame-projekti päättyy – mitä opittiin? Luentoaineisto. Betonipäivät 2012, Porvoo 27.11.2012.
- Vinha, Juha, Laukkarinen, Anssi, Mäkitalo, Mikael, Nurmi, Sakari, Huttunen, Petteri, Pakkanen, Tomi, Kero, Paavo, Manelius, Elina, Lahdensivu, Jukka, Köliö, Arto, Lähdesmäki, Kimmo, Piironen, Jarkko, Kuhno, Vesa, Pirinen, Matti, Aaltonen, Anu, Suonketo, Jommi, Jokisalo, Juha, Teriö, Olli, Koskenvesa, Anssi & Palolahti, Tuomas: Ilmastomuutoksen ja lämmöneristykseen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Tampere 2013. ISBN 978-952-15-2949-8. 354 s. + liitteet 43 s.

Vuoden 2015 laskelmissa käytettäväksi tarkoitettu korkokustannus. Valtionkonttori 16.1.2015.

INTERNET -SIVUSTOT

<http://activehouse.info/about-active-house/specification/10-comfort/11-daylight>

<http://figbc.fi/elinkaarimittarit/laskentaohjeet/>

<http://figbc.fi/haaste2013/voittajat>

<http://ilmatieteenlaitos.fi/Rakennusfysiikan-testivuodet-tulevaisuuden-ilmastossa>

<http://www.ym.fi/lahesnollaenergiarakentaminen>

KUVALÄHTEET

kansi: Jari Kiuru 2015.

1 Kioton kolmio. Uudelleen piirtänyt Jari Kiuru 2015.

2 Kimmo Lylykangas.

3 Kimmo Lylykangas. Laadittu alunperin passiivitalon suunnitteluohjeistusta varten Suomen Asuntomessut OSK:n Casa Humana –apurahalla ja julkaistu sivustolla www.passiivi.info.

4 Arkkitehtuuritoimisto Kimmo Lylykangas Oy.

5 Suuntauksen vaikutus tilojen lämmitysenergiantarpeeseen tavanomaisessa omakotitalossa. Lylykangas et al: Aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen. Ohje. Oulun rakennusvalvontavirasto 2014. Energiasimulaatio Erkki Karjalainen, Equa Simulation Finland Oy.

6 Tuulisimulaatio COMSOL Multiphysics -ohjelmistolla, Albert Andersson, Sweco Rakennetekniikka Oy. Tuulisuus pääilmansuunnittain mitoitustuulennopeudella 5,89 m/s. Vantaan Leinelän II päiväkodin esisuunnitelma Lylykangas, Kimmo, Andersson, Albert, Bjarne, Eilif, Juhonen, Eero, Hakanen, Erkki, Kiuru, Jari, Kuismanen, Kimmo, Kuismanen, Marita, Mäki-Pollari, Seppo, Nieminen, Jyri, Pentikäinen, Juha, Päätaalo, Juha, Sipilä, Markus, Sormunen, Piia ja Stammeier, Hanna: Vantaan lähes nollaenergiapäiväkotikonsepti. Raportti ver 1.1 14.10.2014, liite 5b.

7 Muotokertoimet A/V ja A/A. Arkkitehtuuritoimisto Kimmo Lylykangas 2009.

8 Painotettu muotokerroin. Arkkitehtuuritoimisto Kimmo Lylykangas Oy 2014.

9 Kimmo Lylykangas.

10 Kimmo Lylykangas, Velux Daylight Visualizer.

11 Kimmo Lylykangas 2015.

- 12 Kimmo Lylykangas. Mitoitusohje on esitetty mm. julkaisussa Lappalainen, Markku: Energia- ja ekologiakäsikirja. Suunnittelu ja rakentaminen. Helsinki 2010.
- 13 Lylykangas, Kimmo, Jodat, Timo, Juntunen, Mikko, Kiuru, Jari, Karjalainen, Erkki, Päätaalo, Juha & Vuolle, Mika: Aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen, ohje. Oulun rakennusvalvonta, Oulu 2014.
- 14 Arkkitehtuuritoimisto Kimmo Lylykangas Oy 2014 ja 2015.
- 15 Lylykangas, Kimmo, Jodat, Timo, Juntunen, Mikko, Kiuru, Jari, Karjalainen, Erkki, Päätaalo, Juha & Vuolle, Mika: Aktiivisen ja passiivisen aurinkoenergian huomioon ottaminen asemakaavoitus- ja rakennussuunnitteluvaiheissa Oulun kaupungin alueella, selvitys. Oulun rakennusvalvonta, Oulu 2014. Energialaskenta Erkki Karjalainen, Equa Simulation Finland Oy.
- 16 Lylykangas, Kimmo, Jodat, Timo, Juntunen, Mikko, Kiuru, Jari, Karjalainen, Erkki, Päätaalo, Juha & Vuolle, Mika: Aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen, ohje. Oulun rakennusvalvonta, Oulu 2014.
- 17 Arkkitehtuuritoimisto Kimmo Lylykangas Oy 2015.
- 18 Arkkitehtuuritoimisto Kimmo Lylykangas Oy 2015.
- 19 Simulointitulos. Equa Simulation Finland Oy 2015.
- 20 Simulointitulos. Equa Simulation Finland Oy 2015.
- 21 Kiinteistö Oy Ouluntarve, TA-Asunnot 2015. Valokuva: Kimmo Lylykangas 2015.
- 22 Lahden vanhusten asuntosäätiön Onnelanpolun palvelutalo. Valokuva: Kimmo Lylykangas 2015.
- 23 Aurinkokaavio. Piirtänyt Arkkitehtuuritoimisto Kimmo Lylykangas Oy 2014, alkuperäinen kaavio www.gaisma.com ja Bilaga 2 till Bygghälsöns T-skript T37-1976. Julkaistu aiemmin raportissa Shemeikka, Jari, Lylykangas, Kimmo, Ketomäki, Jaakko, Heimonen, Ismo, Pulakka, Sakari & Pylsy, Petri: SunZEB – Plusenergiaa kaupungissa. Uusiutuva energia asumiseen ja toimistoon. VTT Technology 219, Espoo 2015.
- 24 Tuominen, Pekka, Holopainen, Riikka, Eskola, Lari, Jokisalo, Juha & Airaksinen, Miimu: Calculation method and tool for assessing energy consumption in the building stock. Building and Environment 75 (2014), 158 (Fig 5).
- 25 Kimmo Lylykangas 2015, lähteet: www.motiva.fi ja ikkunavalmistajat.
- 26 Seinäelementti Paroc Lupaus –passiivitaloon, Fennotalo Oy. Valokuva: Kimmo Lylykangas 2008.
- 27 Lämpökatko Smartwin-ikkunan profiilissa. Kuva: Franz Freundorfer. Kuva ja tekijänoikeus: Pro Passivhausfenster.
- 28 Lämpökatko Variotec Oy:n ikkunaprofiilissa. Kuva: Kimmo Lylykangas.
- 29 Arkkitehtuuritoimisto Kimmo Lylykangas Oy 2015.
- 30-39 Juha Päätaalo.
- 40 Tiiveysmittausluokitus.
- 41 Oulun rakennusvalvonta. <http://www.ouka.fi/documents/486338/cf1a5e4e-c312-4491-9c4d-9ff10e650e9c>.
- 42 Viitanen, Hannu & Ojanen, Tuomo: Improved Model to Predict Mold Growth in Building Materials, ASHRAE Buildings X, 1–8, 2007.
- 43 Sweco Rakennetekniikka Oy

44 ASHRAE Standard 160-2009.

45 Mäkitalo, Mikael: Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto 2012.

46 Mäkitalo, Mikael: Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto 2012.

47 RIL 107-2012.

48 Sweco Rakennetekniikka Oy.

49 Sweco Rakennetekniikka Oy.

50 Leinelän II päiväkot, Vantaa, esisuunnitteluvaiheen ehdotussuunnitelma 2014. Arkkitehtuuritoimisto Kimmo Lylykangas Oy. Julkaistu raportissa Lylykangas, Kimmo, Andersson, Albert, Bjørge, Eilif, Juhonen, Eero, Hakanen, Erkki, Kiuru, Jari, Kuismanen, Kimmo, Kuismanen, Marita, Mäki-Pollari, Seppo, Nieminen, Jyri, Pentikäinen, Juha, Päätaalo, Juha, Sipilä, Markus, Sormunen, Piia ja Stammeier, Hanna: Vantaan lähes nollaenergiapäiväkotikonsepti. Raportti ver 1.1 14.10.2014.

51 Nieminen, Jyri, Andersson, Albert, Bjørge, Eilif, Juhonen, Eero, Hakanen, Erkki, Kiuru, Jari, Kuismanen, Kimmo, Kuismanen, Marita, Lylykangas, Kimmo, Mäki-Pollari, Seppo, Pentikäinen, Juha, Päätaalo, Juha, Sipilä, Markus, Sormunen, Piia & Stammeier, Hanna: Lähes nollaenergiapäiväkodin elinkaarikustannukset. Raportti ver 1.0 01.11.2014. Vantaan kaupunki 2014, 6.

TAULUKOT, LÄHTEET

1 Lylykangas, Kimmo: Multi-Comfort House – an example of the building concept for sustainability. Conference Proceedings. International ECCE Conference EUROINFRA 2009, Current State and Challenges for Sustainable Development of Infrastructure, 15–16 October 2009, Helsinki, 33–34.

2 Kuismanen, Kimmo: Climate-conscious architecture – Design and wind testing method for climates in change. Acta Universitatis Ouluensis C Technica 307. ISBN 978-951-42-8911-8. Oulun yliopisto, Oulu 2008, 260. Suomentanut Kimmo Kuismanen 2014. Suomen-nettu taulukko on julkaistu raportissa Lylykangas, Kimmo, Andersson, Albert, Bjørge, Eilif, Juhonen, Eero, Hakanen, Erkki, Kiuru, Jari, Kuismanen, Kimmo, Kuismanen, Marita, Mäki-Pollari, Seppo, Nieminen, Jyri, Pentikäinen, Juha, Päätaalo, Juha, Sipilä, Markus, Sormunen, Piia ja Stammeier, Hanna: Vantaan lähes nollaenergiapäiväkotikonsepti. Raportti ver 1.1 14.10.2014, liite 5a, s. 7 (taulukko II).

3 Lylykangas, Kimmo, Jodat, Timo, Juntunen, Mikko, Kiuru, Jari, Karjalainen, Erkki, Päätaalo, Juha & Vuolle, Mika: Aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen, ohje. Oulun rakennusvalvonta, Oulu 2014. Dynaaminen energiasimulaatio: Erkki Karjalainen, Equa Simulation Finland Oy.

4 Lylykangas, Kimmo, Jodat, Timo, Juntunen, Mikko, Kiuru, Jari, Karjalainen, Erkki, Päätaalo, Juha & Vuolle, Mika: Aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen, ohje. Oulun rakennusvalvonta, Oulu 2014. MEK-ikkunoiden U- ja g-arvot: www.motiva.fi/energialuokitellut_ikkunat, dk-ikkunat: valmistajien ilmoittamat g- ja U-arvot.

5 Lähtötiedot koonnut ja asettanut Kimmo Lylykangas. Lähteet: tuotevalmistajat ja Pilkington Lasifakta 2012.

6 Kimmo Lylykangas. Suositustason U-arvot on asettanut RTT eristeteollisuus. Energiatohokkaat rakennukset – rivin arvot perustuvat taulukkoon 7, jonka on koonnut Kimmo Lylykangas 2015.

7 Erkki Karjalainen, Equa Simulation Finland Oy.

8 Erkki Karjalainen, Equa Simulation Finland Oy.

9 Koonnut Kimmo Lylykangas 2015.

10 Alkuperäislähde Thalfeldt, Martin, Pikas, Ergo, Kurnitski, Jarek & Voll, Hendrik: Facade design principles for nearly zero energy buildings in a cold climate. Energy and Buildings, vol. 67, 2013. ss. 309–321. Muokannut Kimmo Lylykangas 2014. Muokattu versio julkaistu raportissa Shemeikka, Jari, Lylykangas, Kimmo, Ketomäki, Jaakko, Heimonen, Ismo, Pulakka, Sakari & Pylsy, Petri: SunZEB – Plusenergiaa kaupungissa. Uusiutuvaa energiaa asumiseen ja toimistoon. VTT Technology 219, Espoo 2015.

11 Juha Päätaalo 2015.

12 Juha Päätaalo 2014.

13 Viitanen, Hannu & Ojanen, Tuomo: Improved Model to Predict Mold Growth in Building Materials, ASHRAE Buildings X, 1–8, 2007.

14 Viitanen, Hannu & Ojanen, Tuomo: Improved Model to Predict Mold Growth in Building Materials, ASHRAE Buildings X, 1–8, 2007.

15 Jyri Nieminen ja Albert Andersson, Sweco Rakennetekniikka Oy.

16 Jyri Nieminen ja Albert Andersson, Sweco Rakennetekniikka Oy.

17 Mäkitalo, Mikael: Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto 2012. Ilmatieteen laitos.

18 Kouhia, Ilpo, Nieminen, Jyri & Holopainen, Riikka: Paroc-passiivitalo – kylmän ilmaston energiaratkaisu. Espoo 2013. VTT Technology 78.

19 Kouhia, Ilpo, Nieminen, Jyri & Holopainen, Riikka: Paroc-passiivitalo – kylmän ilmaston energiaratkaisu. Espoo 2013. VTT Technology 78.

20 Kouhia, Ilpo, Nieminen, Jyri & Holopainen, Riikka: Paroc-passiivitalo – kylmän ilmaston energiaratkaisu. Espoo 2013. VTT Technology 78.

21 Kouhia, Ilpo, Nieminen, Jyri & Holopainen, Riikka: Paroc-passiivitalo – kylmän ilmaston energiaratkaisu. Espoo 2013. VTT Technology 78.

Käsitteitä

Active house	viittaa joko saman nimiseen rakennuskonseptiin tai sen taustalla olevaan, voittoatavoittelemattomaan Active House alliance -verkostoon, jonka jäseninä on yrityksiä ja tutkimuslaitoksia. Rakennuskonseptina Active House asettaa kriteereitä ensisijaisesti asuinrakennusten sisäolosuhteille, energiankulutukselle ja rakennuksen ympäristöominaisuuksille. (http://www.eusew.eu/upload/events/2019_7055_10-14_active_house_specification_rj1303_web.pdf)
Ilmanpitävyys	Ilmanpitävyydellä tarkoitetaan rakennuksen vaipan tiiviyyttä eli kykyä estää ilmapvirtausten pääsy rakenteen läpi. Ilmanpitävyys voidaan varmistaa yhtenäisellä ilmansulkukerroksella.
Ilmansulku	Rakennusosassa oleva ainekerros, joka estää haitallisen ilmapvirtauksen rakennusosan läpi puolelta toiselle. (SRakMK C4)
Ilmavuotoluku	Ilmavuotoluku n_{50} (1/h) kertoo montako kertaa rakennuksen ilmatilavuus vaihtuu tunnissa rakennusvaipan vuotoreittien kautta, kun rakennukseen aiheutetaan 50 Pascalin ali- tai ylipaine. Ilmavuotoluku kuvaa rakennusvaipan ilmanpitävyyttä. Mitä pienempi tämä luku on, sitä tiiviimpi rakennus on. Ilmavuotoluku q_{50} (m ³ /hm ²) kuvaa ilmanpitävyyden ulkovaipan pinta-alaa kohti.
Kylmäsilta	Rakennusosassa oleva, viereisiin aineisiin verrattuna hyvin lämpöä johtavasta aineesta tehty rakenneos, jonka kohdalla lämpötilaeron vaikutuksesta rakennusosan pintojen läpi kulkevan lämpövirran tiheys on jatkuvuustilassa viereiseen alueeseen verrattuna suurempi. (SRakMK C4) Pistemäinen kylmäsilta Kylmäsilta, joka on rakenteessa paikallinen ja jolla ei ole rakenteen pinnan suunnassa jatkuvaa samanlaisena pysyvää poikkileikkausta. (SRakMK C4) Viivamainen kylmäsilta Kylmäsilta, jonka poikkileikkaus on rakenteen pinnan suuntaan jatkuvana samanlainen. (SRakMK C4)
Lämmöneriste	Rakennusaine, jota käytetään pääasiallisesti tai muun käyttötarkoituksen ohella olennaisesti lämmöneristämiseen. (SRakMK C4)
Lämmöneristys	Yhdestä tai useammasta lämmöneristeestä rakennusosaan tehty eristekokonaisuus. (SRakMK C4)
Lämmönjohtavuus	(λ), W/(m x K) Lämmönjohtavuus ilmoittaa lämpövirran tiheyden jatkuvuustilassa pituusyksikön paksuisen tasa-aineisen ainekerroksen läpi, kun lämpötilaero ainekerroksen pintojen välillä on yksikön suuruinen. (SRakMK C4) Keskimääräinen lämmönjohtavuus (λ_{10}), W/(m x K) Keskimääräinen lämmönjohtavuus ilmoittaa aineen lämmönjohtavuuden yksittäisten mittaustulosten aritmeettisen keskiarvon, kun mittaukset on suoritettu 10°C keskilämpötilassa. (SRakMK C4)
Lämmönläpäisykerroin	(U), W/(m ² x K) Lämmönläpäisykerroin ilmoittaa lämpövirran tiheyden, joka jatkuvuustilassa läpäisee rakennusosan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla olevien ympäristöjen välillä on yksikön suuruinen. (SRakMK C4)
Lämmönvastus	(R), (m ² x K)/W Termisessä jatkuvuustilassa olevan tasapaksun ainekerroksen tai kerroksellisen rakenteen lämmönvastus ilmoittaa rakenteen eri puolilla olevien isotermisten pintojen lämpötilaeron ja ainekerroksen läpi kulkevan lämpövirran tiheyden suhteen. (SRakMK C4)
Normaalinen lämmönjohtavuus	(λ_n), W/(m x K) Rakennusaineen normaalilla lämmönjohtavuudella tarkoitetaan rakentamismääräyskokoelmassa tai tyyppihyväksyntäpäätöksissä annettua lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoa käytännön rakennustoiminnan laskelmia varten. (SRakMK C4)

<i>Passiivitalo</i>	on vapaaehtoisesti asetettava energiatehokkuustavoite, jossa suunnittelua ohjaa erityisesti tilojen lämmitystarpeen tai –tehon vähentäminen. Passiivitalo käsittää kolme pääkriteeriä: 1) tilojen lämmitysenergiantarve (tai lämmitysteho) 2) rakennuksen kokonaisprimäärienergiankulutus ja 3) rakennuksen ulkovaipan ilmastovirtaus n_{50}. <i>Kansainvälinen passiivitalomääritelmä</i> on saksalaisen Passivhaus Institutin määrittelemä. Siinä tilojen lämmitysenergiantarve, lämmitysteho ja kokonaisprimäärienergiankulutus jaetaan pinta-alalla (treated floor area), joka vastaa pääpiirteisesti huonealojen summaa. Lisäksi tarkastellaan kesäaikaista yllälämpenemistä. Tunnuslukujen laskennassa on aina käytettävä erityisesti passiivitalojen energialaskentaan kehitettyä PHPP-ohjelmaa ja Passivhaus Institutin määrittelemiä primäärienergiakertoimia, jotka eivät vastaa Suomessa käytettyjä kertoimia. Laskentatavan vakioinnilla saavutetaan hyvä tulosten vertailtavuus ja estetään tuloksen manipulointi. Vuonna 2015 lanseerattiin uudet tavoitetasot Passivhaus Classic, Plus ja Premium. Kahdessa viimeksimainitussa on kriteerinä myös uusiutuvan omavaraisenergian tuotanto. <i>Suomalainen passiivitalomääritelmä</i> viittaa yleisimmin VTT:n tutkijoiden ehdottamin energiatehokkuustavoitteisiin, joissa vuotuinen tilojen lämmitysenergiantarve ja E-lukulaskennan kertoimilla painotettu laskennallinen kokonaisenergiankulutus lasketaan bruttoneliömetriä kohden. Suomalaismääritelmä jakaa maan pohjois-eteläsuunnassa kolmeen ilmastovyöhykkeeseen, joissa kriteerit ovat erilaiset. Laskentatyökalu on vapaasti valittavissa. Suomalainen passiivitalomääritelmä on osoittautunut käyttökelpoiseksi energiatehokkuustavoitteeksi jo kymmenissä rakennushankkeissa.
<i>Pistemäinen lisäkonduktanssi</i>	(X), W/K Pistemäinen lisäkonduktanssi ilmoittaa pistemäisestä kylmäsilasta (esim.terässide) aiheutuvan lisäyksen jatkuvuustilassa rakennusosan läpi kulkevaan lämpövirtaan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla olevien ympäristöjen välillä on yksikön suuruinen. (SRakMK C4)
<i>Päivänvalonsuhde</i>	(daylight factor, DF) on huoneen valaistusvoimakkuuden suhde ulkotilan valaistusvoimakkuuteen.
<i>Sisä- ja ulkopuolinen pintavastus</i>	(R _{si} ja R _{se}), (m ² x K)/W Ilmoittaa rakennusosan pinnan ja sisä- tai ulkopuolisen ympäristön välisen rajakerroksen lämmönvastuksen. (SRakMK C4)
<i>Sisäinen tiiviys</i>	Rakennuksen sisäisten (huoneistojen välisten) rakenteiden kyky estää ilmavirtausten pääsy tilasta toiseen.
<i>Suuniteltu käyttöikä</i>	on ajanjakso, jolloin rakennetta tai sen osaa on määrä käyttää aiottuun tarkoitukseensa ennakoiduin kunnossapitotoimenpitein, mutta ilman, että olennaiset korjaukset ovat välttämättömiä. Rakennuskohteen suunniteltu käyttöikä määritellään hankekohtaisesti. (EN 1990)
<i>Tuulensuoja</i>	Rakennusosassa oleva ainekerros, jonka pääasiallinen tehtävä on estää haitallinen ilmavirtaus ulkopuolelta sisäpuoliseen rakenteen osaan ja takaisin. (SRakMK C4)
<i>Viivamainen lisäkonduktanssi</i>	(Ψ), W/(m x K) Viivamainen lisäkonduktanssi ilmoittaa rakennusosassa olevan, pituusyksikön mittaisen viivamaisen kylmäsilan (esim. palkki) aiheuttaman lisäyksen jatkuvuustilassa rakennusosan läpi kulkevaan lämpövirtaan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla olevien ympäristöjen välillä on yksikön suuruinen. (SRakMK C4)

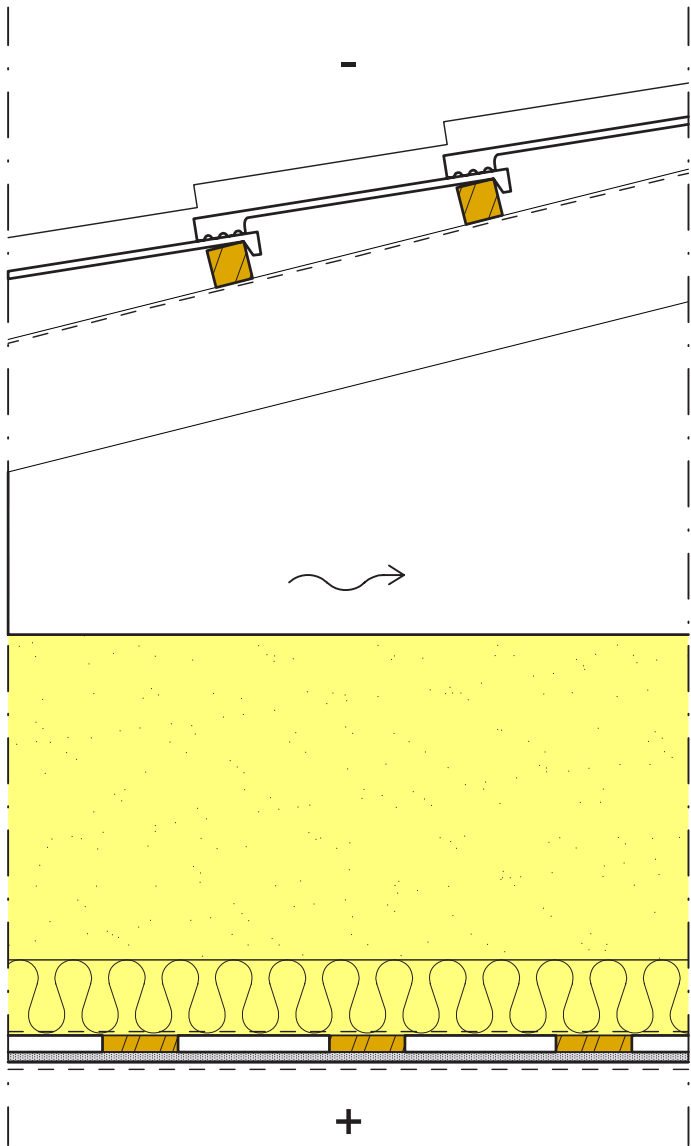
Liitteet

- LIITE 1: Oppaassa tarkastellut rakennetyypit.
- LIITE 2: Kosteusteknisen toimivuuden tarkastelut, yläpohjarakenteet.
- LIITE 3: Kosteusteknisen toimivuuden tarkastelut, ulkoseinärakenteet.
- LIITE 4: Kosteusteknisen toimivuuden tarkastelut, alapohjarakenteet.
- LIITE 5: Vantaa 2007 ja Vantaa 2030 säätiedot.

YP1

Jyrkkä katto, ristikkorakenne Lämmöneriste mineraalivilla

U=0,07 W/m²K



Vesikate, RIL 107-2012 -ohjeen ja kattoliiton Toimivat katot -ohjeen mukaisesti

Aluskate

Vesikaton kantava rakenne, rakennesuunnitelmien mukaan

Tuulettuva ullakko

Lämmöneriste, puhallusmineraalivilla $\lambda_U=0,041$ W/mK

430

Lämmöneriste, mineraalivilla $\lambda_U=0,036$ W/mK

100

Kantava rakenne, rakennesuunnitelmien mukaan

Ilman- ja höyrynsulku, kosteissa tiloissa aina höyrynsulku

Harvalaudoitus 22x100 mm k300

22

Rakennuslevy, kipsilevy

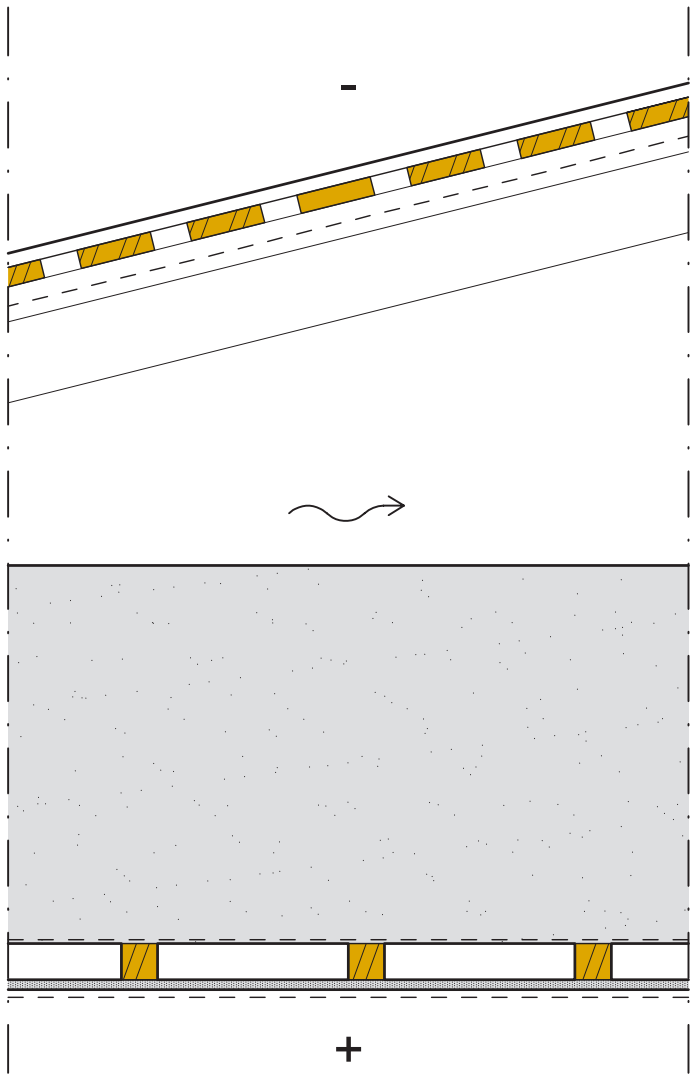
13

Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti

YP2

Jyrkkä katto, ristikkorakenne Lämmöneriste puukuitueriste

U=0,07 W/m²K

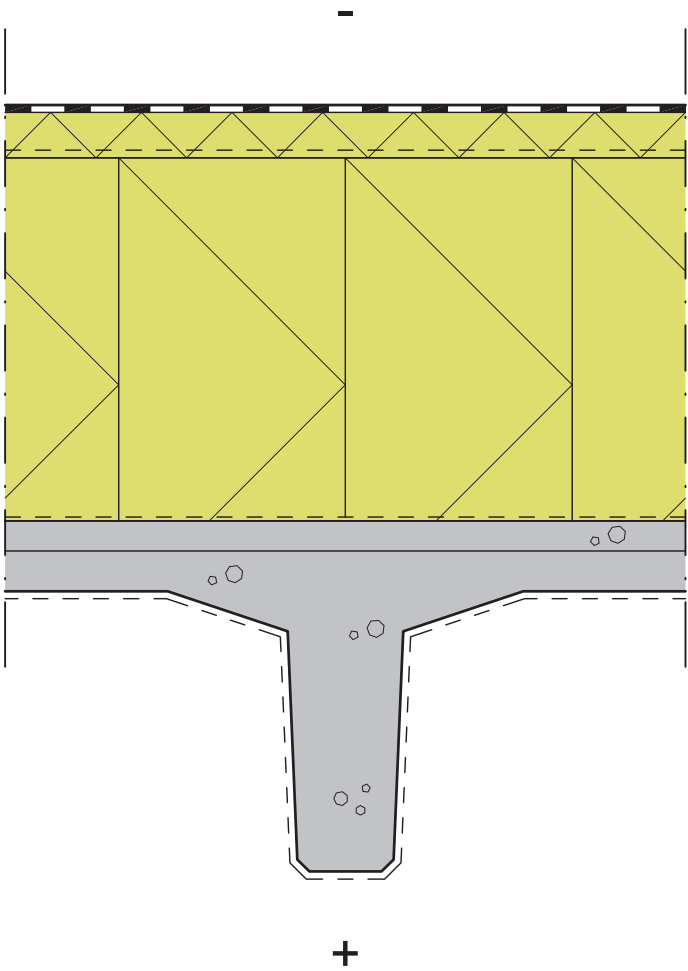


Vesikate, RIL 107-2012 -ohjeen ja kattoliiton Toimivat katot -ohjeen mukaisesti	
Harvalaudoitus 100x25, k-jako katevalmistajan ohjeen mukaan	25
Rima 25x50 k900	25
Aluskate	
Rima 20x45 k900, räystäällä umpiponttilaudoitus UTV 20x120 mm	20
Kattoristikot k900, kattoristikoiden välissä:	
- tuuletusväli > 100 mm	
- lämmöneriste puukuitu $\lambda_U=0,039$ W/mK	600
Ilmansulkukangas, limitys 200 mm, kaikki saumat teipataan	0,2
Koolaus 48x48 mm k300	48
Sisäverhouslevy, kiinnitys valmistajan ohjeen mukaan, ei lävistyksiä	13
Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti	

YP3

Loiva katto, TT-laattarakenne
Lämmöneriste mineraalivilla

U=0,07 W/m²K

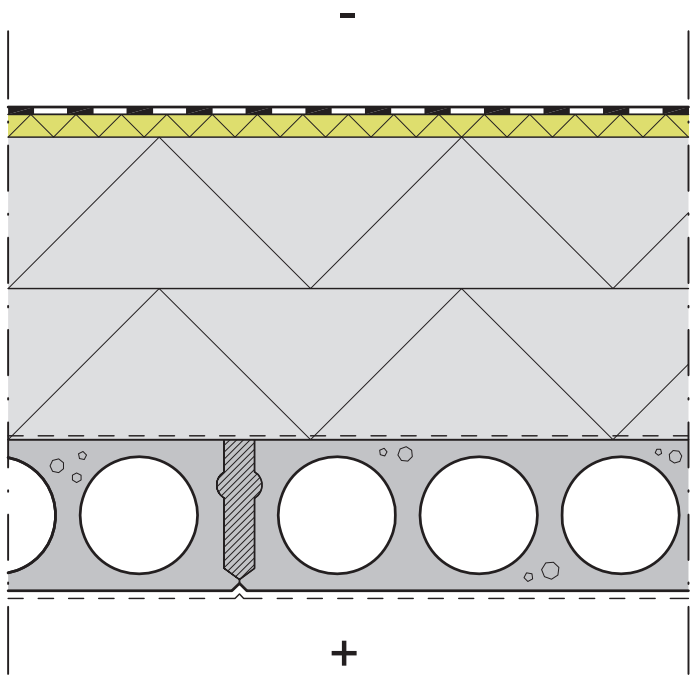


- Vesikate, PVC- tai bitumikermikate RIL 107-2012 -ohjeen ja kattoliiton Toimivat katot -ohjeen mukaisesti
- Lämmöneriste, mineraalivilla uritettu $\lambda_U=0,037$ W/mK 60
- kiinnitys mekaanisesti betonialustaan
- Lämmöneriste, mineraalivilla $\lambda_U=0,039$ W/mK 480
- Höyrynsulku
- Tasausbetoni
- Kantava rakenne, TT-laatta rakennesuunnitelman mukaan
- Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti

YP4

Loiva katto, ontelolaattarakenne
Lämmöneriste harmaa EPS

U=0,07 W/m²K

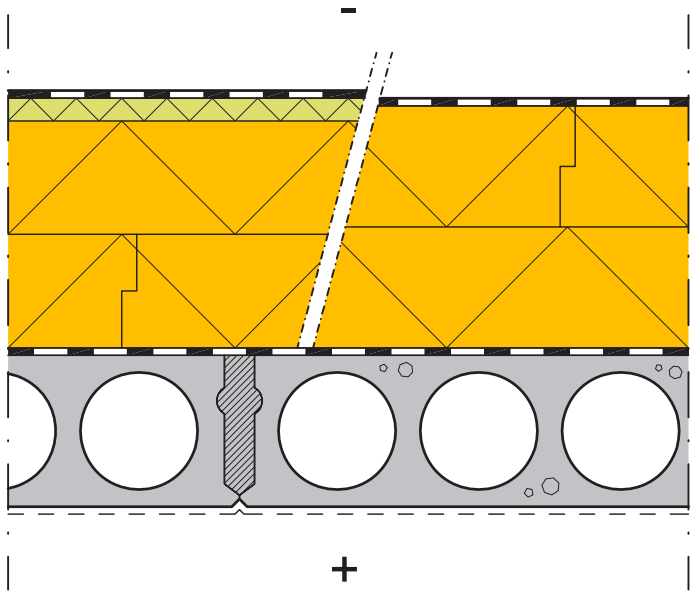


- Vesikate, PVC- tai bitumikermikate RIL 107-2012 -ohjeen ja kattoliiton Toimivat katot -ohjeen mukaisesti
- Lämmöneriste, laakerikerros, mineraalivilla $\lambda_U=0,038$ W/mK 30
- Lämmöneriste, harmaa EPS-katto $\lambda_U=0,031$ W/mK 400
- kiinnitys alustaan erillisillä kiinnikkeillä tai katteen kiinnikkeillä
- Höyrynsulku 0,2
- Tasausbetoni
- Kantava rakenne, ontelolaatta rakennesuunnitelman mukaan
- Pintamateriaali tai - käsittely, huoneselostuksen mukaisesti
- Vedeneristyksen kiinnitys ja limitys katevalmistajan ohjeen mukaan.

YP5

Loiva katto, ontelolaattarakenne
Lämmöneriste PU

U=0,07 W/m²K



Vesikate, RIL 107-2012 -ohjeen ja kattoliiton Toimivat katot -ohjeen mukaisesti

Laakerivillakerros tarvittaessa, katteen vaatimusten mukaan

Lämmöneriste PU, saumat limittäin

320/330

- PU 160+160 mm, $\lambda_U=0,023$ W/mK (ei laakerivillakerrosta) tai

- PU 150+150, $\lambda_U=0,023$ W/mK ja laakerivilla 30 mm, $\lambda_U=0,037$ W/mK

Höyrinsulku, bitumikermi tai vastaava

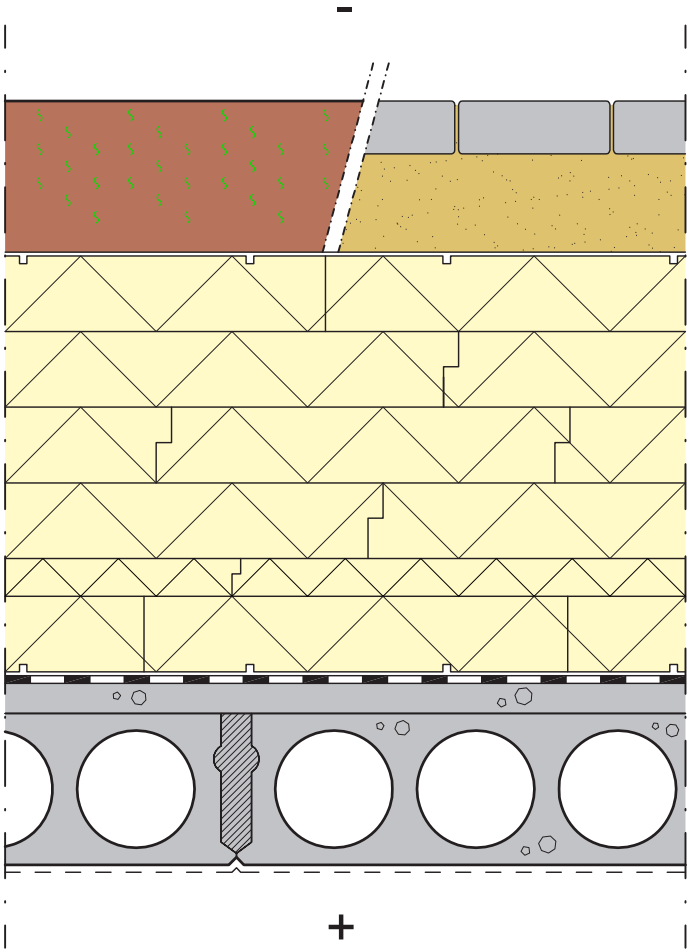
0,2

Kantava rakenne, ontelolaatta (/TT-laatta/betoni) rakennesuunnitelman mukaan

Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti

YP6

Loiva käännetty katto, ontelolaattarakenne U=0,07 W/m²K Lämmöneriste XPS



Pintarakenne

Kasvillisuus istutussuunnitelman mukaan, ruokamultakerros rakenneselostuksen tai istutussuunnitelman mukaan ≤ 200 mm tai

- Betonikivi ja asennushiekka

Diffuusioavoin kangas

Kasvualustaksi tarkoitettu salaojamatto

Lämmöneriste XPS, lujuusluokka kuormituksen mukaan , $\lambda_U=0,039$ W/mK

550

- Ylin ja alin levy uritettu. Ylin kerros asennetaan urat ylöspäin ja alin kerros urat alaspäin. Uritetut levyt asennetaan niin, että urat muodostavat yhtenäisen kanaviston, joka tuuletetaan kattokaivojen avulla.

Salaojamatto

Vedeneriste, käyttöluokka VE80R, ylin kermi juurisuojattu

Tasausbetoni rakennesuunnitelman mukaan

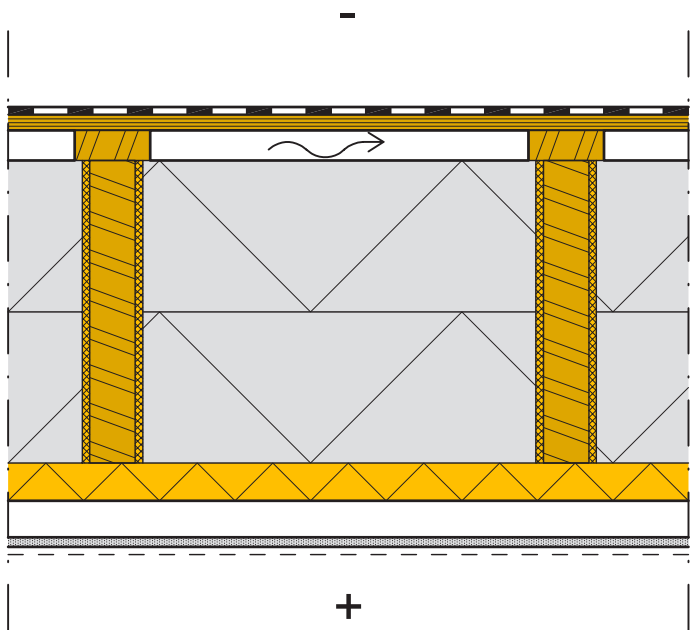
Kantava rakenne, ontelolaatta (/TT-laatta/betoni) rakennesuunnitelman mukaan

Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti

YP7

Loiva tai jyrkkä katto, puurakenne
Lämmöneriste harmaa EPS

U=0,07 W/m²K



Vesikate, RIL 107-2012 -ohjeen ja kattoliiton Toimivat katot -ohjeen mukaisesti

Pontattu vesikattovaneri

Tuuletusrako ≥ 40 mm 40

Lämmöneriste harmaa EPS-katto, λ_D=0,031 W/mK,
kantava kattovasa rakennesuunnitelman mukaan k600...900 400

- Lämmöneriste tiivistetään kattovasoihin elastisella PU-vaahdolla.

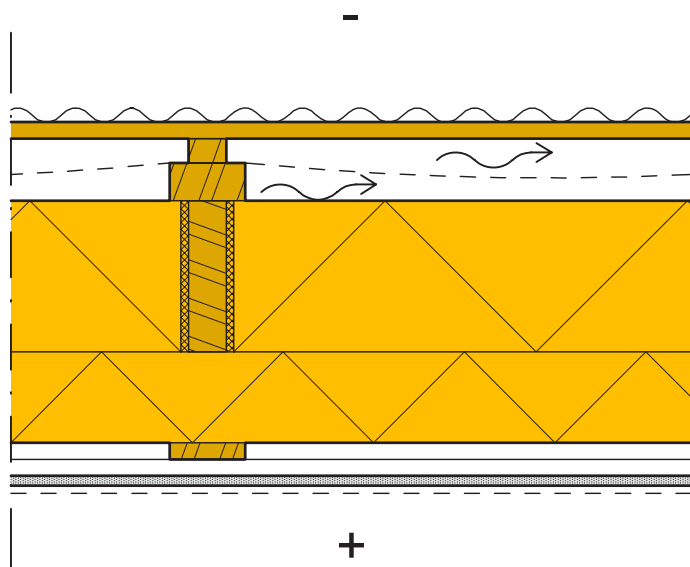
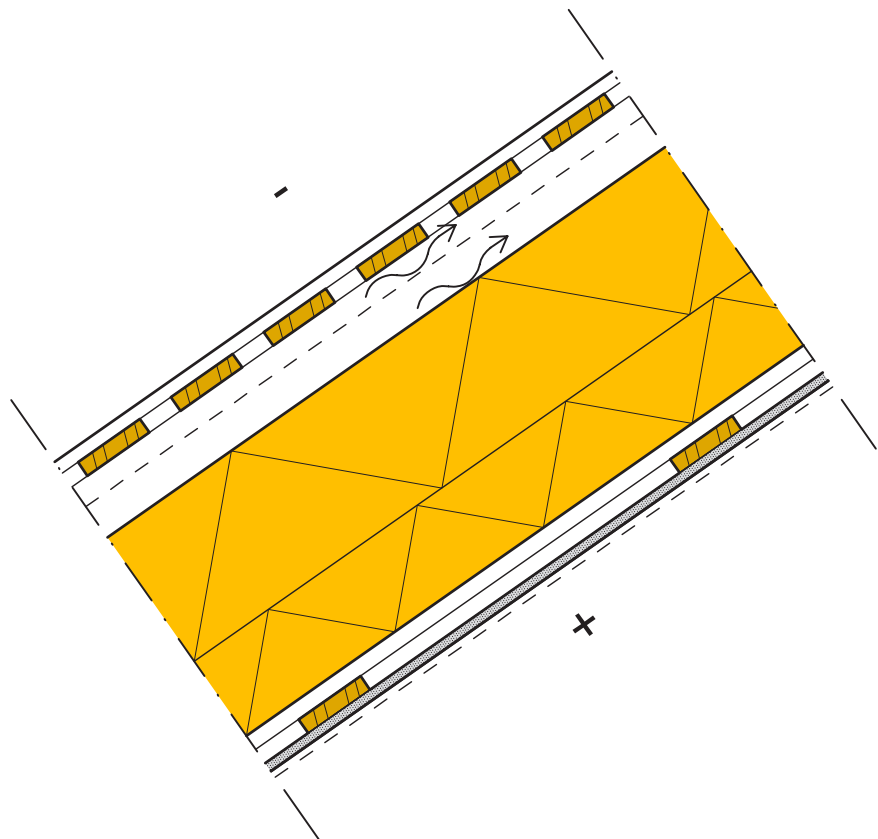
Lämmöneriste PU, λ_D=0,023 W/mK, saumat teipattu 50

Koolaus 48x48 mm k600 48

Rakennuslevy 13

Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti

YP8



Jyrkkä katto, puurakenne Lämmöneriste PU

U=0,07 W/m²K

Vesikate, RIL 107-2012 -ohjeen ja kattoliiton Toimivat katot -ohjeen mukaisesti

Ruodelaudoitus ja korokerimat katteen vaatimusten mukaan

Aluskate

Tuuletusväli ≥ 50 mm, tarvittaessa korokepuut 50

Lämmöneriste PU, λ_U=0,023 W/mK, saumat vaahdotetaan, kattokannattajat k900 rakennesuunnitelman mukaan 200

Lämmöneriste PU, λ_U=0,023 W/mK, saumat vaahdotetaan 120

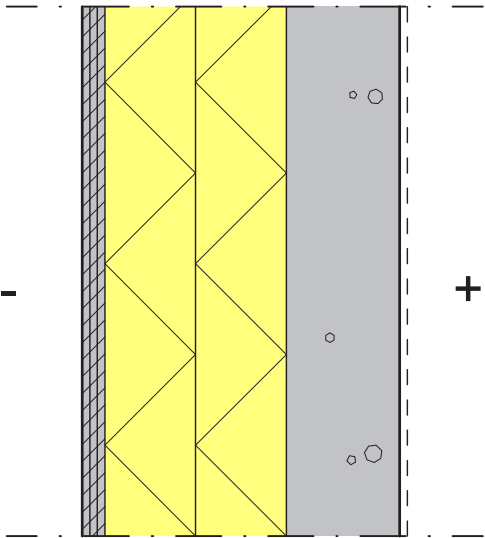
Asennustila, ristiinkollaus 22x100 mm, toisiokannattajat k600 44

Rakennuslevy 13

Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti

US1

Eristerapattu ulkoseinä, kolmikerrosrappaus **U=0,14 W/m²K**
Lämmöneriste mineraalivilla

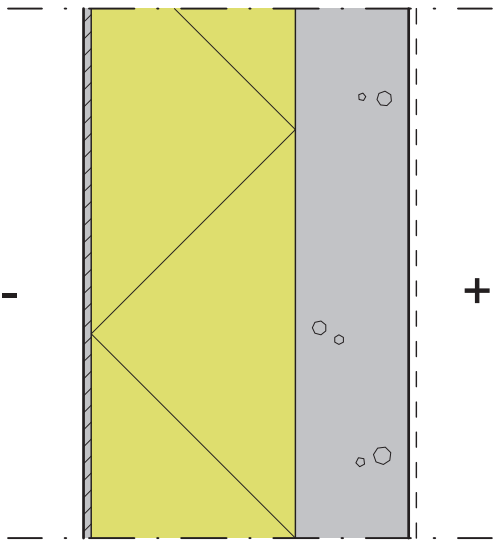


Kolmikerrosrappaus, valmistajan ohjeiden mukaan	
Lämmöneriste mineraalivilla, $\lambda_U=0,035$ W/mK	240
Kantava rakenne, betoniseinä, rakennesuunnitelman mukaan	150
Pintamateriaali tai - käsittely, huoneselostuksen mukaisesti	

US2a

Eristerapattu ulkoseinä, ohutrappaus
Lämmöneriste mineraalivilla

U=0,14 W/m²K

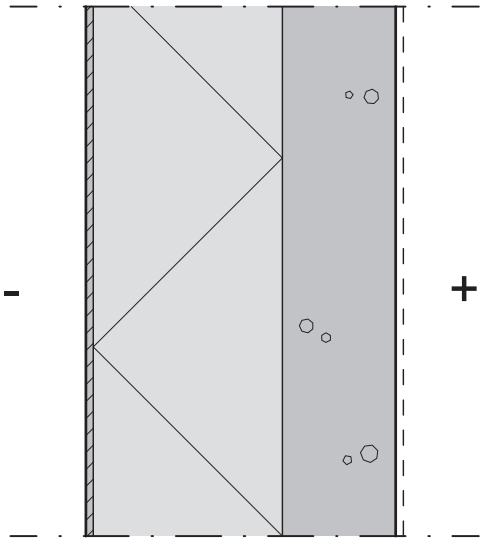


Ohutrappaus, valmistajan ohjeiden mukaan	
Lämmöneriste mineraalivilla, $\lambda_U=0,040$ W/mK	270
Kantava rakenne, betoniseinä, rakennesuunnitelman mukaan	150
Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti	

US2b

Eristerapattu ulkoseinä, ohutrappaus
Lämmöneriste harmaa EPS

U=0,12 W/m²K



Ohutrappaus, valmistajan ohjeiden mukaan

Lämmöneriste harmaa EPS-seinäeriste, $\lambda_U=0,031$ W/mK

250

- Kiinnitys valussa tai laastiliimauksella

Kantava rakenne, betoniseinä, rakennesuunnitelman mukaan

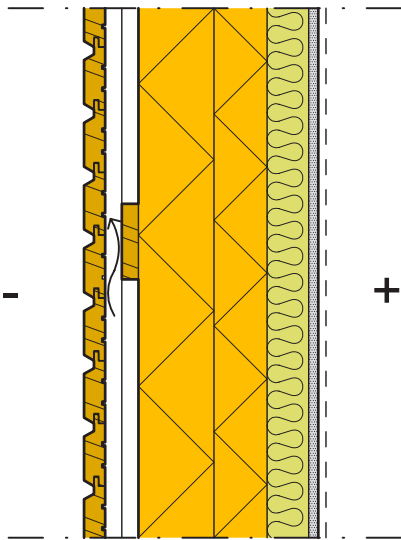
150

Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti

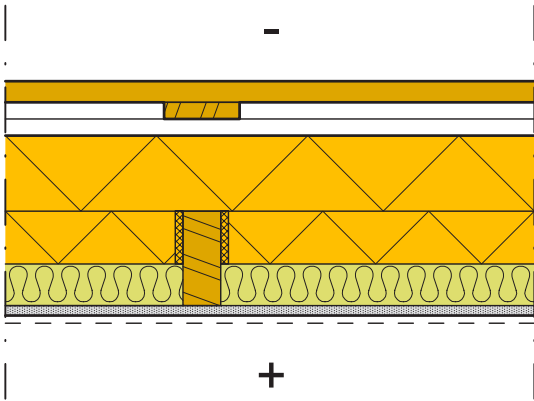
US3

Tuuletettu ulkoseinä, puurunko
Lämmöneriste PU

U=0,12 W/m²K



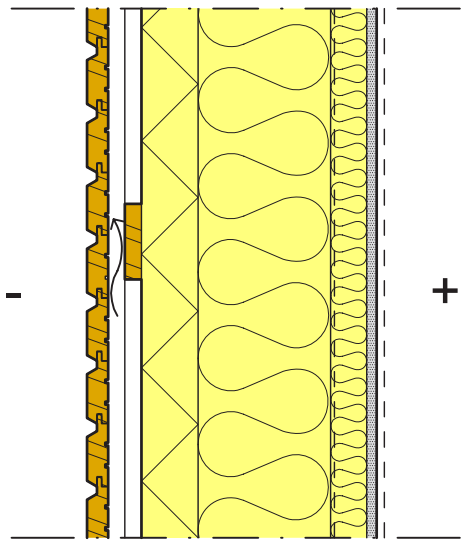
Ulkooverhous	
Tuuletusväli, ristiinkoolaus 22x100	44
Lämmöneriste PU, $\lambda_U=0,023$ W/mK, saumat vaahdotetaan	100
Runkotolpat k600 rakennesuunnitelman mukaan	
Lämmöneriste PU, $\lambda_U=0,023$ W/mK, saumat vaahdotetaan	70
Asennustila ja ääneneriste, mineraalivilla	50
Sisäverhouslevy	13
Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti	



US4

Tuuletettu ulkoseinä, puurunko Lämmöneriste mineraalivilla

U=0,12 W/m²K

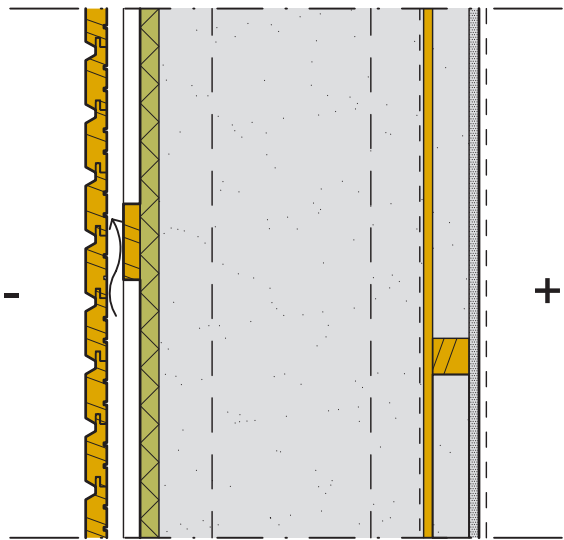


Ulkooverhous	
Tuuletusväli, ristiinkoolaus 22x100	44
Tuulensulkumineraalivilla, $\lambda_U=0,033$ W/mK	75
Lämmöneriste, mineraalivilla, $\lambda_U=0,033$ W/mK, kantava runko k600	175
Höyrynsulku	
Asennustila ja lämmöneriste, mineraalivilla, pystykoolaus	48
Sisäverhouslevy	13
Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti	

US5

Tuuletettu ulkoseinä, puurunko
Lämmöneriste puukuitueriste

U=0,10 W/m²K

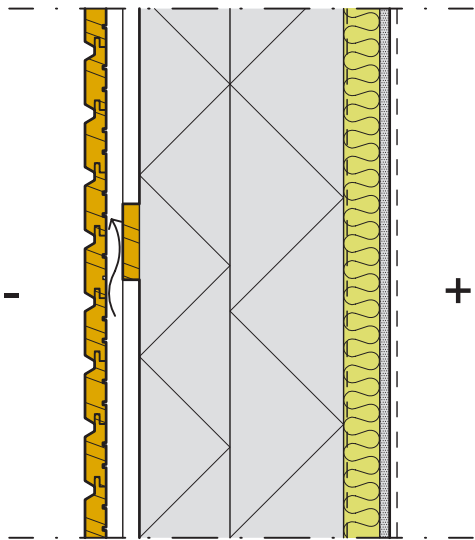


Ulkoverhous	
Tuuletusväli, ristiinkoolaus 22x100	44
Tuulensulkukuitulevy	25
Lämmöneriste, puukuitu, $\lambda_U=0,039$ W/mK, I-palkki-pystyrunko 350x70 mm k600	350
Ilmansulkukangas, limitys 200 mm, kaikki saumat teipataan	0,2
OSB-levy	12
Vaakakoolaus 48x48 mm k600, lämmöneriste, puukuitu	48
-Koolaus asennetaan pystyy välipohjan alapuolella.	
Sisäverhouslevy	13
Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti	

US6

Tuuletettu ulkoseinä, puurunko
Lämmöneriste harmaa EPS

U=0,12 W/m²K

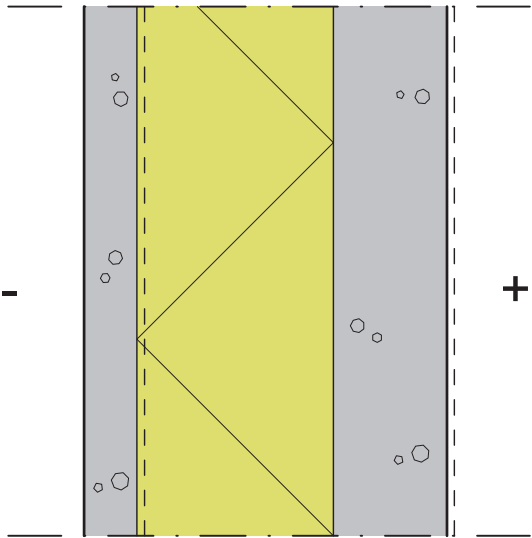


Ulkooverhous	
Pystyrimoitus, 2 x 22x100 mm k600	44
Lämmöneriste, harmaa EPS-seinä, $\lambda_U=0,031$ W/mK runkotolppien ulkopintaan	120
Puurunko ja lämmöneriste, harmaa EPS-seinä, $\lambda_U=0,031$ W/mK	150
- Tiivistetään elastisella polyuretaanivaahdolla runkotolppien k600 väliin.	
Höyrynsulku, saumat teipattu	0,2
Koolaus 48x48 mm, asennustila, ääneneristysvilla tarvittaessa	48
Sisäverhouslevy	13
Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti	

US7

Betonisandwich-ulkoseinä
Lämmöneriste mineraalivilla

U=0,14 W/m²K

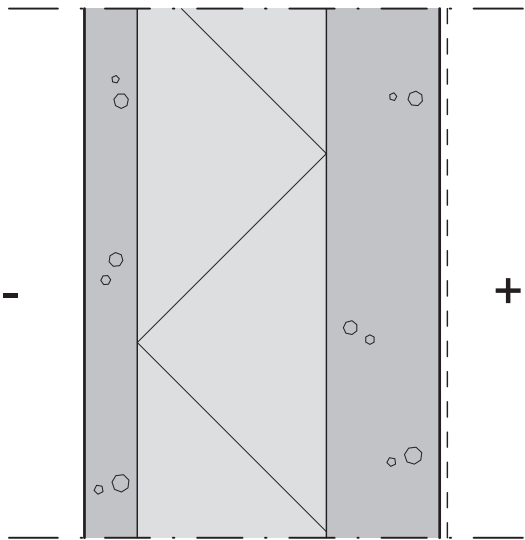


Pintakäsittely, työselostuksen mukaan	
Teräsbetoni (ulkokuorielementti), rakennesuunnitelman mukaan	80
Lämmöneriste mineraalivilla, uritettu ja urasuojattu, $\lambda_U=0,035$ W/mK	260
Teräsbetoni (sisäkuorielementti), rakennesuunnitelman mukaan	150
Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti	

US8

Betonisandwich-ulkoseinä Lämmöneriste harmaa EPS

U=0,12 W/m²K

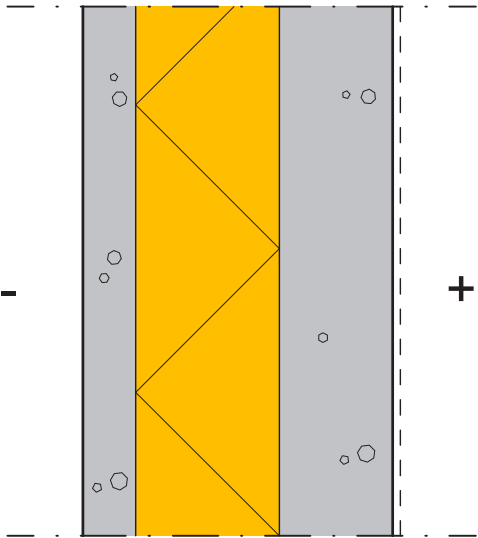


Pintakäsittely, työselostuksen mukaan	
Teräsbetoni (ulkokuorielementti), rakennesuunnitelman mukaan	80
Lämmöneriste harmaa EPS-seinä, $\lambda_D=0,031$ W/mK	250
- Työsaumojen ja läpivientien tiivistys PU-vaahdolla.	
Teräsbetoni (sisäkuorielementti), rakennesuunnitelman mukaan	150
Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti	

US9

Betonisandwich-ulkoseinä Lämmöneriste PU

U=0,12 W/m²K



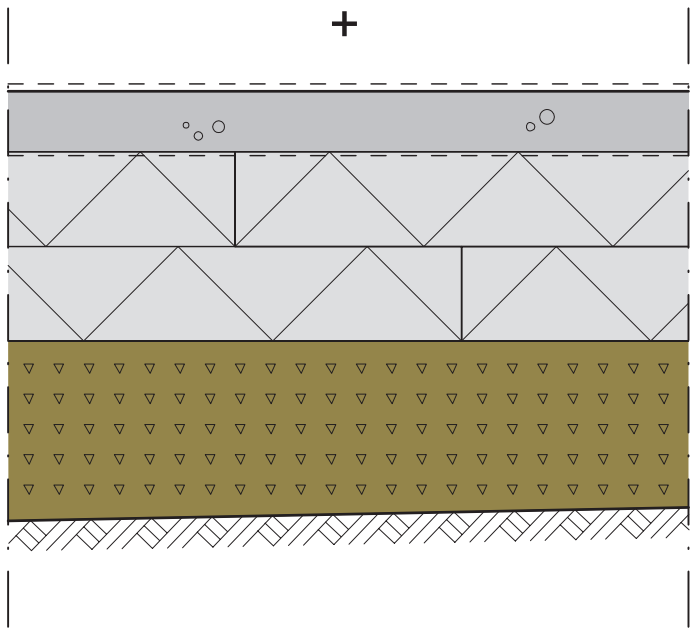
Pintakäsittely, työselostuksen mukaan	
Teräsbetoni (ulkokuorielementti), rakennesuunnitelman mukaan	80
Lämmöneriste PU, saumat vaahdotetaan, ei uritusta, $\lambda_U=0,023$ W/mK	190
Teräsbetoni (sisäkuorielementti), rakennesuunnitelman mukaan	150
Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti	

AP1

Maanvarainen betonirakenteinen alapohja

U=0,10 W/m²K

Lämmöneriste Harmaa EPS



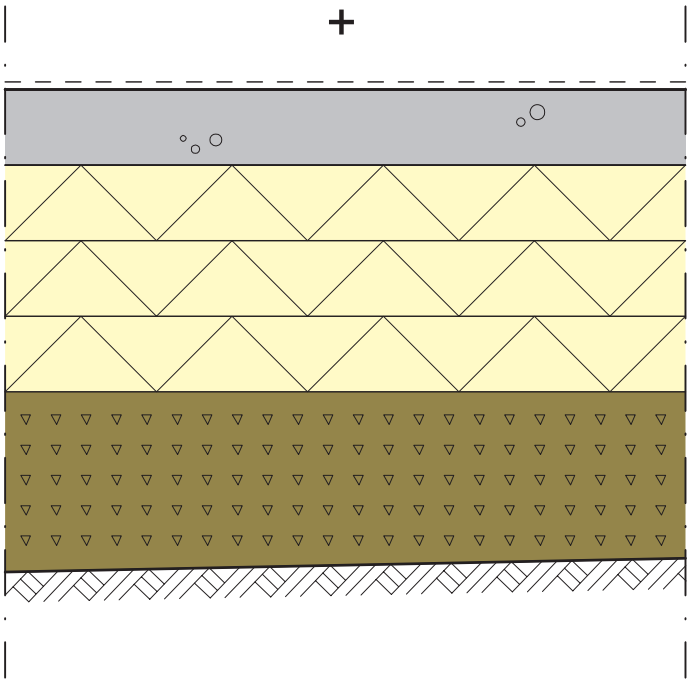
Lattiapinnoite huoneselostuksen mukaan	
Teräsbetoni­laatta 80 mm, raudoitus ja betoniluokka rakennesuunnitelman mukaisesti	80
Suodatinkangas tai sitkeä suojapaperi tarvittaessa	
Lämmöneriste, Harmaa EPS-lattia, $\lambda_D=0,031$ W/mK	250
Salaojituseros, tiivistetty sepeli Ø 6...16 mm	≥ 200
Suodatinkangas tarvittaessa	
Perusmaa, kallistus salaojiin 1 : 50	

AP2

Maanvarainen betonirakenteinen alapohja

U=0,10 W/m²K

Lämmöneriste XPS



Lattiapinnoite huoneselostuksen mukaan

Teräsbetoni laatta 80...100 mm, raudoitus ja betoniluokka rakennesuunnitelman mukaisesti

Lämmöneriste XPS, $\lambda_U=0,038$ W/mK 300

Salaojituseros, tiivistetty sepeli Ø 6...16 mm ≥ 200

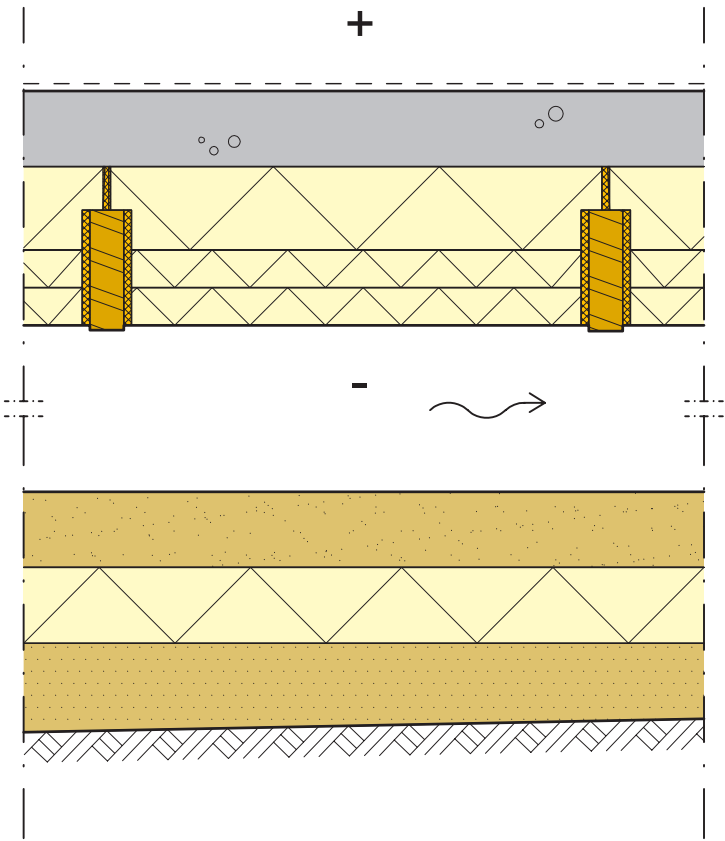
Suodatinkangas tarvittaessa

Perusmaa, kallistus salaojiin 1 : 50

AP3

Tuulettuva alapohja, puurakenne Lämmöneriste XPS

U=0,10 W/m²K



Lattiapinnoite huoneselostuksen mukaan

Teräsbetoni laatta 80...100 mm, raudoitus ja betoniluokka rakennesuunnitelman mukaisesti

Lämmöneriste XPS sekä lisäksi vassojen välissä 170 mm lämmöneriste XPS tiivistettynä elastisella polyuretaanivaahdolla vassoihin, $\lambda_D=0,035/0,037$ W/mK

210

Tuulettuva alustatila

≥ 800

- Tuuletusaukot 4...8 ‰ alustatilan pinta-alasta.

Karkea hiekka tai sora 50...100 mm

100

Lämmöneriste EPS 50...100 mm

100

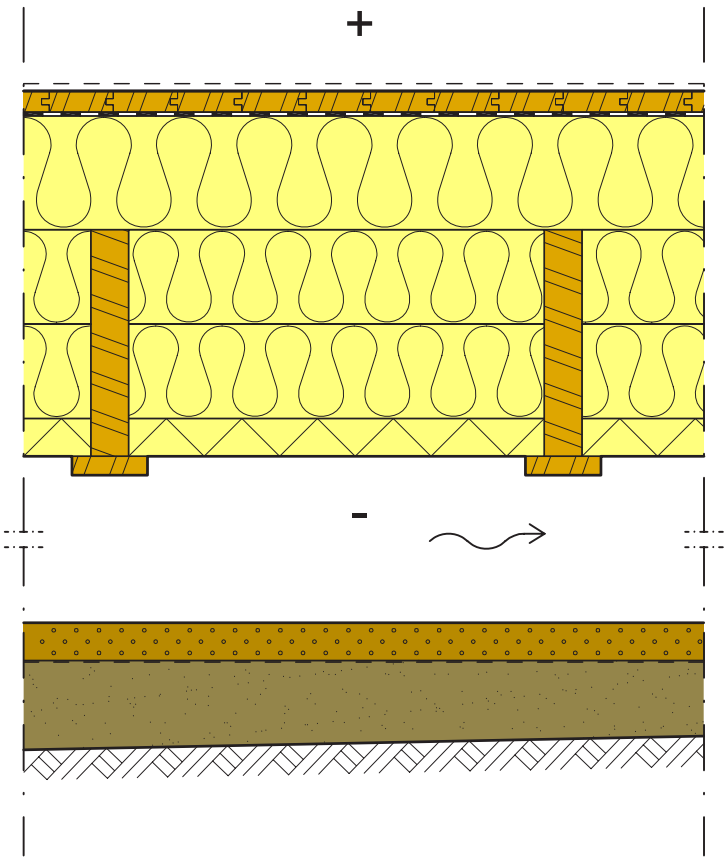
Kuiva tasaushiekka tarvittaessa

Perusmaa, kallistus salaojiin 1 : 50

AP4

Tuulettuva alapohja, puurakenne Lämmöneriste mineraalivilla

U=0,09 W/m²K

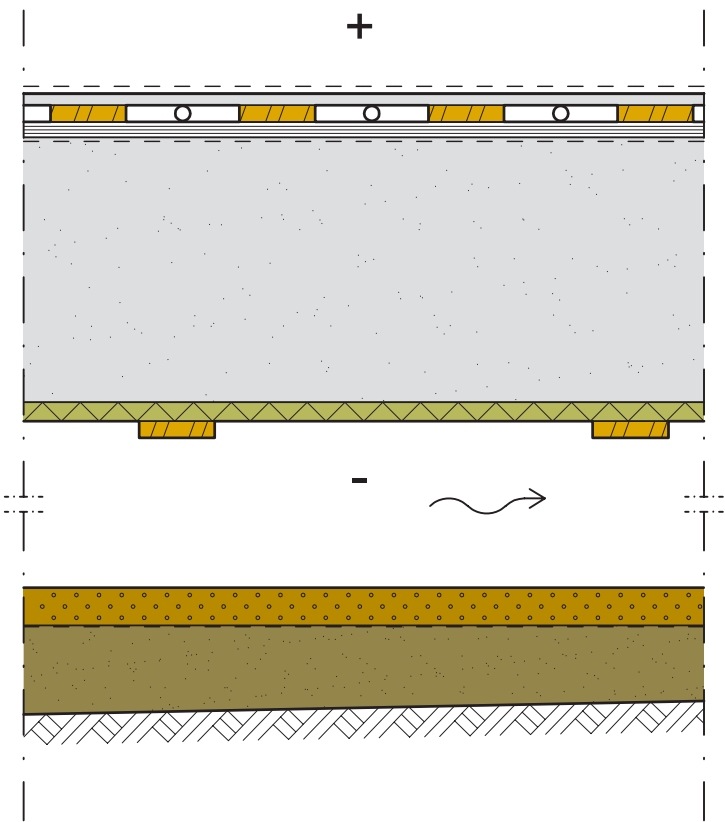


Lattiapinnoite huoneselostuksen mukaan	
Lattiaponttilauta 28x95 mm	28
Ilman- ja höyrynsulku	
Lämmöneriste mineraalivilla, $\lambda_U=0,036$ W/mK, koolaus 125x50 mm, koolausväli rakennesuunnitelman mukaan	125
Lämmöneriste mineraalivilla, $\lambda_U=0,036$ W/mK (125 + 125 mm), kantava rakenne, lattiakannattajat 300x50 mm, koolausväli rakennesuunnitelman mukaan	250
Tuulensulkumineraalivilla, $\lambda_U=0,032$ W/mK	55
Tuulettuva alustatila	≥ 800
- Tuuletusaukot 4...8 ‰ alustatilan pinta-alasta.	
Kevytsoora 50...100 mm	50
Suodatinkangas	
Soratäyttö	
Perusmaa, kallistus salaojiin 1 : 50	

AP5

Tuulettuva alapohja, puurakenne Lämmöneriste puukuitueriste

U=0,10 W/m²K

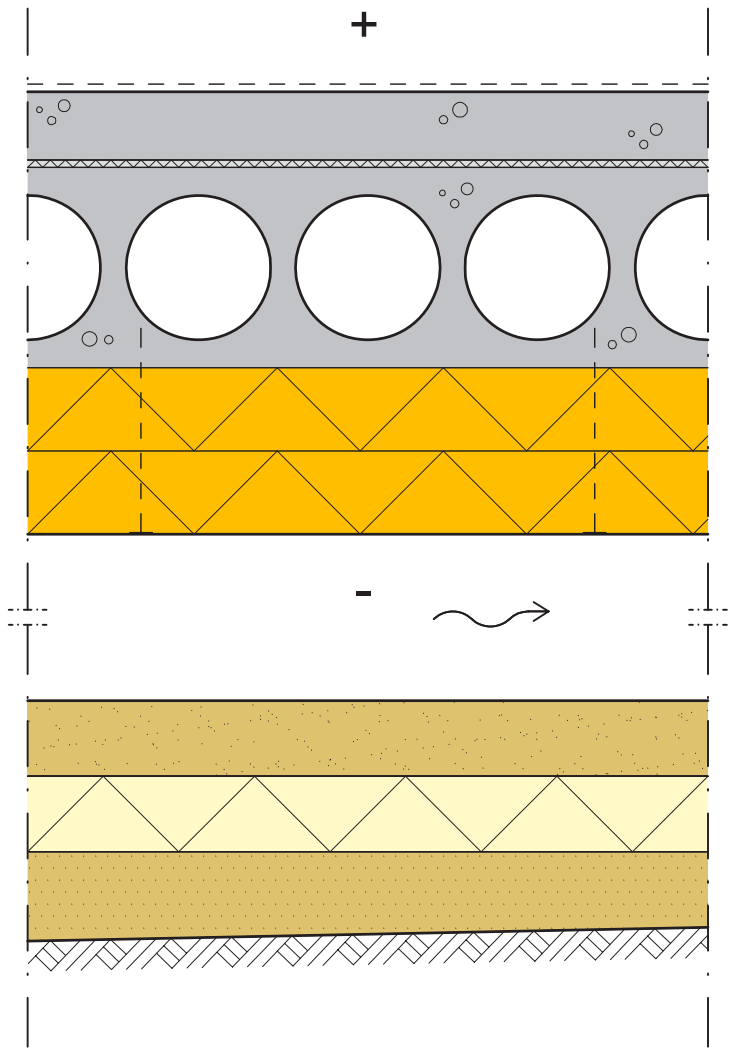


Lattiapinnoite huoneselostuksen mukaan	
Kipsilevy (mikäli pintamateriaali parketti)	15
Harvalaudoitus, LL-putket/lämmönlouovutuslevyt	22
Vaneri	21
Ilmansulkukangas	0,2
Lämmöneriste, puukuitu, $\lambda_D=0,039$ W/mK, kantava rakenne	350
Tuulensulkukuitulevy	25
Tukilaudoitus 22x100 mm k600	
Tuulettuva alustatila	≥ 800
- Tuuletusaukot 4...8 ‰ alustatilan pinta-alasta.	
Kevytsora 50...100 mm	50
Suodatinkangas	
Soratäyttö	
Perusmaa, kallistus salaojiin 1 : 50	

AP6

Tuulettuva alapohja, ontelolaattarakenne Lämmöneriste PU

U=0,10 W/m²K

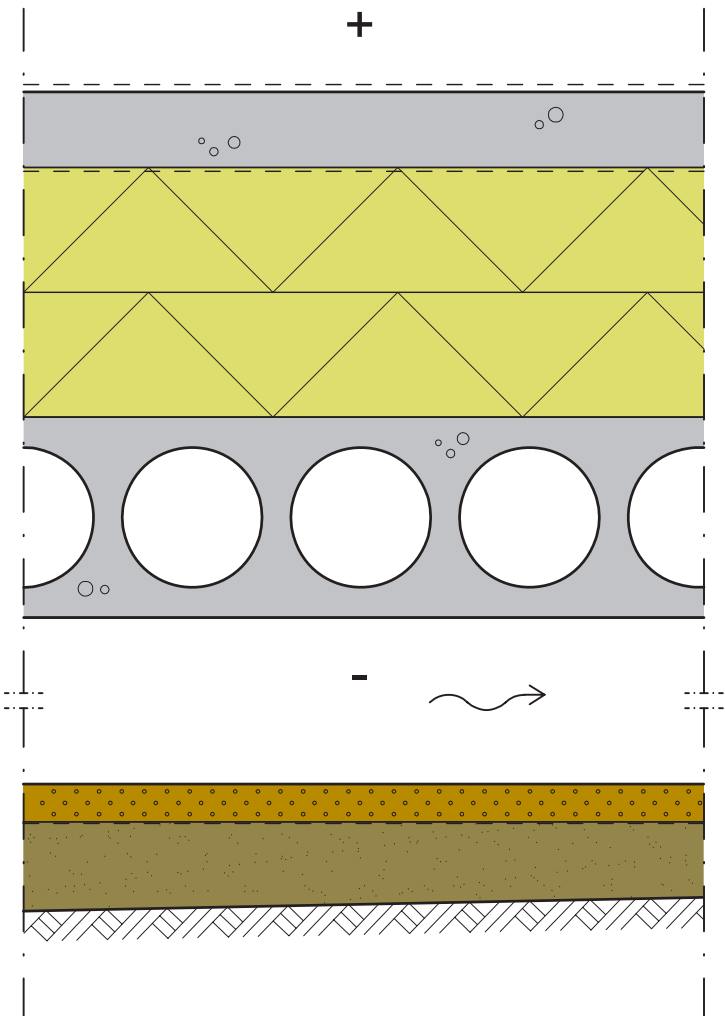


Lattiapinnoite huoneselostuksen mukaan	
Teräsbetonilaatta, rauditus ja betoniluokka rakennesuunnitelman mukaisesti	
Umpisolumuovi	10
Kantava rakenne, ontelolaatta, rakennesuunnitelman mukaisesti	
Lämmöneriste PU 110+110, $\lambda_U=0,023$ W/mK, saumat vaahdotetaan	220
Tuulettuva alustatila	≥ 800
- Tuuletusaukot 4...8 ‰ alustatilan pinta-alasta.	
Karkea hiekka tai sora 50...100 mm	100
Lämmöneriste EPS 50...100 mm	100
Kuiva tasaushiekka tarvittaessa	
Perusmaa, kallistus salaojiin 1 : 50	

AP7

Tuulettuva alapohja, ontelolaattarakenne Lämmöneriste mineraalivilla

U=0,09 W/m²K



Lattiapinnoite huoneselostuksen mukaan

Teräsbetonilaatta, rauditus ja betoniluokka rakennesuunnitelman mukaisesti

Sitkeä pahvi tai kuitukangas

Lämmöneriste, mineraalivilla, $\lambda_U=0,033$ W/mK

330

Kantava rakenne, ontelolaatta, rakennesuunnitelman mukaisesti

Tuulettuva alustatila

≥ 800

- Tuuletusaukot 4...8 ‰ alustatilan pinta-alasta.

Kevytsora 50...100 mm

50

Suodatinkangas

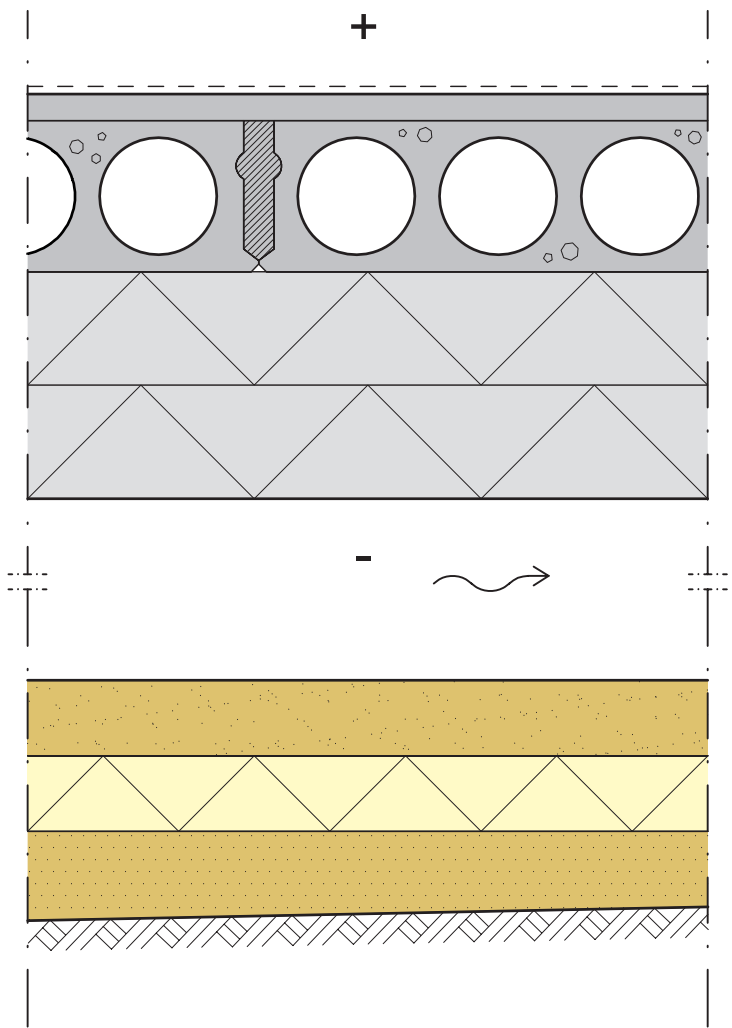
Soratäyttö

Perusmaa, kallistus salaojiin 1 : 50

AP8

Tuulettuva alapohja, ontelolaattarakenne Lämmöneriste harmaa EPS

U=0,10 W/m²K



Lattiapinnoite huoneselostuksen mukaan

Tasoite

Kantava rakenne, ontelolaatta, rakennesuunnitelman mukaisesti

Lämmöneriste, harmaa EPS, $\lambda_D=0,031$ W/mK

300

Tuulettuva alustatila

≥ 800

- Tuuletusaukot 4...8 ‰ alustatilan pinta-alasta.

Karkea hiekka tai sora 50...100 mm

100

Lämmöneriste EPS 50...100 mm

100

Kuiva tasaushiekka tarvittaessa

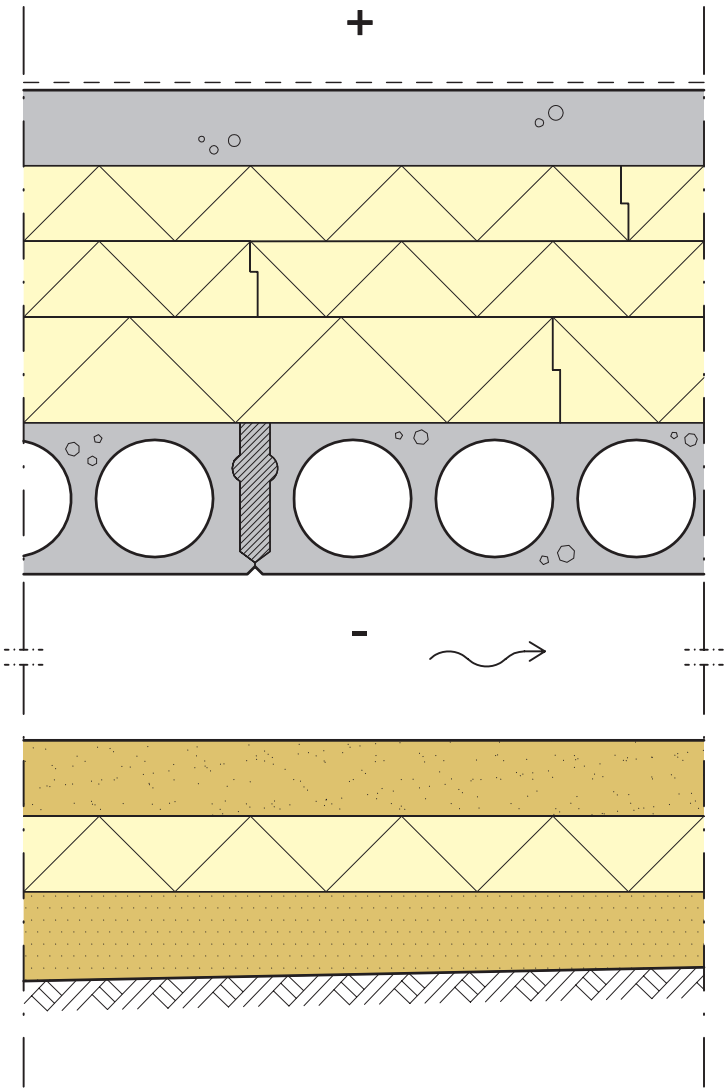
Perusmaa, kallistus salaojiin 1 : 50

AP9

Tuulettuva alapohja, ontelolaattarakenne

U=0,10 W/m²K

Lämmöneriste XPS

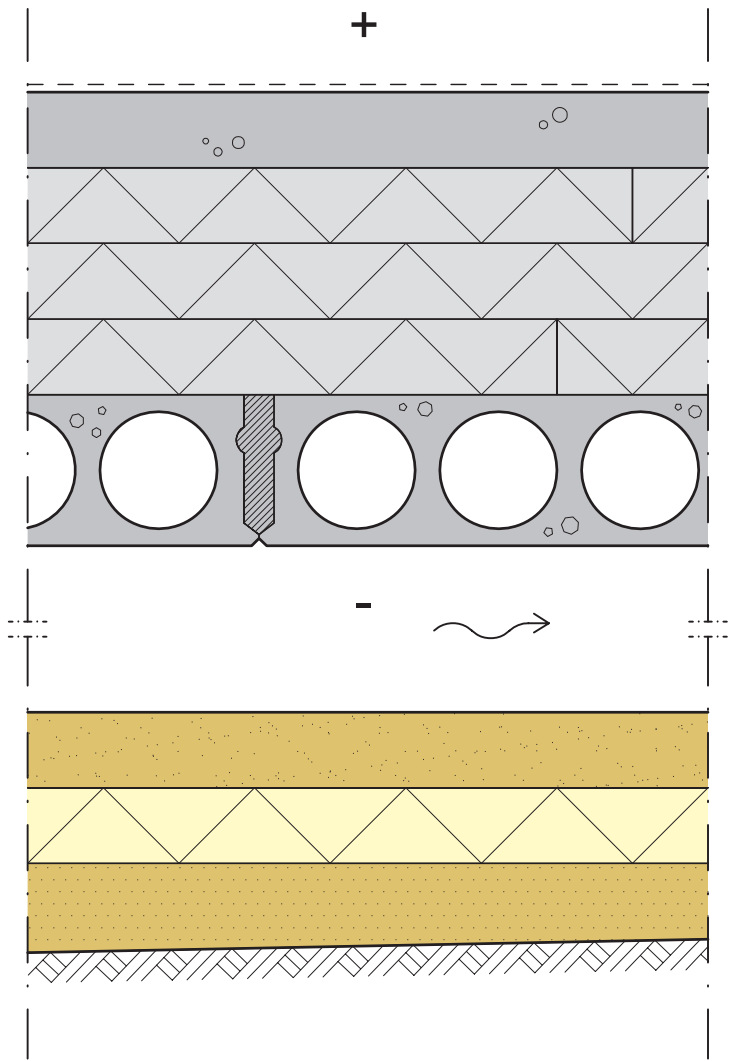


Lattiapinnoite huoneselostuksen mukaan	
Teräsbetoni-laatta 80...100 mm, raudoitus ja betoniluokka rakennesuunnitelman mukaisesti	100
Lämmöneriste, XPS saumat limittäin, $\lambda_D=0,037$ W/mK	340
Kantava rakenne, ontelolaatta, rakennesuunnitelman mukaisesti	
Tuulettuva alustatila	≥ 800
- Tuuletusaukot 4...8 ‰ alustatilan pinta-alasta.	
Karkea hiekka tai sora 50...100 mm	100
Lämmöneriste EPS 50...100 mm	100
Kuiva tasaushiekka tarvittaessa	
Perusmaa, kallistus salaojiin 1 : 50	

AP10

Tuulettuva alapohja, ontelolaattarakenne Lämmöneriste harmaa EPS

U=0,10 W/m²K



Lattiapinnoite huoneselostuksen mukaan	
Teräsbetoni-laatta 80...100 mm, raudoitus ja betoniluokka rakennesuunnitelman mukaisesti	100
Lämmöneriste, harmaa EPS-lattia saumat limittäin, $\lambda_U=0,031$ W/mK	300
Kantava rakenne, ontelolaatta, rakennesuunnitelman mukaisesti	
Tuulettuva alustatila	≥ 800
- Tuuletusaukot 4...8 ‰ alustatilan pinta-alasta.	
Karkea hiekka tai sora 50...100 mm	100
Lämmöneriste EPS 50...100 mm	100
Kuiva tasaushiekka tarvittaessa	
Perusmaa, kallistus salaojiin 1 : 50	

1 LÄHTÖTIEDOT

1.1 Materiaaliominaisuudet

Simuloinnissa on käytetty ohjeellisia materiaalitietoja. Pääosin on käytetty laskentaohjelman materiaalikirjaston tietoja betonisten rakenteiden ja puurakenteiden tietona. Eristeiden ominaisuudet määriteltiin RIL 255-1-2014 mukaisesti ja muiden rakenteiden materiaalitiedot verrattiin mainittuun RIL-julkaisuun. Betonin lähtöarvokosteus määriteltiin kaikissa laskentatapauksissa olevan RH = 90 %.

Jyrkät harjakatot

	Tiheys [kg/m ³]	Huokoisuus [m ³ /m ³]	Ominaislämpö- kapasiteetti [J/kgK]	Lämmön- johtavuus [W/mK]	Diffuusio- vastuskerroin ⁽¹⁾ [-]	Alkukosteus RH = 80 % kg/m ³	Alkukosteus RH = 95 % kg/m ³
Mineraalivilla -eriste	35,0	0,95	850	0,036...0,040	1,3	0,56	0,87
Puukuitueriste	37,0	0,9	1880,0	0,04	1,55	5,6	14,0
Höyrynsulku	130,0	0,001	2300,0	2,3	100000,0	0,0	0,0
Ilmakerros 22 mm	1,3	0,999	1000,0	0,142	0,53	1,88	7,8
Vanerilevy	500,0	0,66	130,00	0,12	188,0	70,0	113,0
Kipsilevy	700,0	0,77	1100,0	0,19	6,9	6,3	19,0

Taulukko 1. Simuloinnissa käytetyt materiaaliominaisuudet –
jyrkät katot.

Diffuusiovastuskerroin on yksikötön suure, joka kuvaa kuinka paljon suurempi materiaalin diffuusiovastus on verrattuna saman paksuiseen ilmakerrokseen. Rakennekerroksen diffuusiovastus $S_d = \mu \times d$ [m].

Loivat katot

	Tiheys [kg/m ³]	Huokoisuus [m ³ /m ³]	Ominaislämpö- kapasiteetti [J/kgK]	Lämmön- johtavuus [W/mK]	Diffuusio- vastuskerroin ⁽¹⁾ [-]	Alkukosteus RH = 80 % kg/m ³	Alkukosteus RH = 95 % kg/m ³
Bitumikermi	1000,0	0,01	1700	0,13	50000,0	0,0	0,0
Vanerilevy	500,0	0,66	1300	0,12	188,0	70,0	113,0
Ilmakerros 48 mm	1,3	0,999	1000	0,23	0,38	1,88	7,77
Ilmakerros 3 mm	1,3	0,999	1000	0,047	0,79	1,88	7,77
Mineraalivilla-eriste	60,0...150,0	0,95	850	0,036...0,040	1,3	0,56	0,87
Harmaa EPS -eriste	20,0	0,95	1500	0,031	50,0	0,18	0,35
PU -eriste	30,0...40,0	0,95	1500	0,023	2100,0	2,25	2,95
Kipsilevy	700,0	0,77	1100	0,19	6,9	6,3	19,0
Betoni C35/45	2220,0	0,18	850	1,6	70,0	95,6	95,6

Taulukko 2: Simuloinnissa käytetyt materiaaliominaisuudet – loivat katot.

Diffuusiovastuskerroin on yksikötön suure, joka kuvaa kuinka paljon suurempi materiaalin diffuusiovastus on verrattuna saman paksuiseen ilmakerrokseen. Rakennekerroksen diffuusiovastus $S_d = \mu \times d$ [m].

Viherkatto

	Tiheys [kg/m ³]	Huokoisuus [m ³ /m ³]	Ominaislämpö- kapasiteetti [J/kgK]	Lämmön- johtavuus [W/mK]	Diffuusio- vastuskerroin ⁽¹⁾ [-]	Alkukosteus RH = 80 % kg/m ³	Alkukosteus RH = 95 % kg/m ³
Multakerros	912,0	0,65	1000,0	0,4	3,4	10,6	17,4
Salaojamatto	83,0	0,95	840,0	0,035	1,0	0,7	1,57
XPS -eriste	30,0...40,0	0,95	1500,0	0,03	100,0	0,21	0,33
Bitumikermi	1000,0	0,01	1700,0	0,13	100000,0	0,7	1,57
Tasoite	2220,0	0,18	850,0	1,6	92,0	73,75	73,75
Betoni C35/45	2220,0	0,18	850,0	1,6	70,0	95,6	95,6

Taulukko 3: Simuloinnissa käytetyt materiaaliominaisuudet – viherkatto.

Diffuusiovastuskerroin on yksikötön suure, joka kuvaa kuinka paljon suurempi materiaalin diffuusiovastus on verrattuna saman paksuiseen ilmakerrokseen. Rakennekerroksen diffuusiovastus $S_d = \mu \times d$ [m].

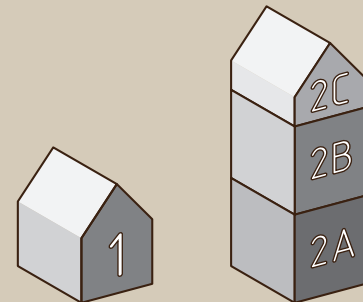
Viherkaton sisäilmaa lähinnä olevaa XPS-eristeen uritusta ei huomioitu laskennassa.

1.2 Tarkastelun oletukset

Suure	Arvo	Referenssi
Lämpö- ja kosteuslähteet		
Ilmanvuoto	-	
Kosteuskuorma	1 %	Oletettu vesikate vedenpitäväksi
Tuuletusraon ilmanvaihtoluku	1,8h ⁻¹	Uritettu mineraalivilla
Geometria		
Kallistuskulma	0°	
Rakennuskorkeus	Tapaus 1	Kuvan 1 mukaan
Pinnan siirtokertoimet		
Ulkopinnan lämmönvastus	0,04 m ² K/W	SRakMK C4:n mukaan
Ulkopinnan S _d -arvo	-	
Lyhytaaltainen absorptiokerroin	0,4	Vaalea
Sateen absorptiokerroin	0	Oletettu vesikate vedenpitäväksi
Sisäpinnan lämmönvastus	0,13 m ² K/W	SRakMK C4:n mukaan
Sisäpinnan S _d -arvo	-	
Alkuolosuhteet		
Alkukosteus	80 % 95 % 90 %	Normaali tilanne Kostunut Betonirakenteet kaikissa tapauksissa
Alkulämpötila	10 °C	
Laskentajakso		
Tarkasteluaika	5 vuotta	1.1.2015 – 1.1.2020
Simuloinnin aika-askel	1 h	

Taulukko 4. Simuloinnissa käytetyt lähtötiedot.

Kuva 1: Simuloinnissa käytettävä rakennuskorkeus ja viistosa-
dekertoimien määrittely.



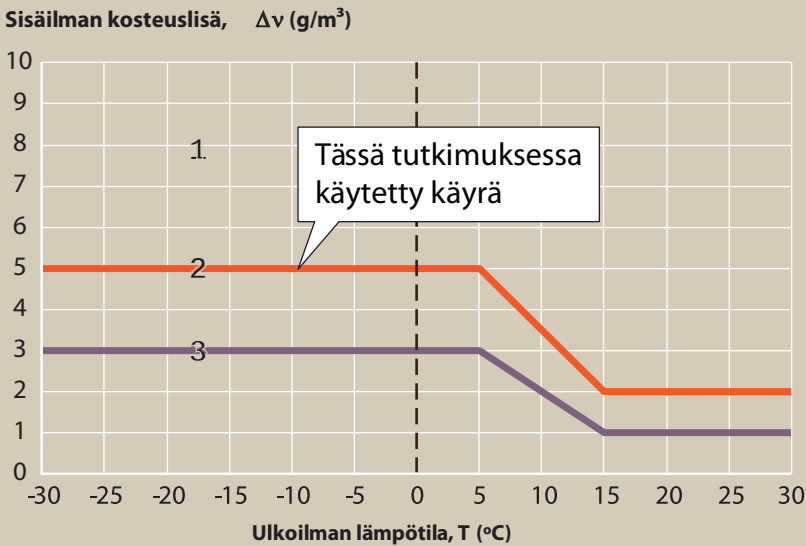
		R1	R2
1	Matala rakennus, enintään 10 m	0	0,07
2A	Korkea rakennus, alaosa, enintään 10 m	0	0,05
2B	Korkea rakennus, keskiosa, 10–20 m	0	0,1
2C	Korkea rakennus, yläosa, yli 20 m	0	0,2

Sadekuorma = Sade x (R1 + R2 x Tuulinopeus)

1.3 Ilmasto

Taulukko 5. Tarkastelussa käytetyt ilmastotiedot.

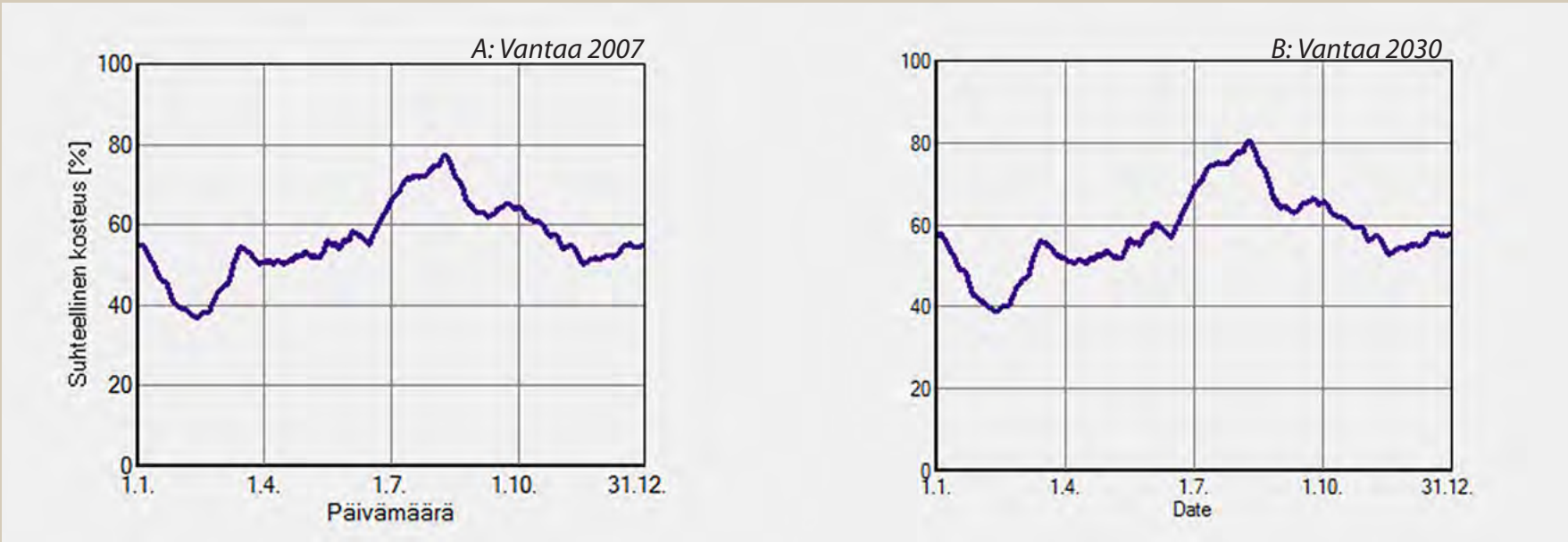
Suure	Arvo	Referenssi
Ulkoilmasto	Vantaa 2030 ja Vantaa 2007	Liite 5
Ilmansuunta	Etelä	Liite 5
Sisäilman lämpötila	21°C	
Sisäilman kosteuslisä	Käyrä 2	Kuva 2
Sisäilman suhteellinen kosteus	Käyrä B ja A	Kuva 3



Kuva 2. Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot (RIL 107-2012).

- 1 Kylpylät, uimahallit, laitoskeittiöt, pesulat, panimot, kirjapainot, kasvihuoneet, kostutetut tilat, ratsastusmaneesit, maatalouden tuotantorakennukset, eläinsuojat, teollisuuden kosteusrasitetut tilat
- 2 Asuinrakennukset, toimisto- ja liikerakennukset, hotellit ja majoitusrakennukset, ravintolat, kokoontumis- ja juhlatilat, opetusrakennukset ja päiväkodit, sairaalat ja hoitolaitokset, museot, liikuntahallit ja -tilat, jäähallit ja jäähdytetyt liikuntatilat, kylmä- ja pakkashuoneet, talviasuttavat vapaa-ajan asunnot
- 3 Vapaa-ajan asunnot, puolilämpimät tai kylmillään olevat rakennukset, varastot ja säilytystilat, ajoneuvosuojat

Kuva 3. Sisäilman suhteellinen kosteus sisälämpötilan ollessa 21 C°. Kosteuslisä "Kuva 2, käyrä 2" mukaisesti.



1.4 Uritetun lämmöneristeen ominaisuudet

Uritetun mineraalivillan urissa tapahtuva virtaus laskettiin seuraavin oletuksin:

- tarkastelukaistaleen leveys $L = 1 \text{ m}$
- urakoot A_{urat} : $0,03 \text{ m} \times 0,02 \text{ m} \times 5 \text{ kpl} / \text{m} = 0,003 \text{ m}^2$
- urissa tapahtuva ilmavirtaus $v = 0,05 \text{ m/s} = 180 \text{ m/h}$
- etäisyys tuloilmarasta poistoilmarakoon $s = 10 \text{ m}$

Ilmanvaihtuvuus lämmöneristeen urissa laskettiin seuraavasti:

- Virtauksen tilavuusvirta: $q_{urat} = A_{urat} \cdot v = 0,54 \text{ m}^3/\text{h}$
- Urien kokonaistilavuus $V = A_{urat} \cdot s = 0,3 \text{ m}^3$
- Ilmanvaihtuvuus urissa $n_{urat} = q_{urat} / V = 1,8 \text{ 1/h}$

Uritettu lämmöneriste lasketaan yhtenäisenä ilmakerroksena. Ekvivalentti ilmakerroksen paksuus laskettiin seuraavasti:

- jatkuvan, tuuletuskaistaleen levyisen tuuletusraon pinta-ala $A_{tuul} = 0,003 \text{ m}^2$
- jatkuvan, tuuletuskaistaleen levyisen tuuletusraon korkeus $h_{tuul} = A_{tuul} / L = 0,003 \text{ m}$

Laskennassa uritetun lämmöneristekerroksen urat korvataan $0,003 \text{ m}$ paksuisella ilmakerroksella (h_{tuul}), jonka ilmanvaihtuvuus on $1,8 \text{ 1/h}$.

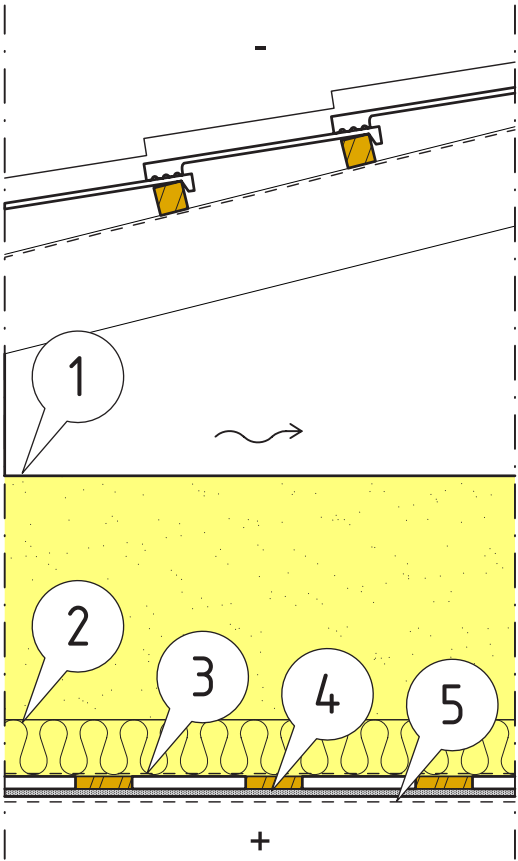
2 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

YLÄPOHJAT 1 JA 2

Yläpohjien YP1 ja YP2 lämmöneristeenä on puhalluseriste (mineraalivilla tai puukuitueriste). Lämmöneristystyöt tehdään vesikattotöiden jälkeen, jolloin lämmöneristys ei pääse kostumaan asennusvaiheessa. Väärä työjärjestys tai käytönaikaiset vauriot voivat aiheuttaa kostumisen. Kun rakenteet toteutetaan kunnollisesti sääsuojattuina, kosteus- ja homeriskejä rakennetyypissä ei ole.

Yläpohjan YP1 rakennekerrosten kostuminen aiheuttaa lievän homeenkasvun riskin heti kuivumisjakson alussa. Kyse on kuitenkin hyvin lievästä kasvun mahdollisuudesta. Rakennetyypin kuivumiskapasiteetti on hyvä, jolloin ylimääräinen kosteus poistuu rakenteesta yläpohjan tuulettamisen avulla.

Yläpohjan YP 2 puukuitulämmöneristys sitoo kosteutta itseensä, jolloin kostuneen lämmöneristyksen kuivuminen hidastuu. Tämä näkyy laskentatulosten pisteessä MP3 eli ilmansulkukerroksen yläpinnalla. Rakenne kuivuu yläpohjan tuuletuksen avulla.



RH 80 %
RH 95 %
Vantaa2007 RH 80 %

Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

YP1

Vesikate, RIL 107-2012 -ohjeen ja kattoliiton Toimivat katot -ohjeen mukaisesti

Aluskate

Vesikaton kantava rakenne, rakennesuunnitelman mukaan

Tuulettuva ullakko

Lämmöneriste, puhallusmineraalivilla $\lambda_U=0,041$ W/mK 430

Lämmöneriste, mineraalivilla $\lambda_U=0,036$ W/mK 100

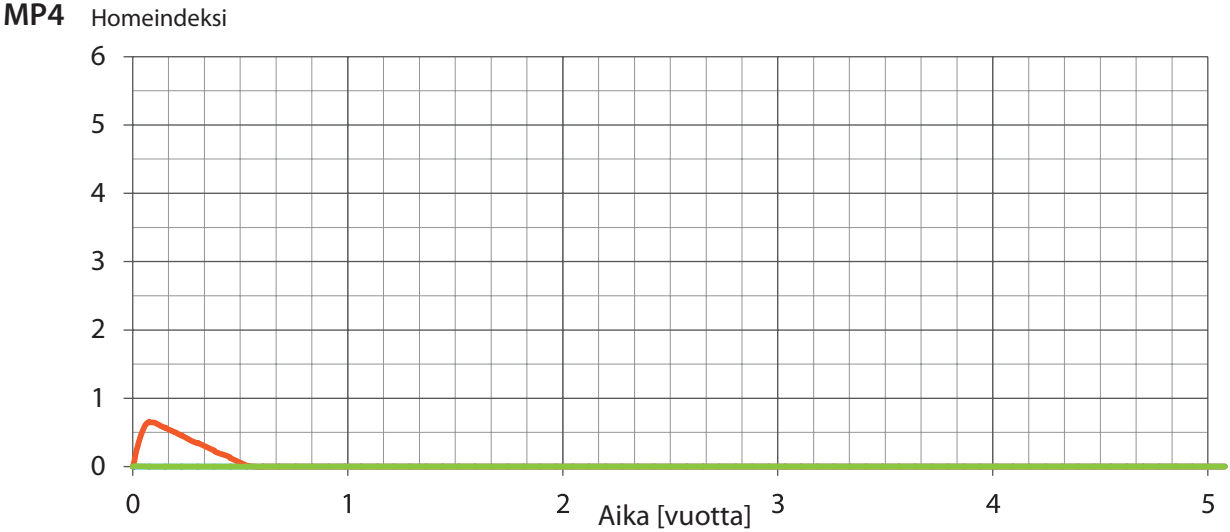
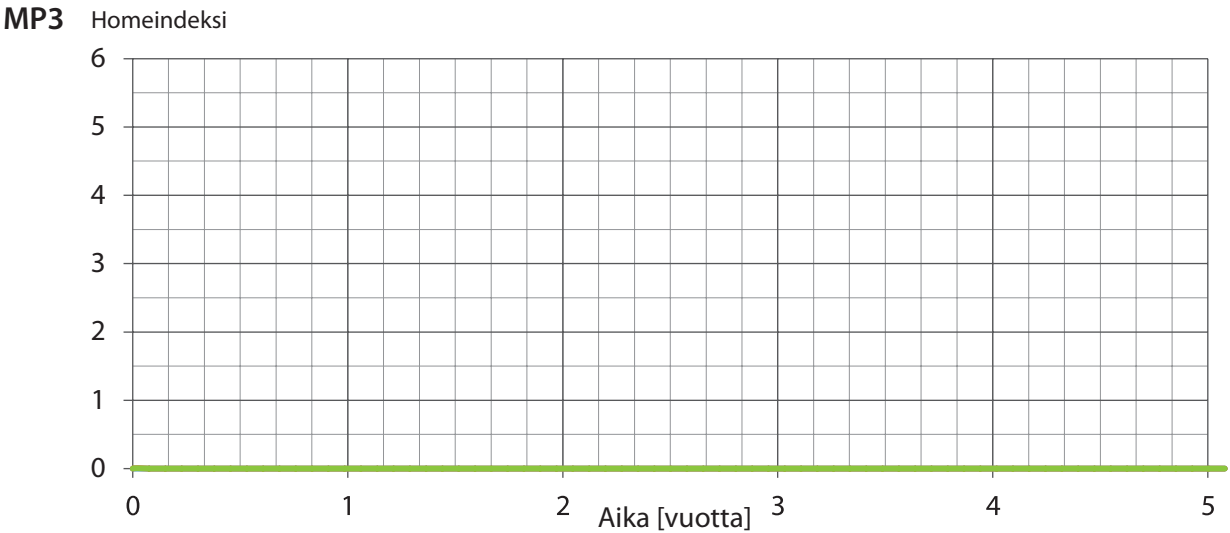
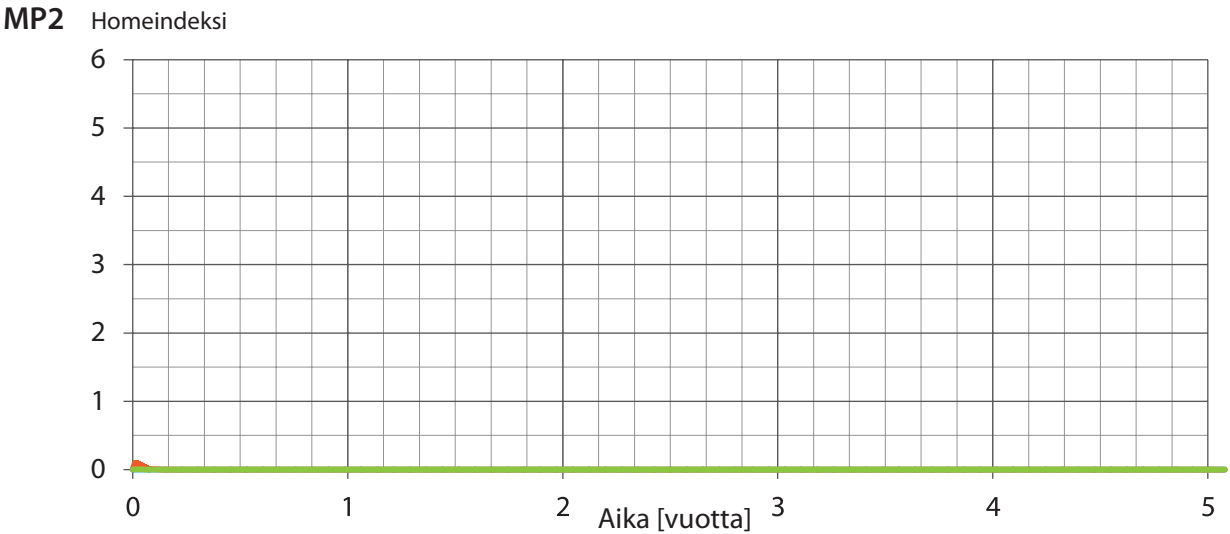
Kantava rakenne, rakennesuunnitelman mukaan

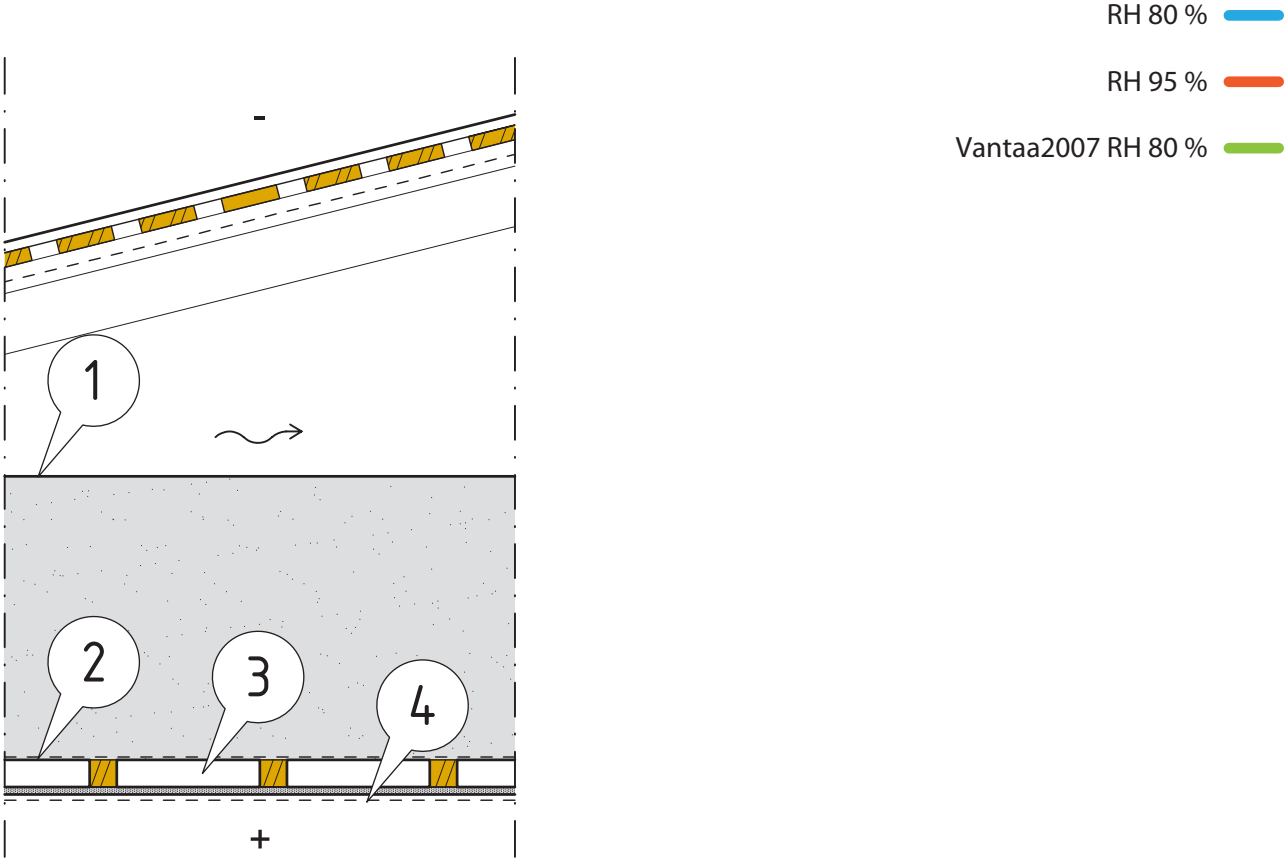
Ilman- ja höyrynsulku, kosteissa tiloissa aina höyrynsulku

Harvalauditus 22x100 mm k300 22

Rakennuslevy 13

Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti

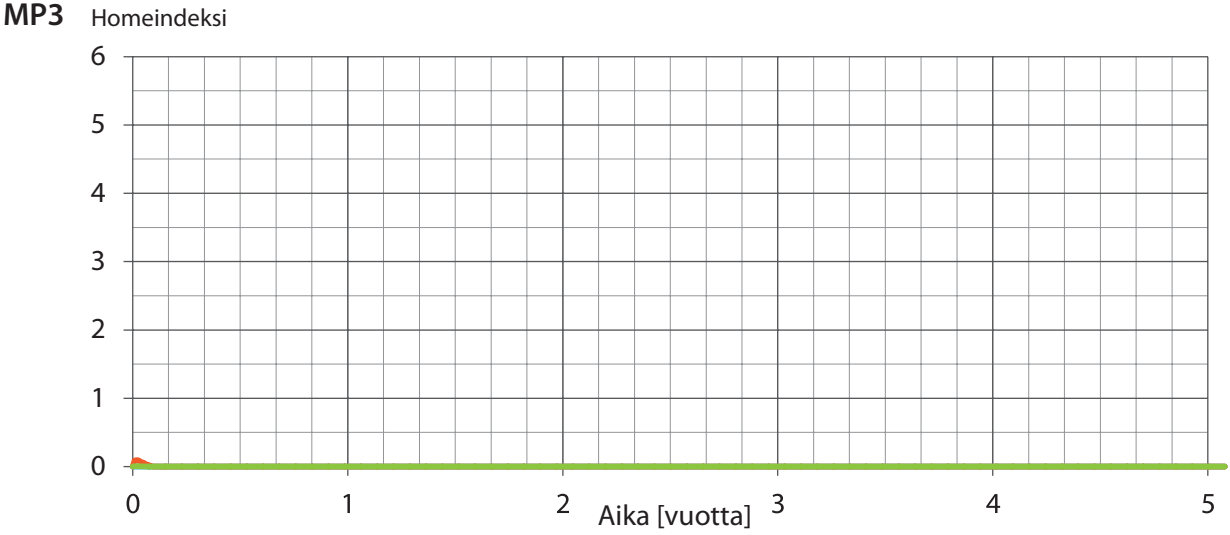
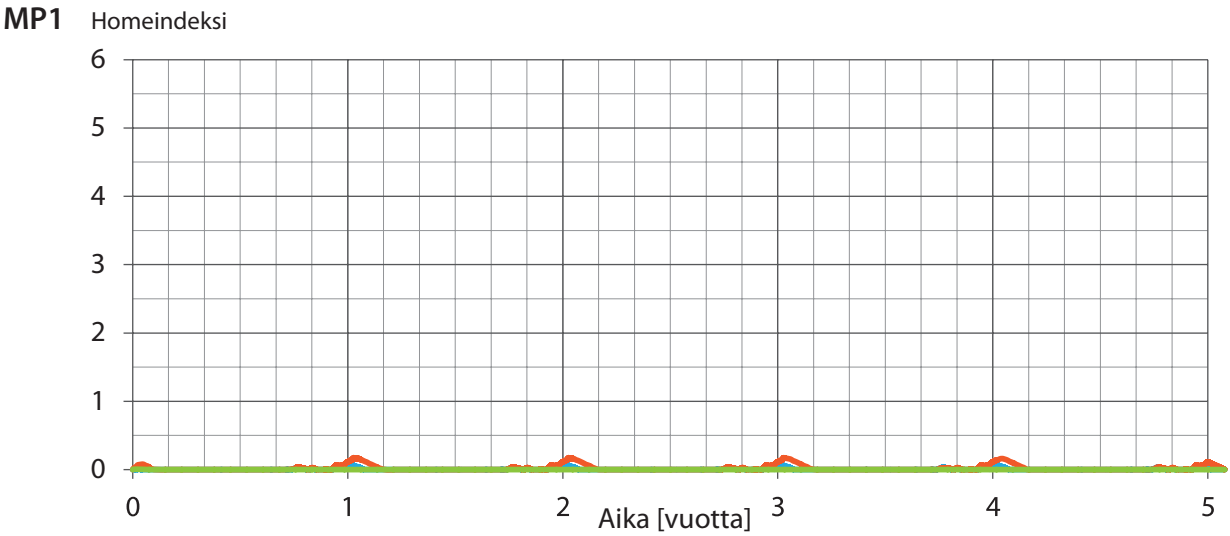




Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

YP2

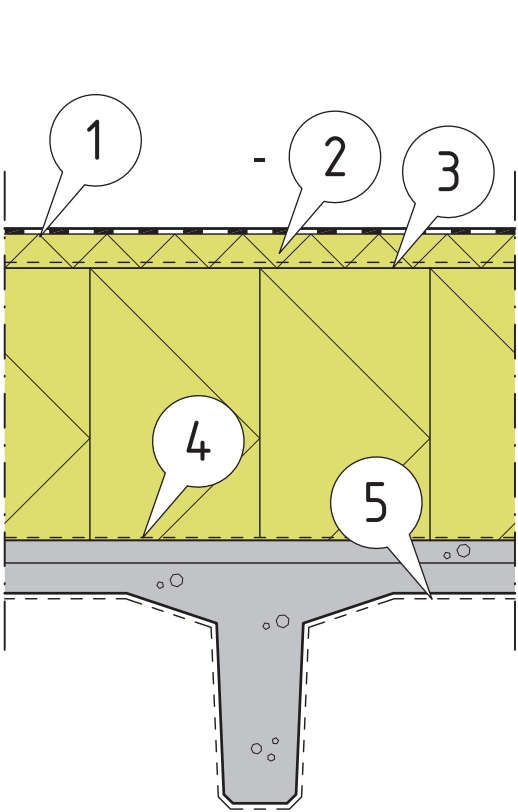
Vesikate, RIL 107-2012 -ohjeen ja kattoliiton Toimivat katot -ohjeen mukaisesti	
Harvalauditus 100x25, k-jako katevalmistajan ohjeen mukaan	25
Rima 25x50 mm k900	25
Aluskate	
Rima 20x45 mm k900, räystäällä umpipontttilauditus UTV 20x120 mm	20
Kattoristikot k900, kattoristikoiden välissä:	
- tuuletusväli > 100 mm	
- lämmöneriste puukuitu, $\lambda_D=0,039$ W/mK	600
Ilmansulkukangas, limitys 200 mm, kaikki saumat teipataan	0,2
Koolaus 48x48 mm k300	48
Sisäverhouslevy, kiinnitys valmistajan ohjeen mukaan, ei lävistyksiä	13
Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti	



YLÄPOHJAT 3, 4 JA 5

Uritetulla mineraalivillarakenteella (YP3) on suhteellisen hyvä kuivumiskapasiteetti kattotöiden aikaista vähäistä kostumista vastaan. Uritus kuivattaa paikallisesti kostuneen lämmöneristuksen. Laajalta alueelta läpi kostuneen mineraalivillakerroksen kuivuminen alle 80 % suhteellisen kosteuden voi kuitenkin kestää vuosia.

Tuulettumaton, kostunut lämmöneristys (YP4, YP5) eivät kuivu. Homehtumisen riski on suuri. Rakenteen toimivuuden edellytykset ovat rakentaminen säältä suojassa ja ehjä ja yhtenäinen höyrynsulkukerros. Lämmöneristyskerroksen homeriski ei aiheuta sisäilma-
toriskejä, kun yläpohjarakenteen ja sisäilman välillä ei tapahdu ilman liikettä. Työmaan kosteudenhallinnan merkitys korostuu loivien kattojen rakentamisessa.

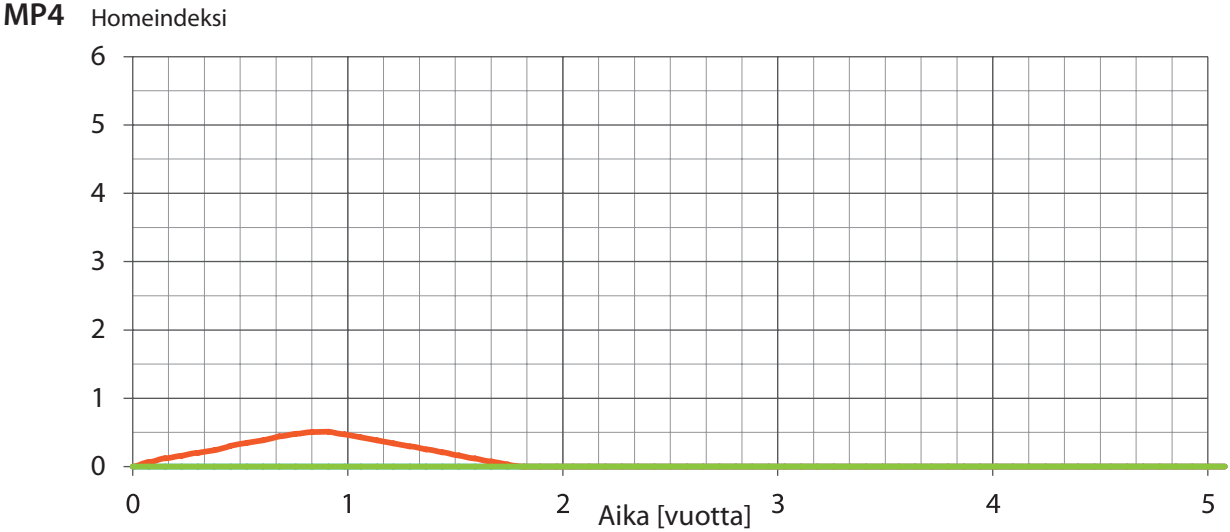
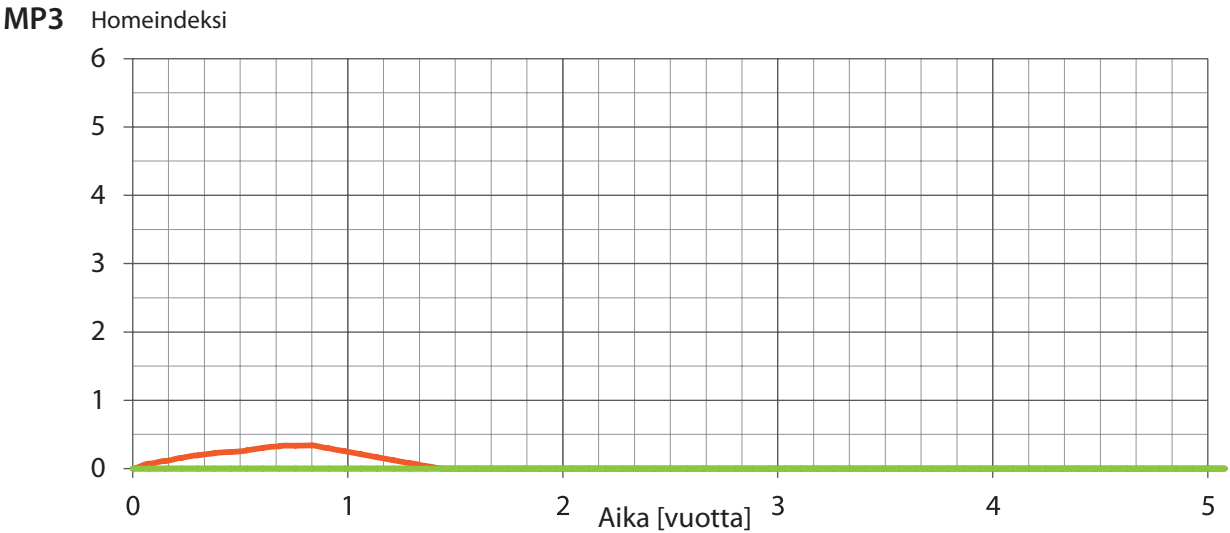
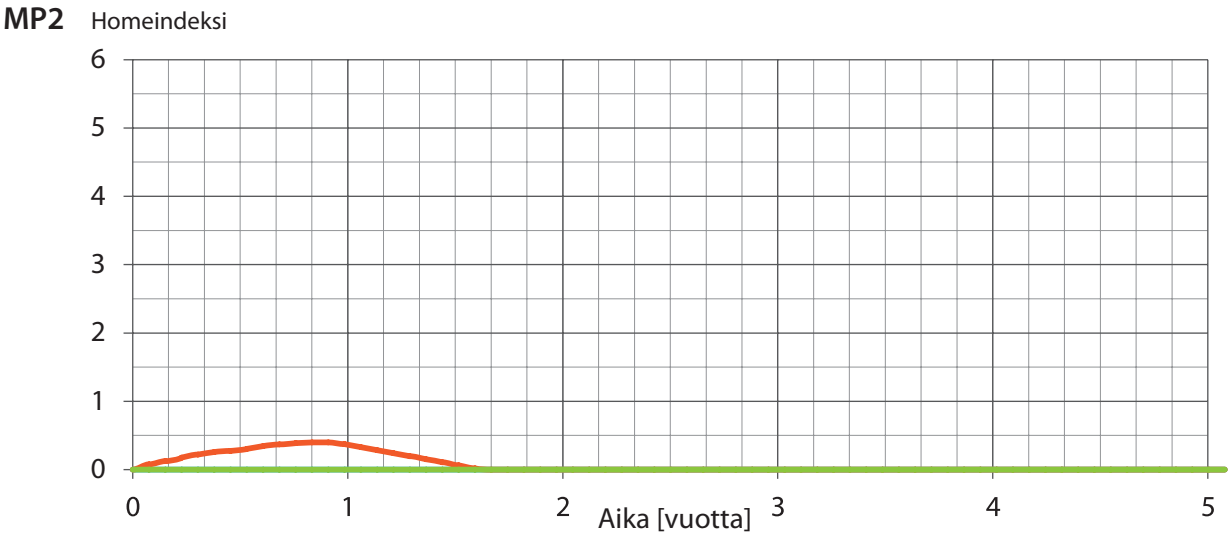


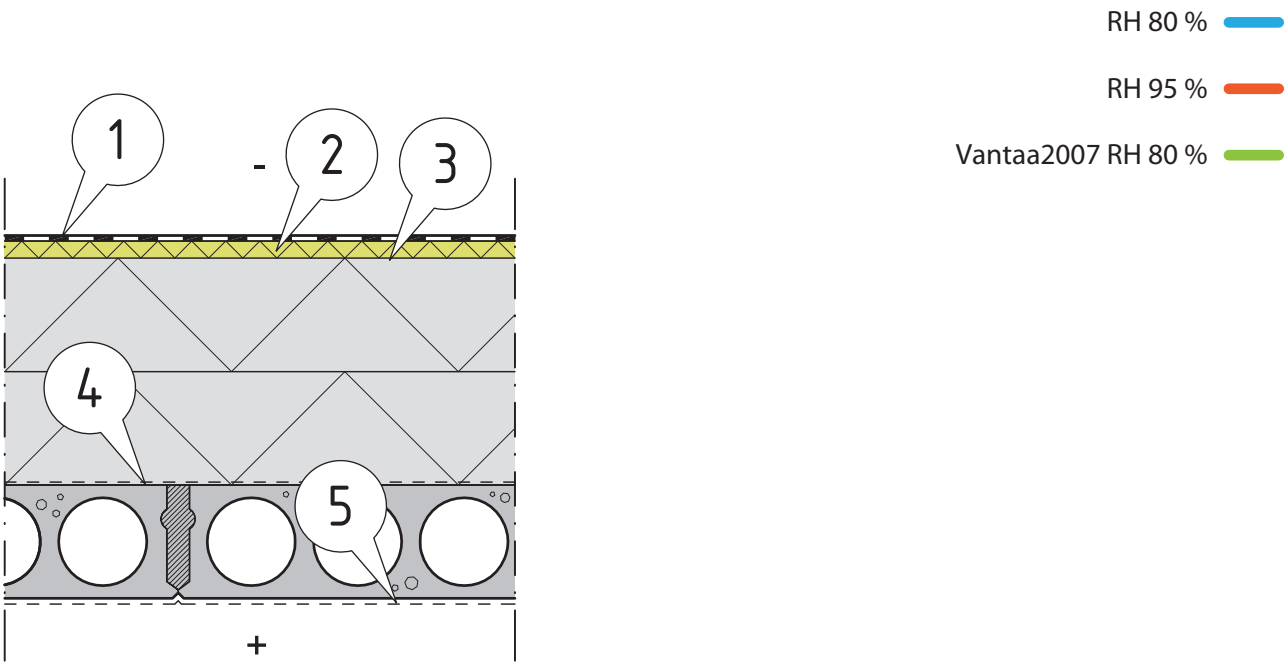
RH 80 %
RH 95 %
Vantaa2007 RH 80 %

Kosteuslaskennassa ⁺ käytetty monitorointipiste

YP3

- Vesikate, PVC- tai bitumikermikate
- RIL 107-2012 -ohjeen ja kattoliiton Toimivat katot -ohjeen mukaisesti
- Lämmöneriste, mineraalivilla uritettu $\lambda_U=0,037$ W/mK 60
- kiinnitys mekaanisesti betonialustaan
- Lämmöneriste, mineraalivilla $\lambda_U=0,039$ W/mK 480
- Höyrynsulku
- Tasausbetoni
- Kantava rakenne, TT-laatta rakennesuunnitelman mukaan
- Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti

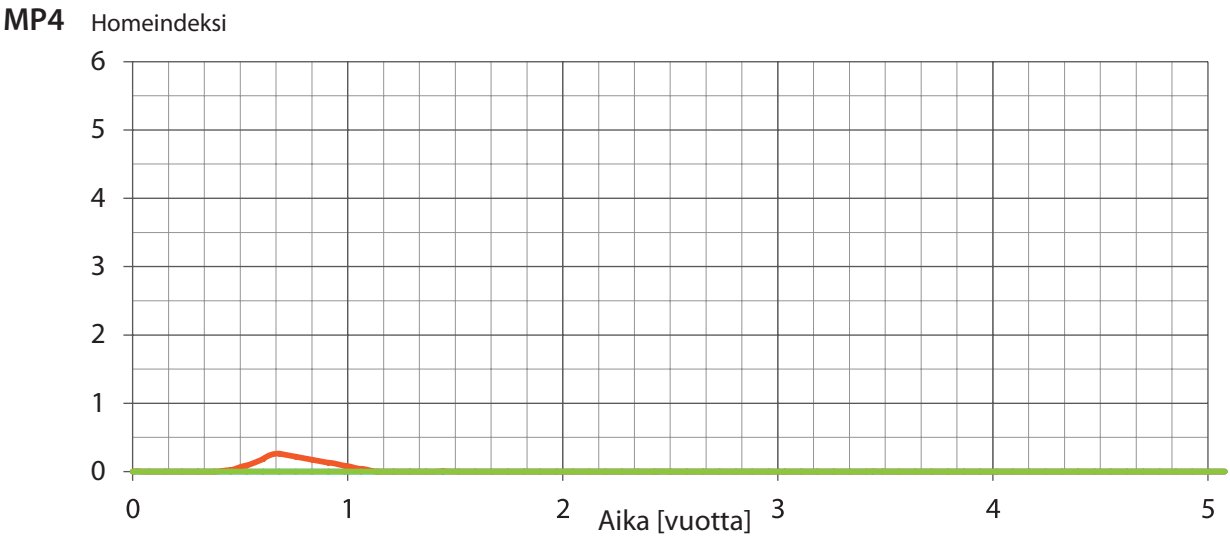
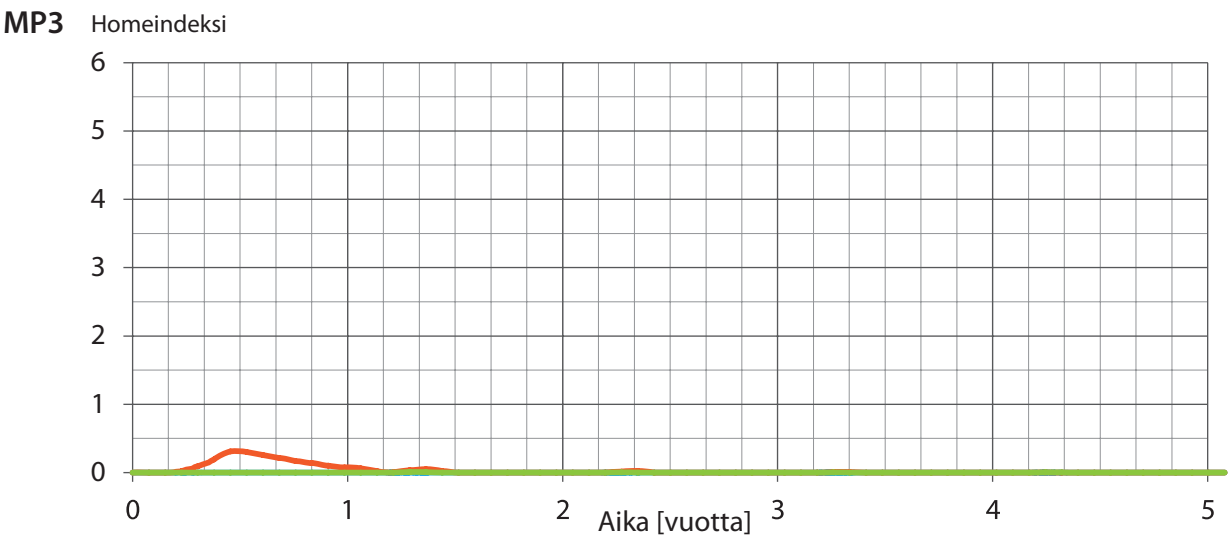
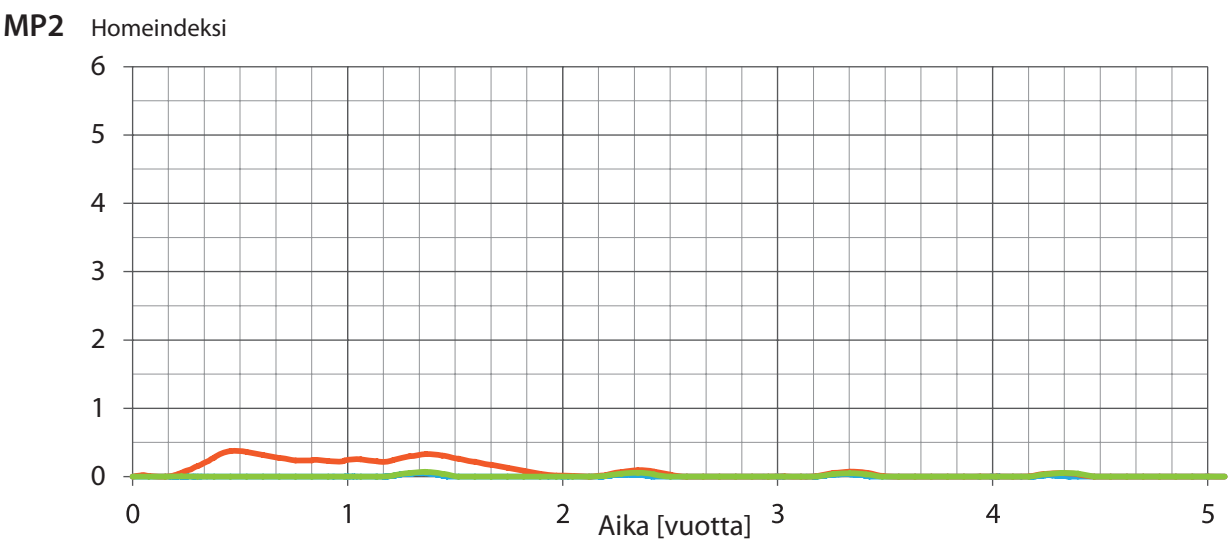


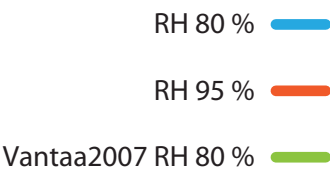
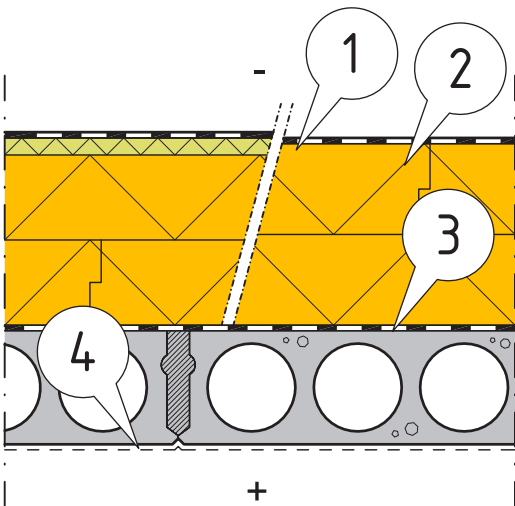


Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

YP4

- Vesikate, PVC- tai bitumikermikate
- RIL 107-2012 -ohjeen ja kattoliiton Toimivat katot -ohjeen mukaisesti
- Lämmöneriste, laakerikerros, mineraalivilla $\lambda_U=0,038$ W/mK 30
- Lämmöneriste, harmaa EPS-katto $\lambda_U=0,031$ W/mK 400
- kiinnitys alustaan erillisillä kiinnikkeillä tai katteen kiinnikkeillä
- Höyrynsulku 0,2
- Tasausbetoni
- Kantava rakenne, ontelolaatta rakennesuunnitelman mukaan
- Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti
- Vedeneristysten kiinnitys ja limitys katevalmistajan ohjeen mukaan.





Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

YP5

Vesikate, RIL 107-2012 -ohjeen ja kattoliiton Toimivat katot -ohjeen mukaisesti

Laakerivillakerros tarvittaessa, katteen vaatimusten mukaan

Lämmöneriste PU, saumat limittäin

320/330

- PU 160+160 mm, $\lambda_U=0,023$ W/mK (ei laakerivillakerrosta) tai

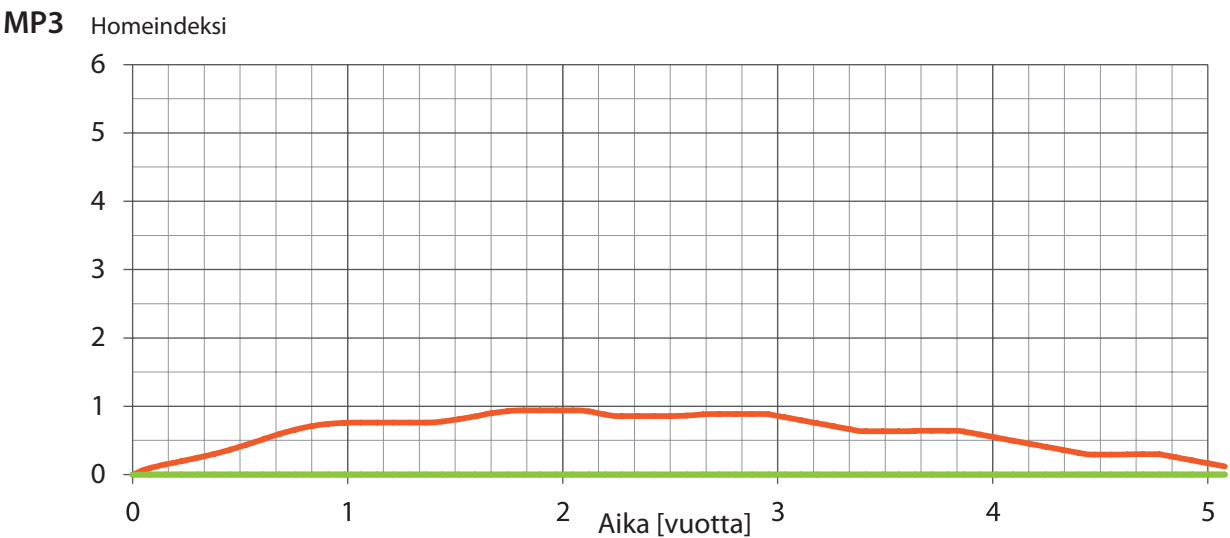
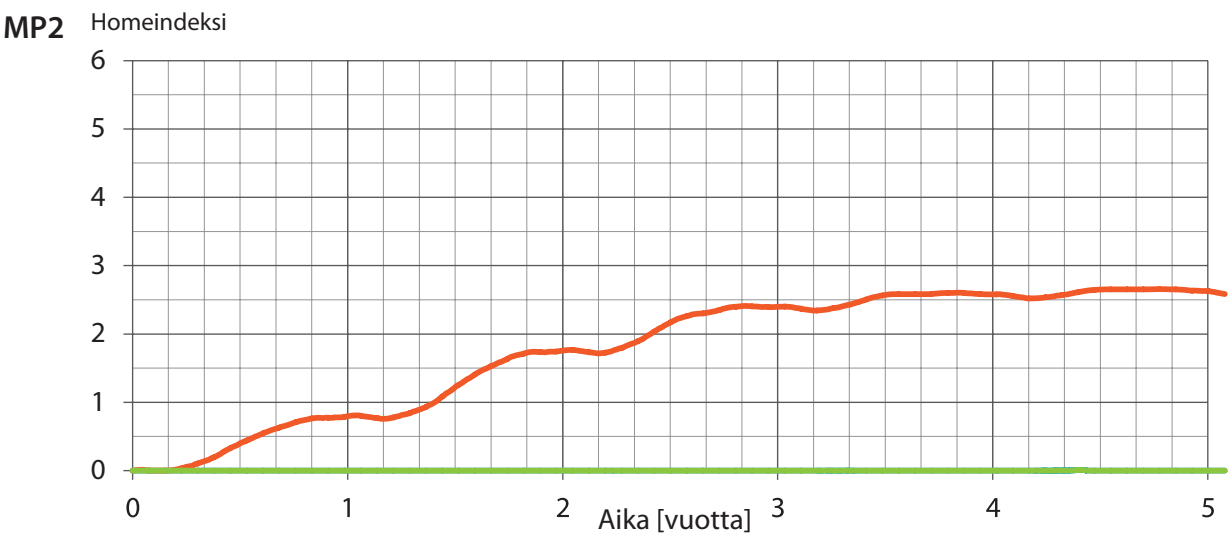
- PU 150+150, $\lambda_U=0,023$ W/mK ja laakerivilla 30 mm, $\lambda_U=0,037$ W/mK

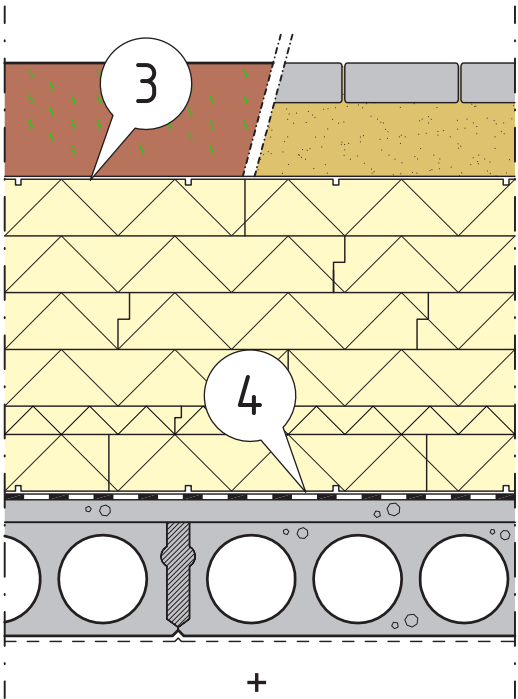
Höyrynsulku, bitumikermi tai vastaava

0,2

Kantava rakenne, ontelolaatta (/TT-laatta/betoni) rakennesuunnitelman mukaan

Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti





Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

YP6

Kasvillisuus istutussuunnitelman mukaan, ruokamultakerros rakenneselostuksen tai istutussuunnitelman mukaan ≤ 200 mm tai betonikivi ja asennushiekka

Diffuusioavoin kangas

Kasvualustaksi tarkoitettu salaojamatto

Lämmöneriste XPS, lujuusluokka kuormituksen mukaan , $\lambda_U=0,039$ W/mK 550

- Ylin ja alin levy uritettu. Ylin kerros asennetaan urat ylöspäin ja alin kerros urat alaspäin.

Uritetut levyt asennetaan niin, että urat muodostavat yhtenäisen kanaviston, joka tuuletetaan kattokaivojen avulla.

Salaojamatto

Vedeneriste, käyttöluokka VE80R, ylin kermi juurisuojattu

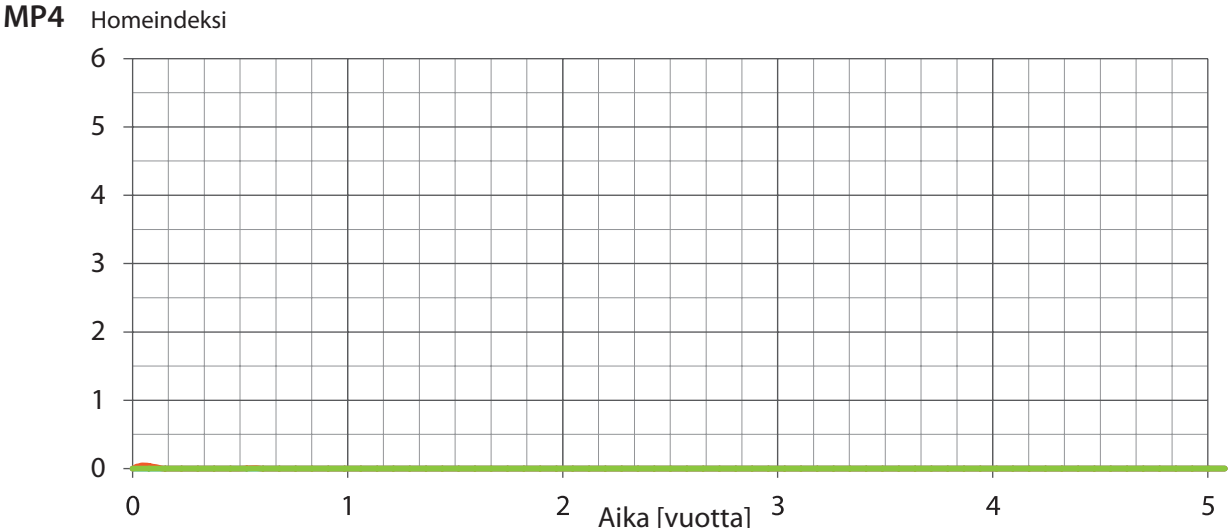
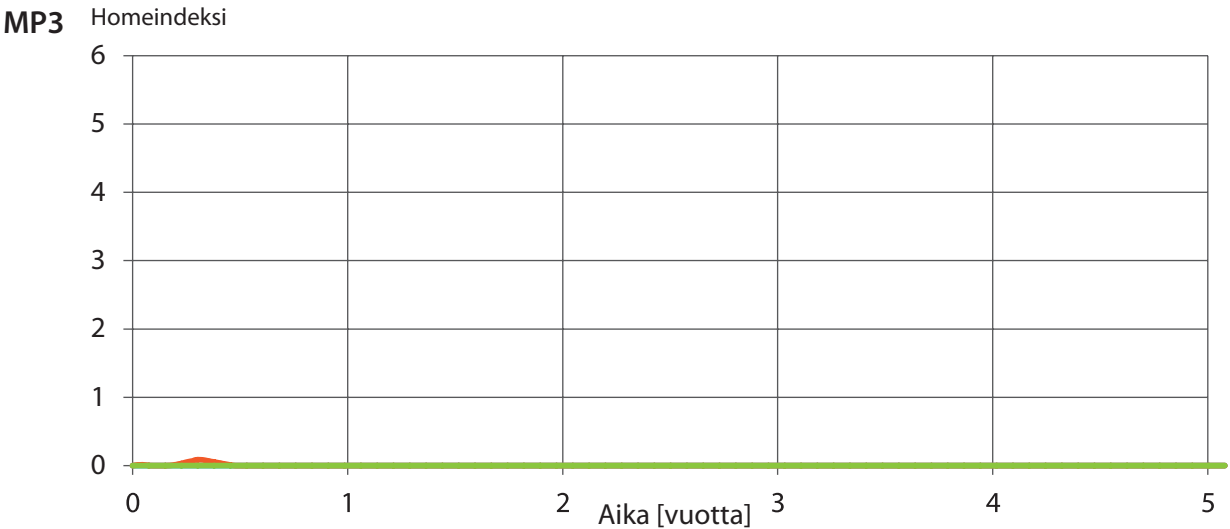
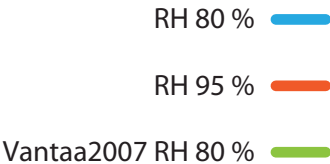
Tasausbetoni rakennesuunnitelman mukaan

Kantava rakenne, ontelolaatta (/TT-laatta/betoni) rakennesuunnitelman mukaan

Pintamateriaali tai - käsittely, huoneselostuksen mukaisesti

YLÄPOHJA 6

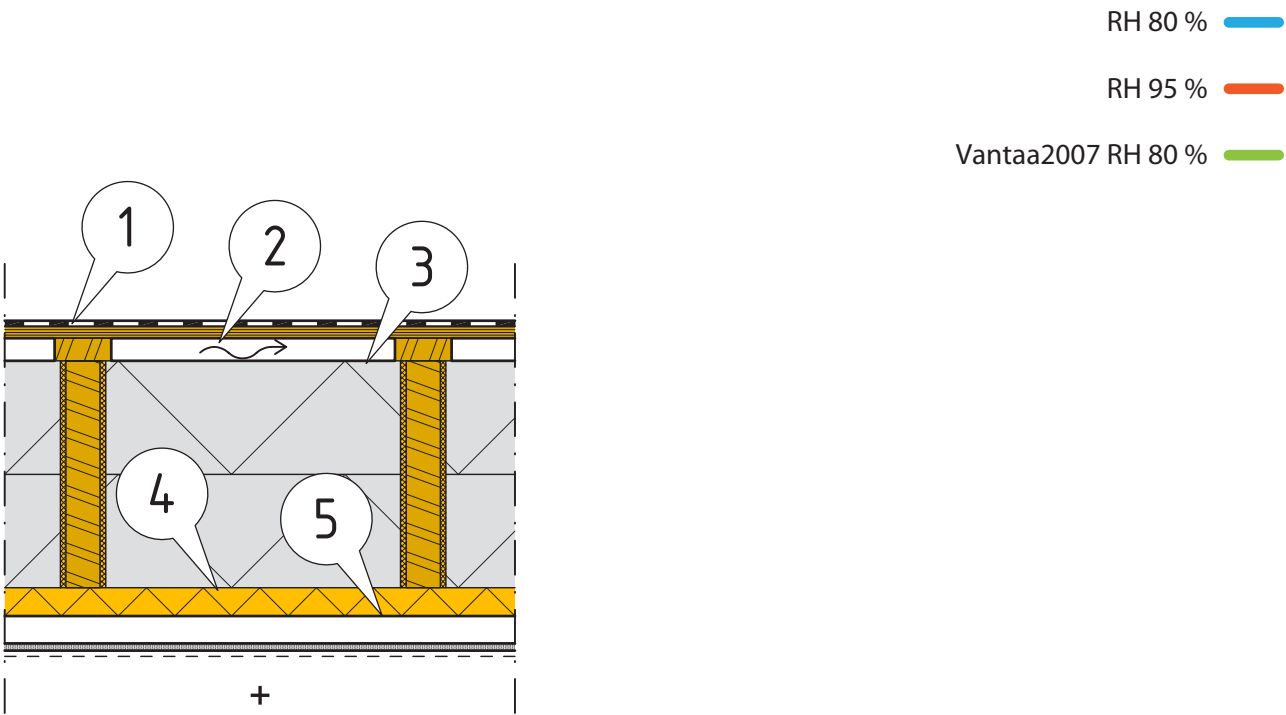
Viherkaton (YP6) rakenteena on ns. käännetty katto, eli rakenteen vedeneristys on lämmöneristyskerroksen alla. Rakenteen lämmöneristyksessä voi olla kosteutta koko sen elinkaaren ajan. Viherkaton kasvustossa on aina bakteeri- ja mikrobitoimintaa, joten mikrobeja löytyy silloin myös lämmöneristyskerroksesta. Siksi katon homeriskien laskennallinen analyysi ei ole mielekäästä. Rakenteen ehdoton toimintaedellytys on vedeneristyksen säilyminen ehjänä.



YLÄPOHJAT 7 JA 8

Puurakenteisten jyrkkien ja loivien kattojen tuuletusvälin korkeudeksi suositellaan vähintään 100 mm (Toimivat katot 2013. Kattoliitto Ry). Molempien yläpohjarakenteiden toimivuuden varmistaminen edellyttää korkeampaa tuuletusväliä. Pienillä katon osilla tuuletusvälin korkeus voi olla tapauskohtaisesti pienempi.

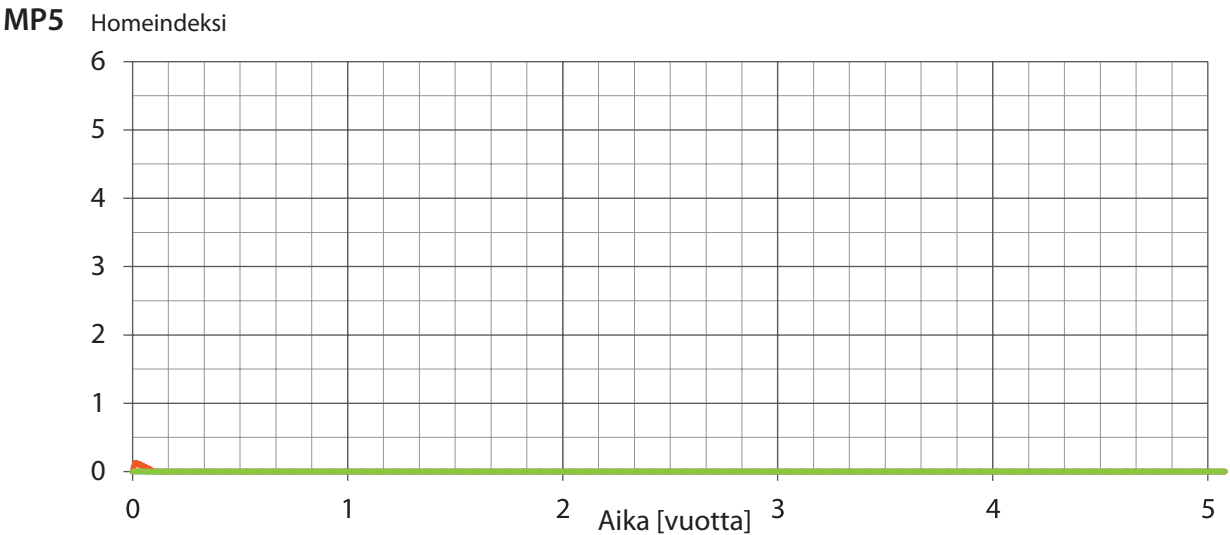
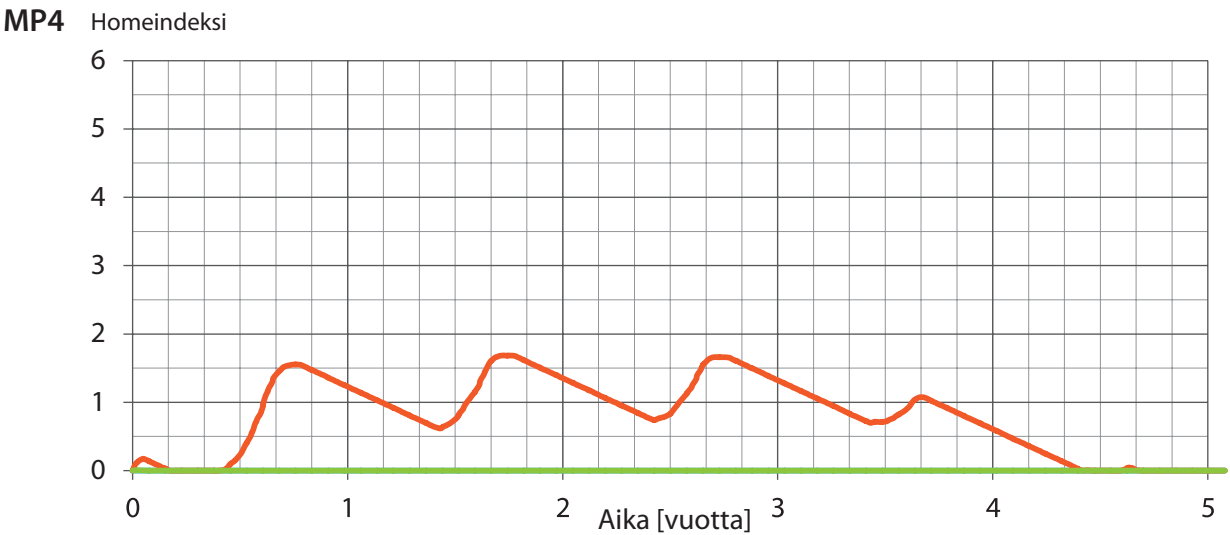
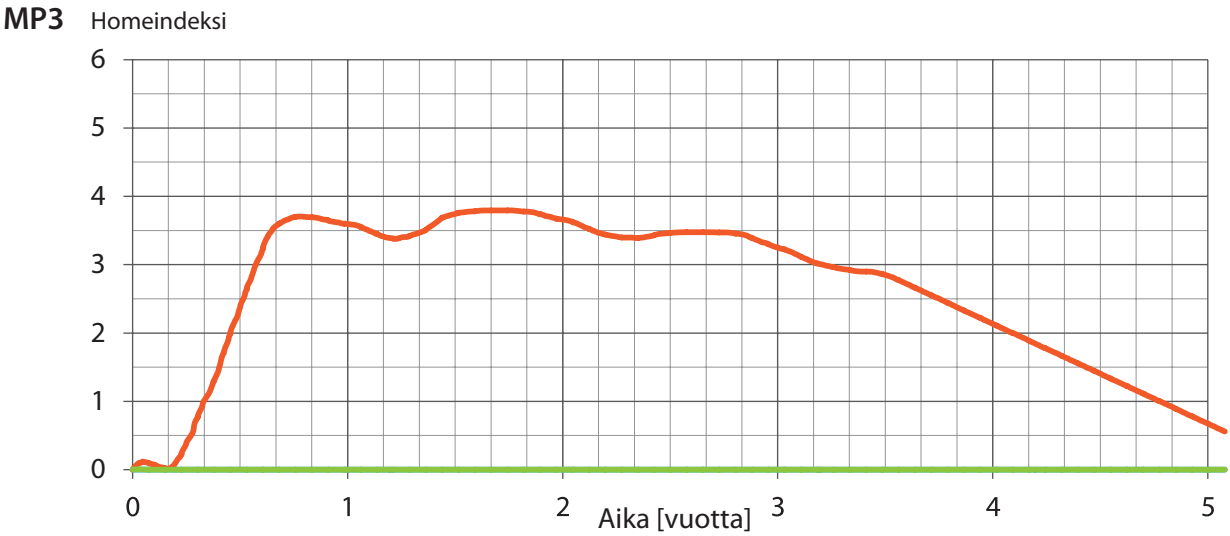
Yläpohjien YP7 ja YP8 kostuneiden puuvasojen kuivuminen voi kestää kauan, vaikka rakenne tuulettuisi kunnolla. Laskennassa oletettiin kattojen polyuretaanilämmöneristeiden kostuneen oletettuihin tasapainokosteuksiin kauttaaltaan. Umpisoluisten muovieristeiden kostuminen esimerkiksi varastoinnin aikana ilman kosteuden vaikutuksesta ilman suurta lämpötilaeroa ei ole todennäköistä. Siksi laskenta kuvaa lähinnä teoreettista tilannetta, jossa merkittävin tekijä on lämmöneristeen pieni vesihöyrynsyövyttävyyden johtavuus. Hyvin tuuletettuna kattotyyppi on ongelmaton, kun rakentamisen kuivaketju on kunnossa.



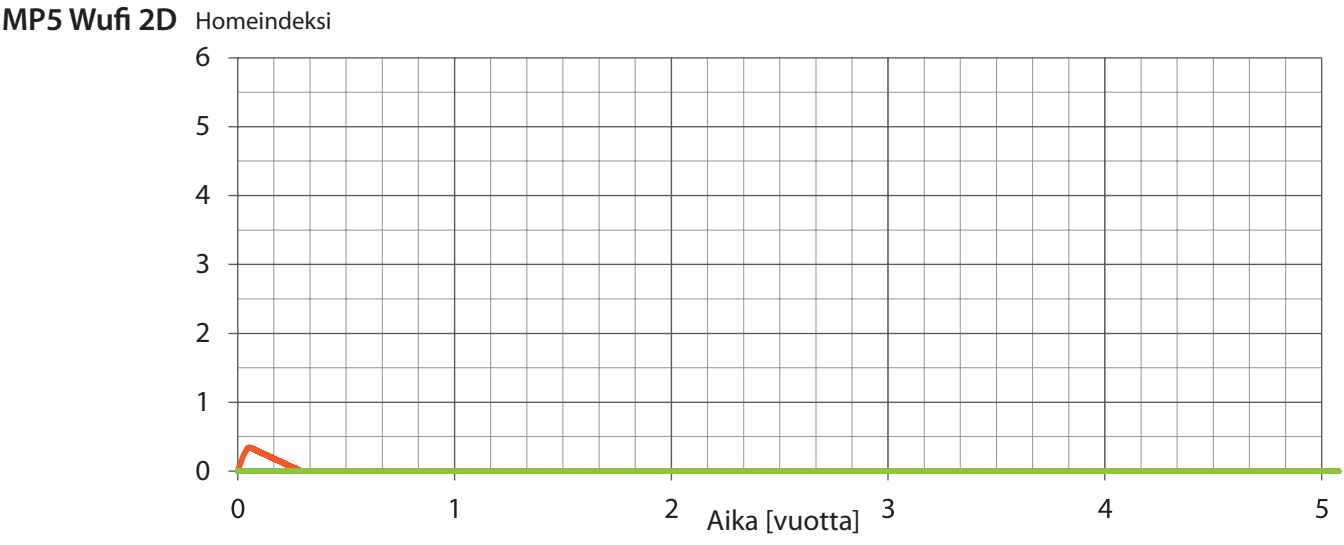
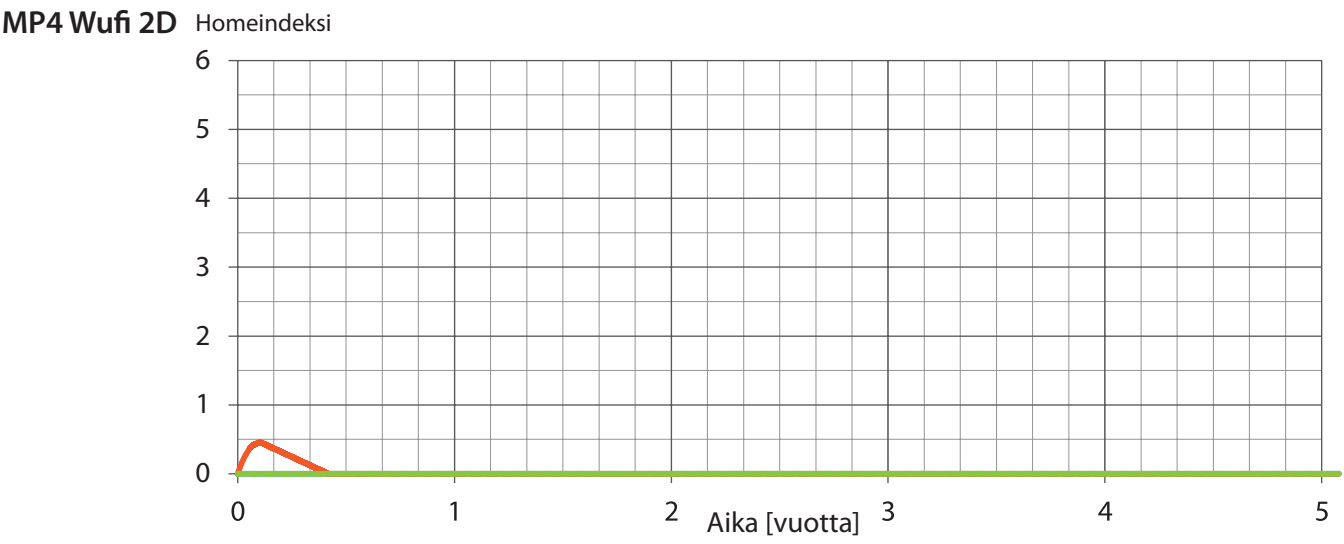
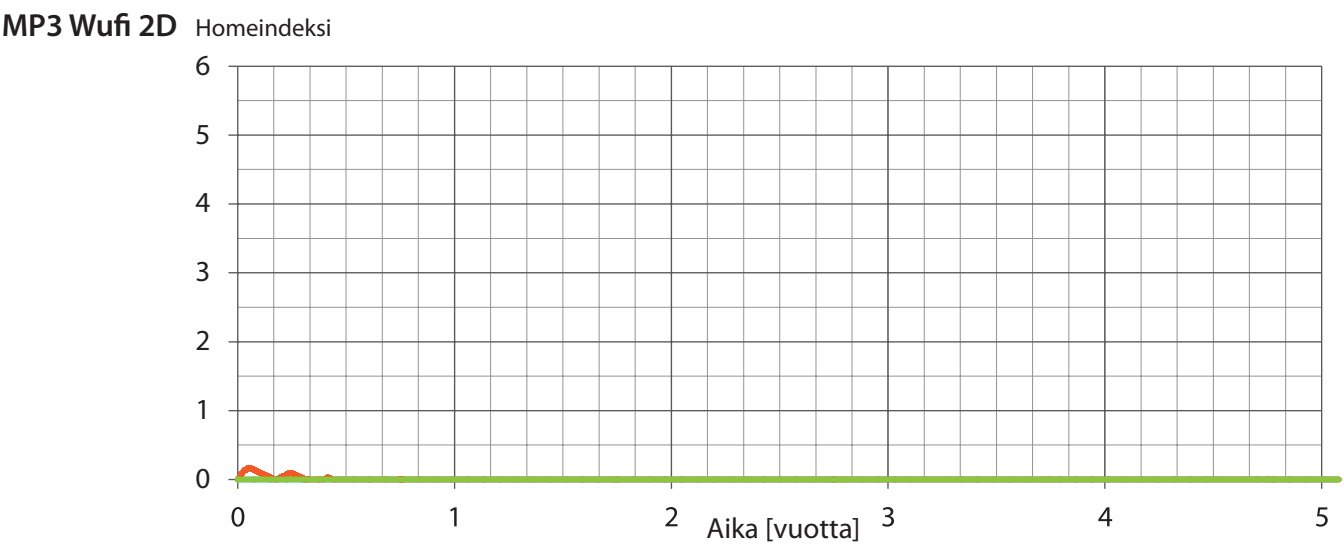
Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

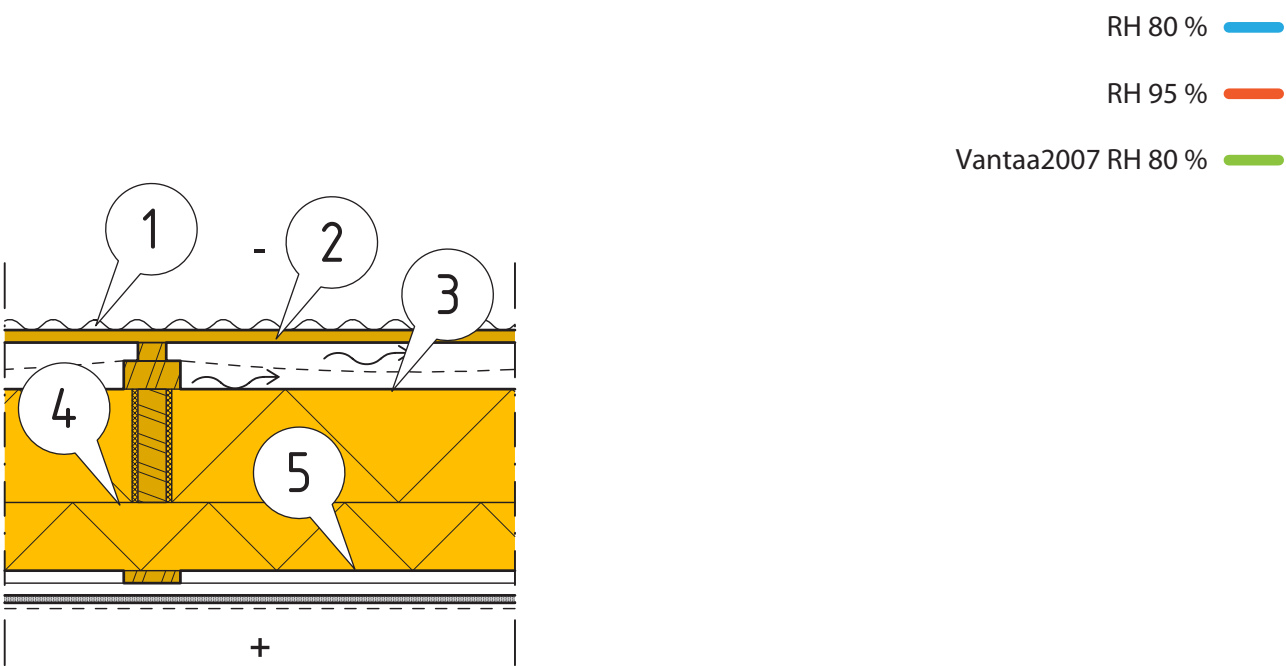
YP7

- Vesikate, RIL 107-2012 -ohjeen ja kattoliiton Toimivat katot -ohjeen mukaisesti
- Pontattu vesikattovaneri
- Tuuletusrako ≥ 40 mm 40
- Lämmöneriste harmaa EPS-katto, $\lambda_U=0,031$ W/mK,
- kantava kattovasa rakennesuunnitelman mukaan k600...900 400
- Lämmöneriste tiivistetään kattovasioihin elastisella PU-vaahdolla.
- Lämmöneriste PU, $\lambda_U=0,023$ W/mK, saumat teipattu 50
- Koolaus 48x48 mm k600 48
- Rakennuslevy 13
- Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti



RH 80 %
RH 95 %
Vantaa2007 RH 80 %





Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

YP8

Vesikate, RIL 107-2012 -ohjeen ja kattoliiton Toimivat katot -ohjeen mukaisesti

Ruodelaudoitus ja korokerimat katteen vaatimusten mukaan

Aluskate

Tuuletusväli ≥ 50 mm, tarvittaessa korokepuut 50

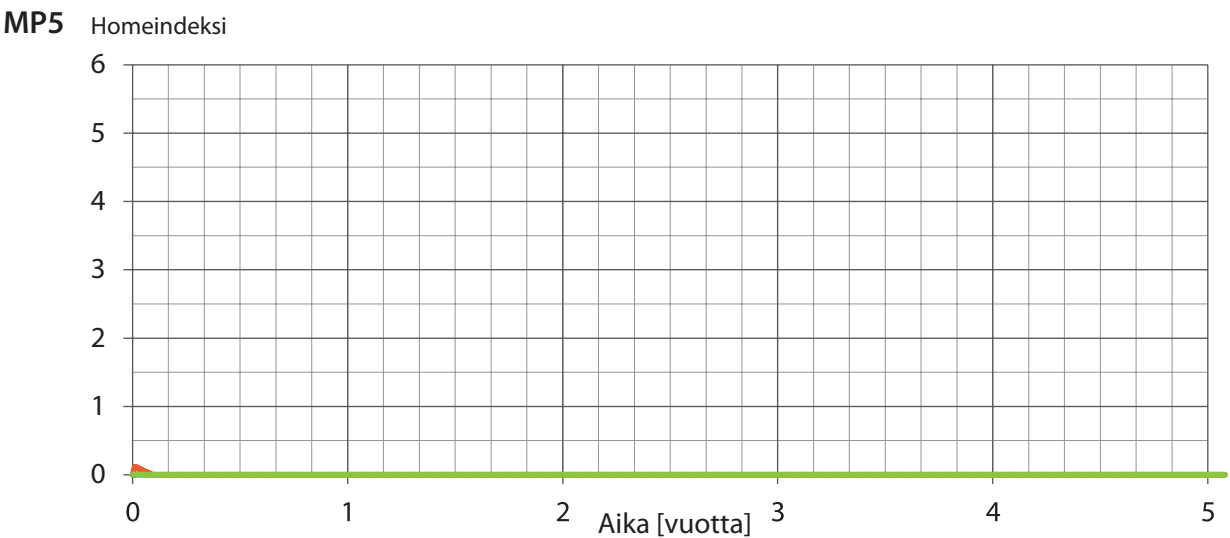
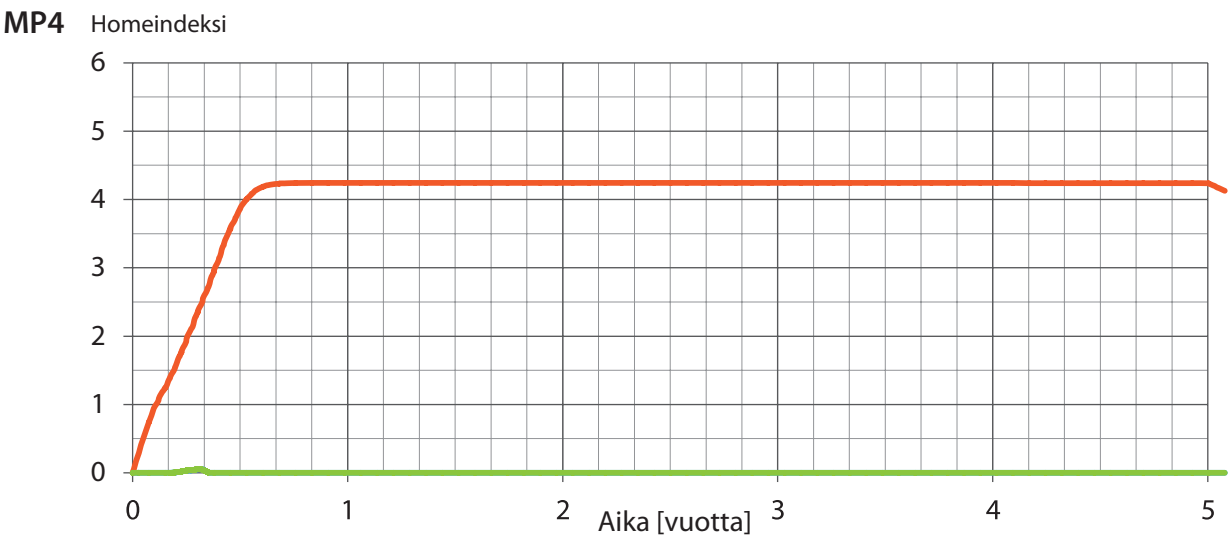
Lämmöneriste PU, $\lambda_U=0,023$ W/mK, saumat vaahdotetaan, kattokannattajat k900 rakennesuunnitelman mukaan 200

Lämmöneriste PU, $\lambda_U=0,023$ W/mK, saumat vaahdotetaan 120

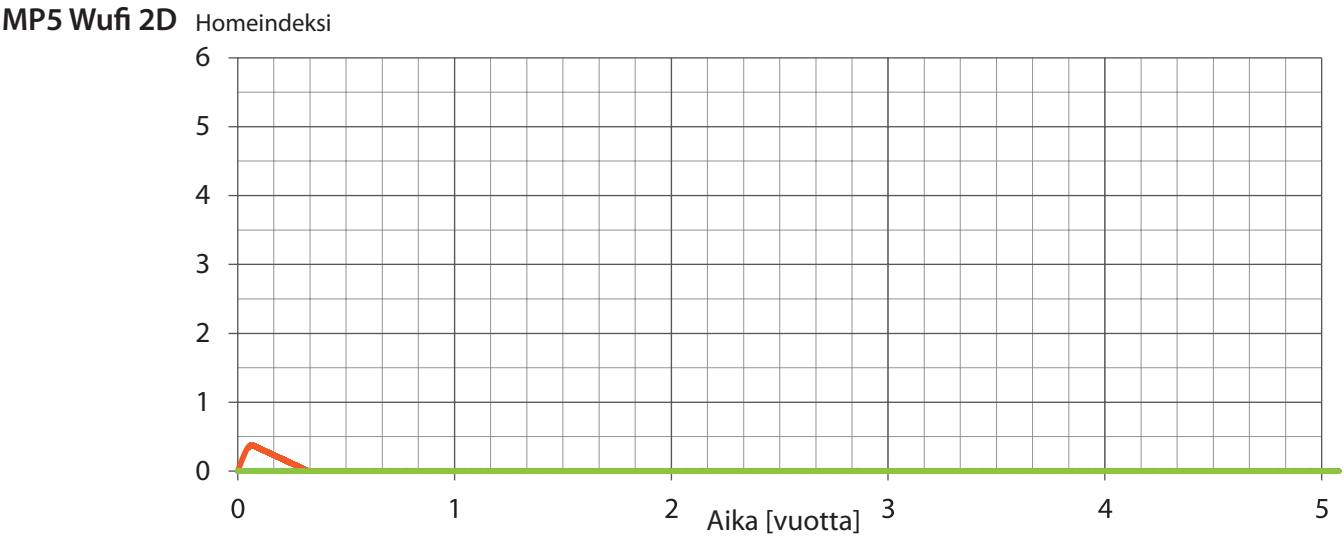
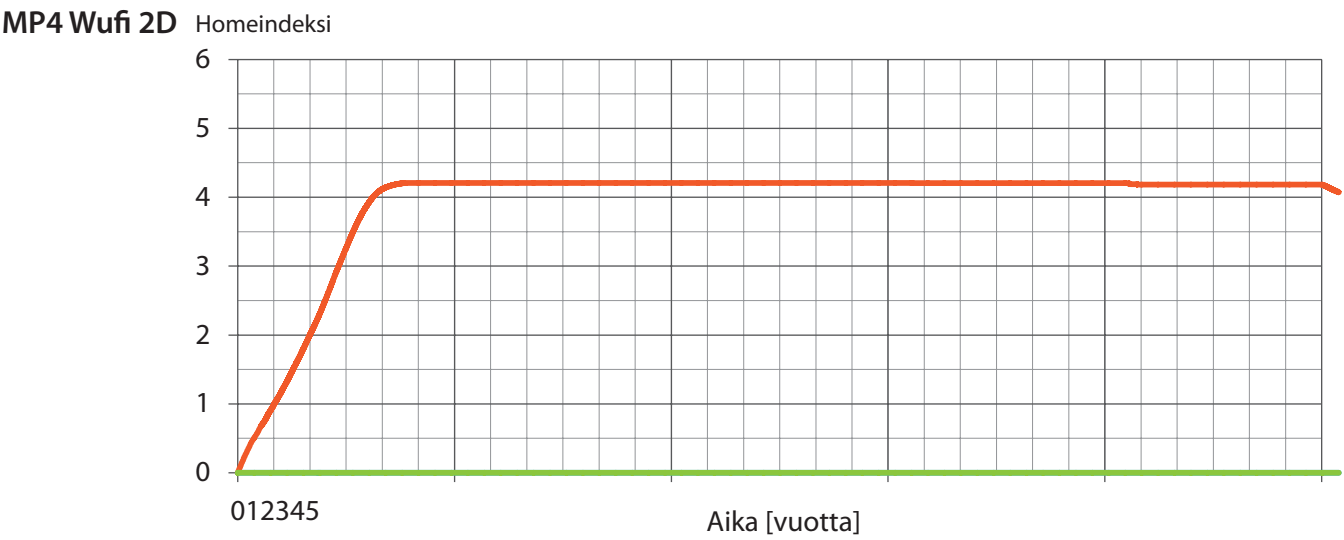
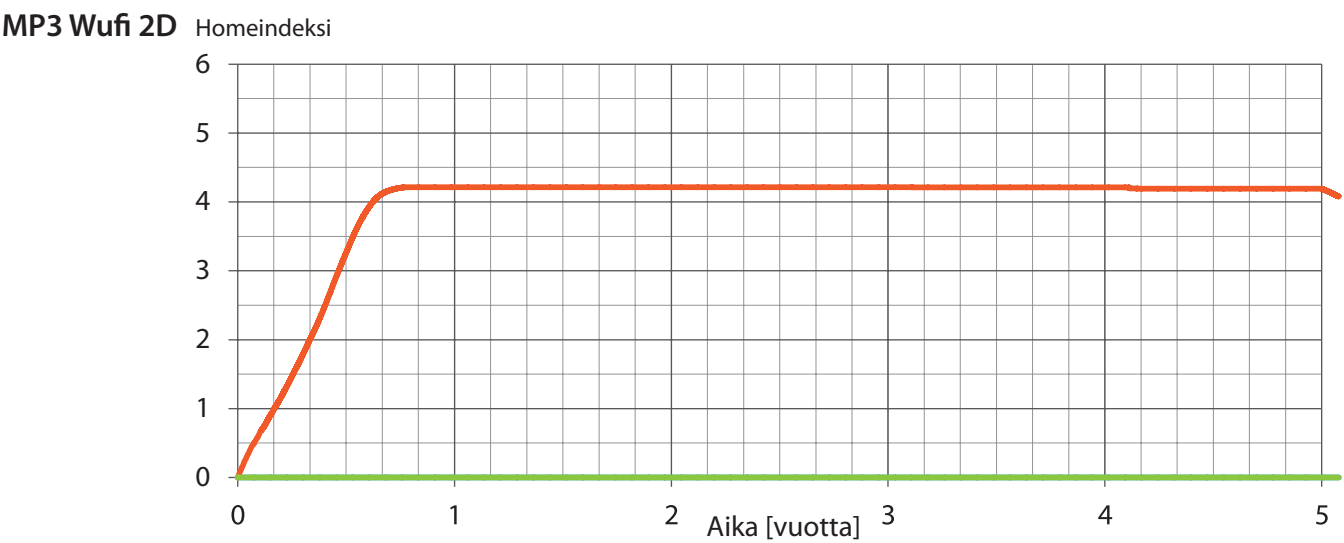
Asennustila, ristiinkollaus 22x100 mm, toisiokannattajat k600 44

Rakennuslevy 13

Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti



RH 80 %
RH 95 %
Vantaa2007 RH 80 %



1 LÄHTÖTIEDOT

Simuloinnissa on käytetty ohjeellisia materiaalitietoja. Pääosin on käytetty laskentaohjelman materiaalikirjaston tietoja betonisten rakenteiden ja puurakenteiden tietona. Eristeiden ominaisuudet määriteltiin RIL 255-1-2014 mukaisesti ja muiden rakenteiden materiaalitiedot verrattiin mainittuun RIL-julkaisuun. Betonin lähtöarvokosteus määriteltiin kaikissa laskentatapauksissa olevan RH = 90 %.

	Tiheys [kg/m ³]	Huokoisuus [m ³ /m ³]	Ominaislämpö kapasiteetti [J/kgK]	Lämmön- johtavuus [W/mK]	Diffuusio- vastuskerroin ⁽¹⁾ [-]	Alkukosteus RH = 80 % kg/m ³	Alkukosteus RH = 95 % kg/m ³
3-kerrosrappaus, pintarappaus	1890	0,2	850	1,6	58,0	81,8	81,8
3-kerrosrappaus, täyttörappaus	1970	0,18	850	1,6	69,0	77,2	77,2
3-kerrosrappaus, tartuntarappaus	1990	0,18	850	1,6	99,0	78,4	78,4
Ohutrappaus	1890	0,2	850	1,6	58,0	81,8	81,8
Mineraalivilla	80	0,95	850	0,036...0,040	1,3	0,56	0,87
Harmaa EPS eriste	20	0,95	1500	0,031	50,0	0,18	0,35
Betoni C35/45	2220	0,18	850	1,6	70,0	95,6	95,6

Taulukko 1. Simuloinnissa käytetyt materiaaliominaisuudet –
rapatut julkisivut.

Diffuusiovastuskerroin on yksikötön suure, joka kuvaa kuinka paljon suurempi materiaalin diffuusiovastus on verrattuna saman paksuiseen ilmakerrokseen. Rakennekerroksen diffuusiovastus $S_d = \mu \times d$ [m].

	Tiheys [kg/m ³]	Huokoisuus [m ³ /m ³]	Ominaislämpö- kapasiteetti [J/kgK]	Lämmön- johtavuus [W/mK]	Diffuusio- vastuskerroin ⁽¹⁾ [-]	Alkukosteus RH = 80 % kg/m ³	Alkukosteus RH = 95 % kg/m ³
Puujulkisivu	430	0,73	1600	0,14	83,3	77,5	117,5
Ilmakerros 22 mm	1,3	0,999	1000	0,142	0,53	1,88	7,8
Tuulensuojalevy, puukuitu	300	0,8	1500	0,05	7,5	40,0	73,3
PU -eriste	30...40	0,95	1500	0,025	2100	2,25	2,95
Mineraalivilla	35	0,95	850	0,036...0,040	1,3	0,56	0,87
Puukuitueriste	37	0,9	1880	0,04	1,55	5,6	14,0
Harmaa EPS eriste	20	0,95	1500	0,031	50	0,18	0,35
OSB levy	630	0,6	1500	0,13	650	95,0	168,6
Höyrynsulku	130	0,001	2300	2,3	100 000	0,0	0,0
Kipsilevy	700	0,77	1100	0,19	6,9	6,3	19,0

Taulukko 2: Simuloinnissa käytetyt materiaaliominaisuudet –
tuulettuvat, puurunkoiset julkisivut.

Diffuusiovastuskerroin on yksikötön suure, joka kuvaa kuinka paljon suurempi materiaalin diffuusiovastus on verrattuna saman paksuiseen ilmakerrokseen. Rakennekerroksen diffuusiovastus $S_d = \mu \times d$ [m].

	Tiheys [kg/m ³]	Huokoisuus [m ³ /m ³]	Ominaislämpö- kapasiteetti [J/kgK]	Lämmön- johtavuus [W/mK]	Diffuusio- vastuskerroin ⁽¹⁾ [-]	Alkukosteus RH = 80 % kg/m ³	Alkukosteus RH = 95 % kg/m ³
Betoninen sisä- ja ulkokuori	2220	0,18	850	1,6	0,70	95,6	95,6
Ilmakerros 3 mm	1,3	0,999	1000	0,047	0,79	1,88	7,77
Harmaa EPS eriste	20	0,95	1500	0,031	50,0	0,18	0,35
Mineraalivilla	60	0,95	850	0,036...0,040	1,3	0,56	0,87
PU -eriste	30...40	0,95	1500	0,023	2100,0	2,25	2,95

Taulukko 3: Simuloinnissa käytetyt materiaaliominaisuudet –
betonisandwich-elementtijulkisivutrapatut julkisivut.

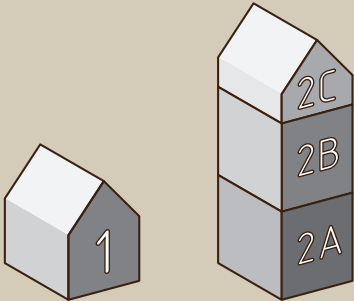
Diffuusiovastuskerroin on yksikötön suure, joka kuvaa kuinka paljon suurempi materiaalin diffuusiovastus on verrattuna saman paksuiseen ilmakerrokseen. Rakennekerroksen diffuusiovastus $S_d = \mu \times d$ [m].

1.1 Tarkastelun oletukset

Suure	Arvo	Referenssi
Lämpö- ja kosteuslähteet		
Kosteuskuorma	1 %	Osuus viistosateesta, ASHRAE 160 (ASHRAE 2009) mukaan. Tyvek-pintaissa tuulensuojalevyissä ei ei ulkopuolista kosteuskuormaa.
Tuuletusraon ilmanvaihtoluku	100 h ⁻¹	
Geometria		
Kallistuskulma	90°	
Rakennuskorkeus	Tapaus 1	Kuvan 1 mukaan
Pinnan siirtokertoimet		
Ulkopinnan lämmönvastus	0,04 m ² K/W	SRakMK C4:n mukaan
Ulkopinnan S _d -arvo	-	
Lyhytaaltainen absorptiokerroin	0,4	Vaalea
Sateen absorptiokerroin	0,7	Kallistuksen ja rakennetyypin mukaan
Sisäpinnan lämmönvastus	0,13 m ² K/W	SRakMK C4:n mukaan
Sisäpinnan S _d -arvo	-	
Alkuolosuhteet		
Alkukosteus	80 % 95 % 90 %	Normaali tilanne Kostunut Betonirakenteet kaikissa tapauksissa
Alkulämpötila	10 °C	
Laskentajakso		
Tarkasteluaika	5 vuotta	1.1.2015 – 1.1.2020
Simuloinnin aika-askel	1 h	

Taulukko 4. Simuloinnissa käytetyt lähtötiedot.

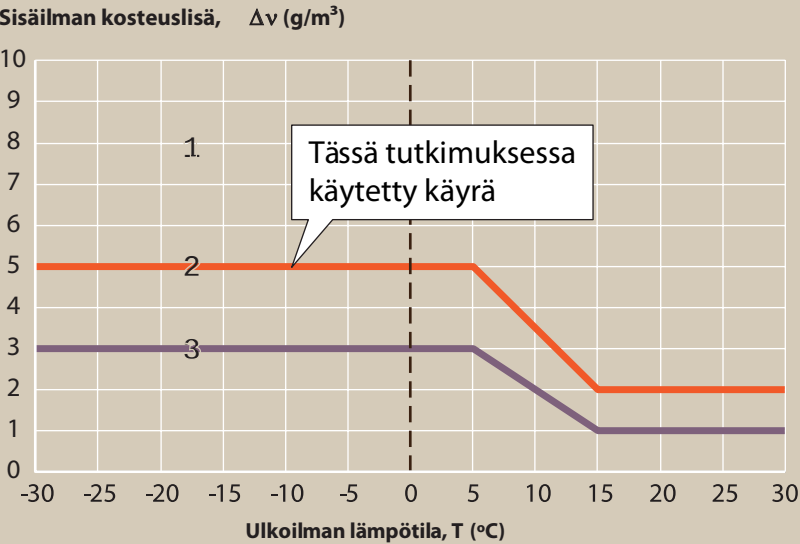
Kuva 1: Simuloinnissa käytettävä rakennuskorkeus ja viistosadekertoimien määrittely.

			R1	R2
1	Matala rakennus, enintään 10 m		0	0,07
2A	Korkea rakennus, alaosa, enintään 10 m		0	0,05
2B	Korkea rakennus, keskiosa, 10–20 m		0	0,1
2C	Korkea rakennus, yläosa, yli 20 m		0	0,2
Sadekuorma = Sade x (R1 + R2 x Tuulinopeus)				

1.2 Ilmasto

Taulukko 5. Tarkastelussa käytetyt ilmastotiedot.

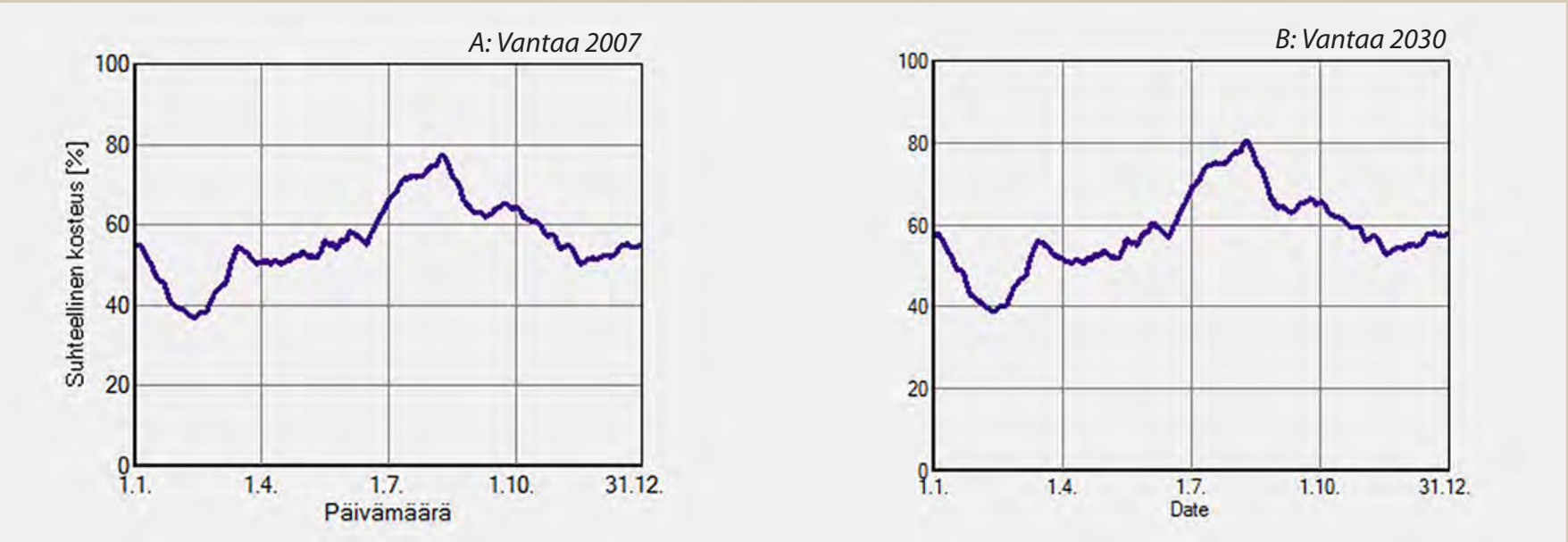
Suure	Arvo	Referenssi
Ulkoilmasto	Vantaa 2030 ja Vantaa 2007	Liite 5
Ilmansuunta	Etelä	Liite 5
Sisäilman lämpötila	21 °C	
Sisäilman kosteuslisä	Käyrä 2	Kuva 2
Sisäilman suhteellinen kosteus	Käyrä B ja A	Kuva 3



Kuva 2. Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot (RIL 107-2012).

- 1 Kylpylät, uimahallit, laitoskeittiöt, pesulat, panimot, kirjapainot, kasvihuoneet, kostutetut tilat, ratsastusmaneesit, maatalouden tuotantorakennukset, eläinsuojat, teollisuuden kosteusrasitetut tilat
- 2 Asuinrakennukset, toimisto- ja liikerakennukset, hotellit ja majoitusrakennukset, ravintolat, kokoontumis- ja juhlatilat, opetusrakennukset ja päiväkodit, sairaalat ja hoitolaitokset, museot, liikuntahallit ja -tilat, jäähallit ja jäähdytetyt liikuntatilat, kylmä- ja pakkashuoneet, talviasuttavat vapaa-ajan asunnot
- 3 Vapaa-ajan asunnot, puolilämpimät tai kylmillään olevat rakennukset, varastot ja säilytystilat, ajoneuvosuojat

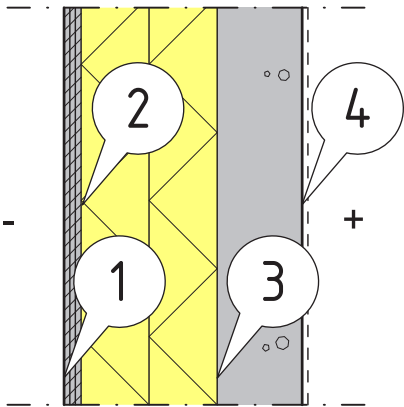
Kuva 3. Sisäilman suhteellinen kosteus sisälämpötilan ollessa 21 C. Kosteuslisä "Kuva 2, käyrä 2" mukaisesti.



2 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

ULKOSEINÄT 1, 2A JA 2B

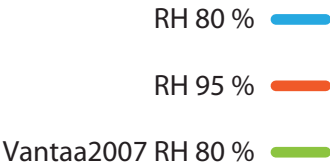
Rapattujen ulkoseinien, joiden ulkoverhouksena on lämmöneristyskerroksen päälle tehty rappaus, toimivuus riippuu rappauksen ominaisuuksista. Valitun kolmikerroksrappauksen (US1) kokonaisvesihöyrynvastus hidastaa lämmöneristyskerroksen kuivumista. Rakenne tulee suojata kostumiselta rakentamisen aikana. Kun rakenne suojataan rakentamisen aikana, rappauksen alle voi muodostua lievä homeenkasvun riski. Rappaustuotteen valinnalla voidaan vaikuttaa lämmöneristetyin rakenteen kuivumiskapasiteettiin. Valitun ohutrappaustuotteen vesihöyrynläpäisevyys on rakenteen nopean kuivumisen kannalta riittävä. Sekä kolmikerroksrappauksen että ohutrappaauksen sateenpitävyys ovat riittävät.



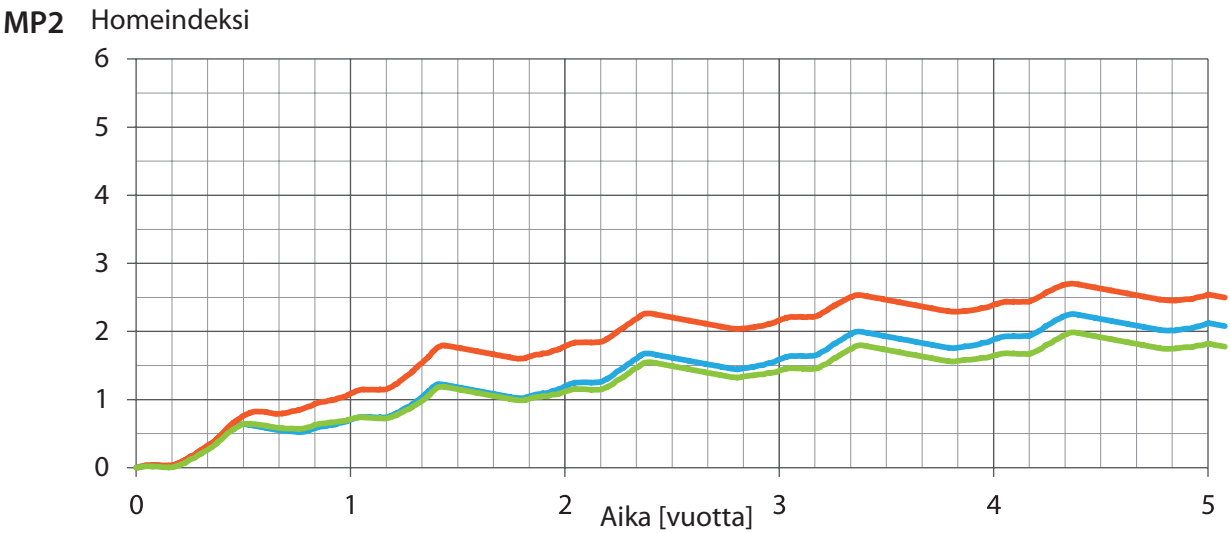
Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

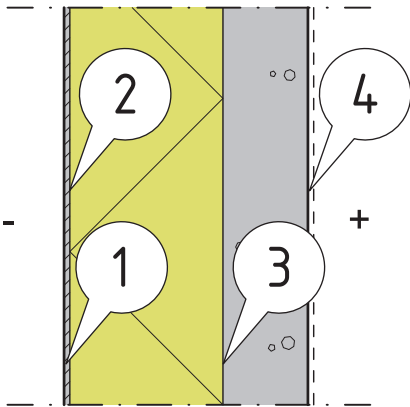
US1

Kolmikerroksrappaus, valmistajan ohjeiden mukaan
Lämmöneriste mineraalivilla, $\lambda_U=0,035$ W/mK
Kantava rakenne, betoniseinä, rakennesuunnitelman mukaan
Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesta



240
150





Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

US2A

Ohutrappaus, valmistajan ohjeiden mukaan

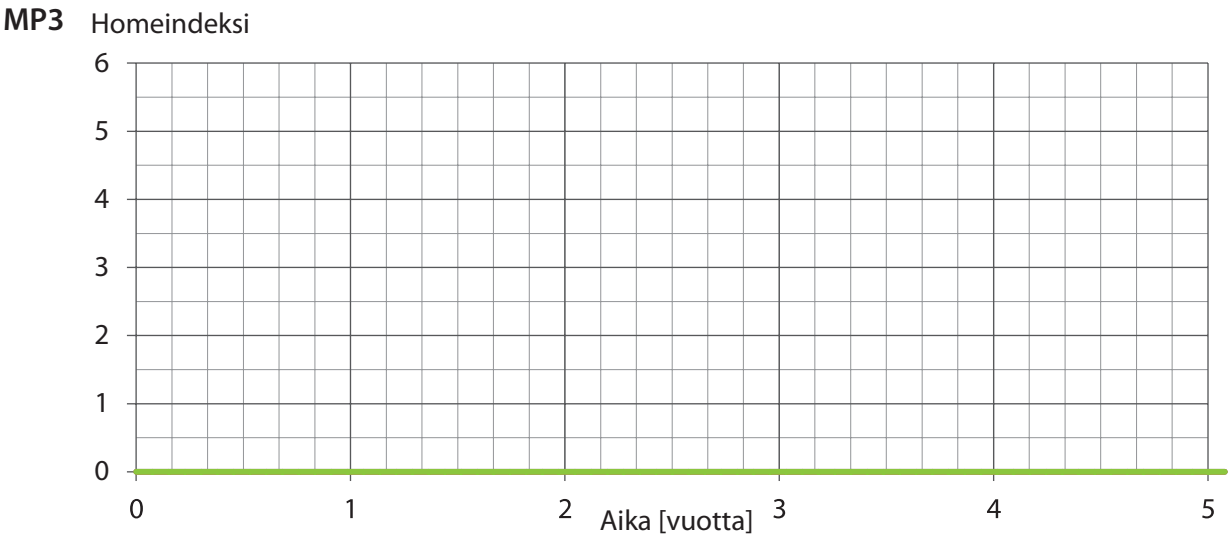
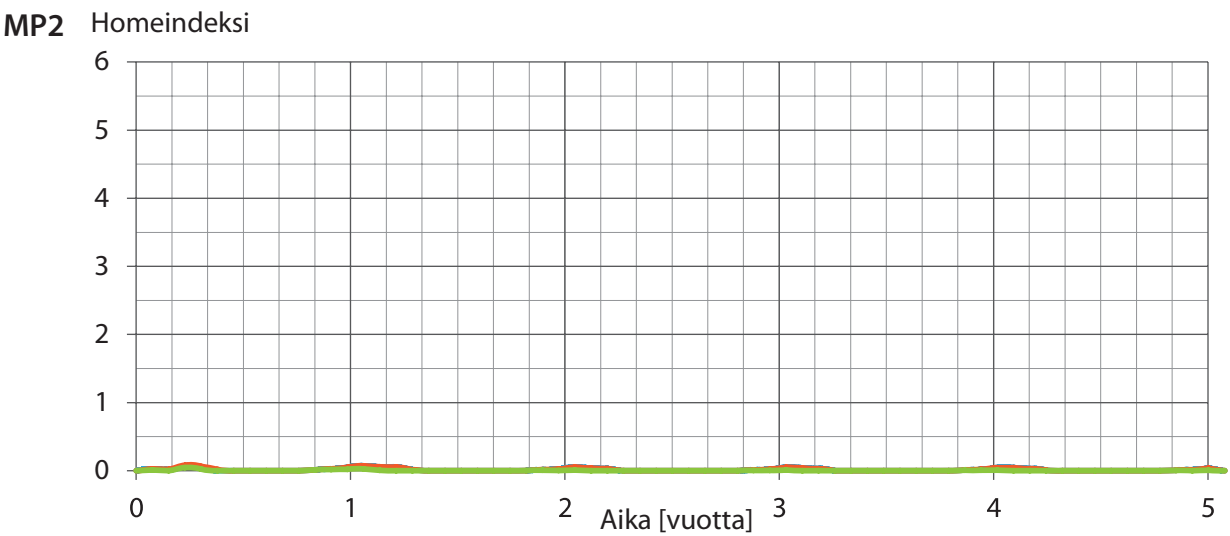
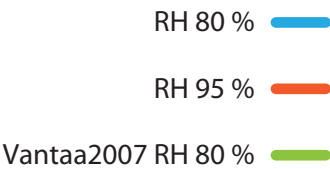
Lämmöneriste mineraalivilla, $\lambda_U=0,040\text{ W/mK}$

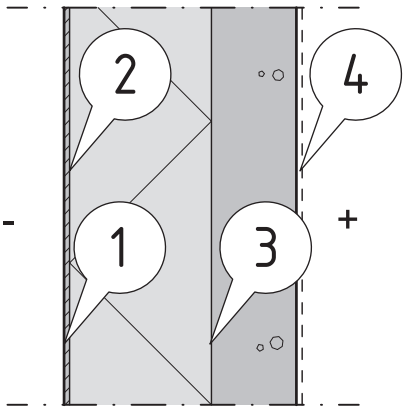
270

Kantava rakenne, betoniseinä, rakennesuunnitelman mukaan

150

Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti





Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

US2B

Ohutrappaus, valmistajan ohjeiden mukaan

Lämmöneriste harmaa EPS-seinäeriste, $\lambda_U=0,031$ W/mK

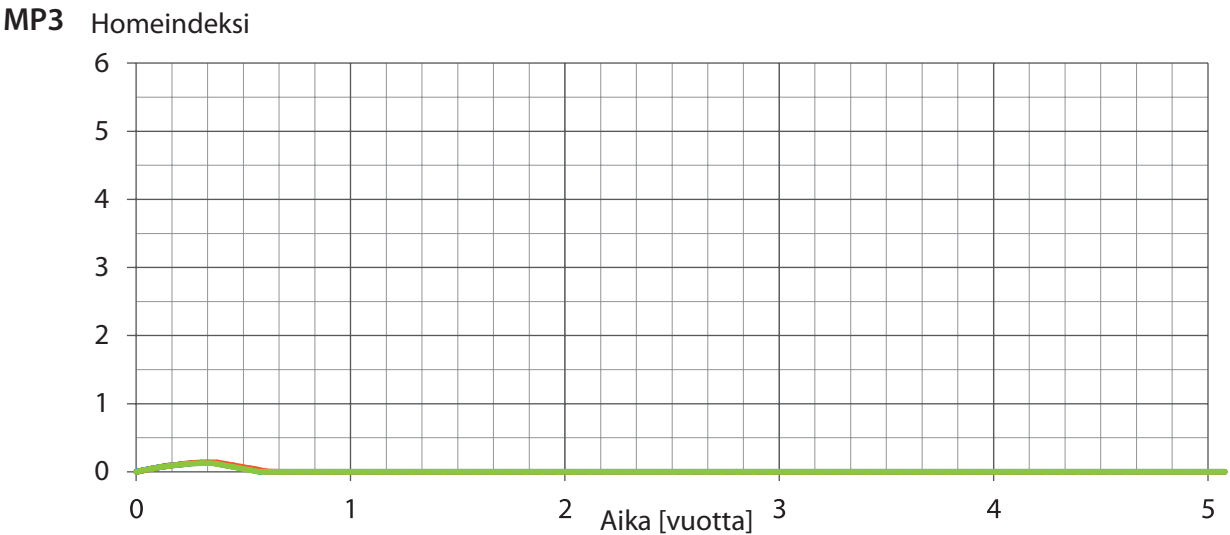
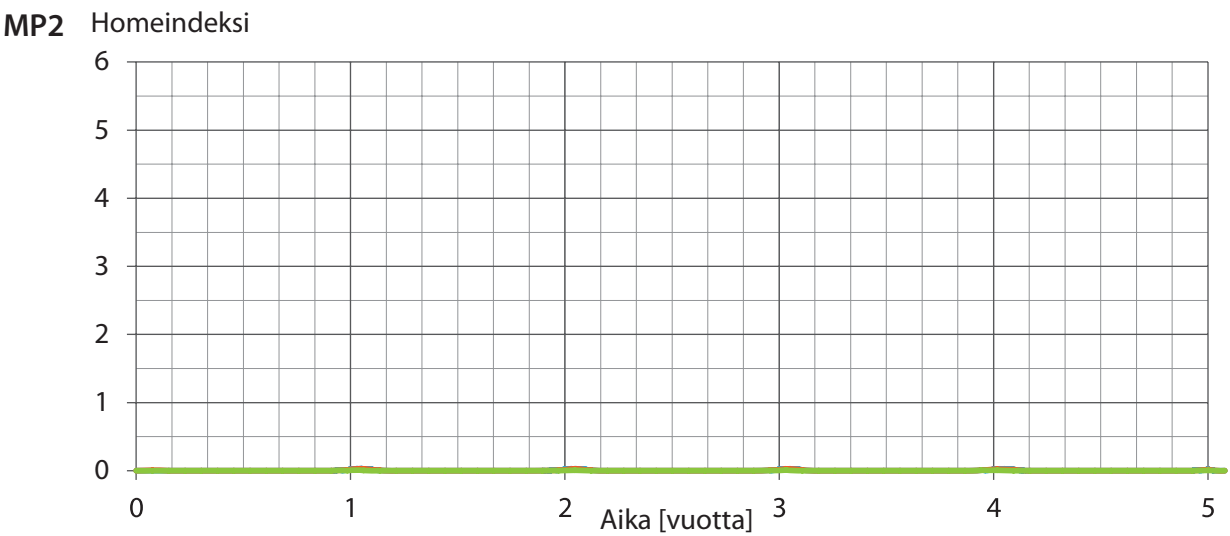
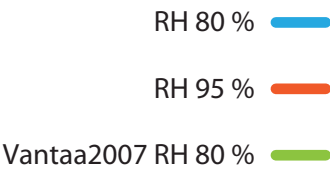
250

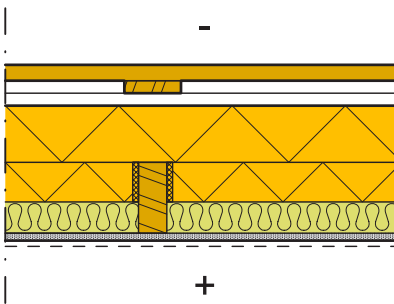
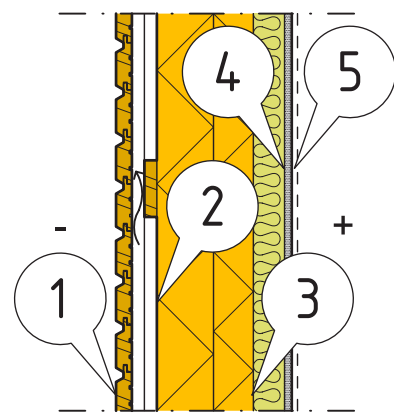
-Kiinnitys valussa tai laastiliimauksella

Kantava rakenne, betoniseinä, rakennesuunnitelman mukaan

150

Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti





Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

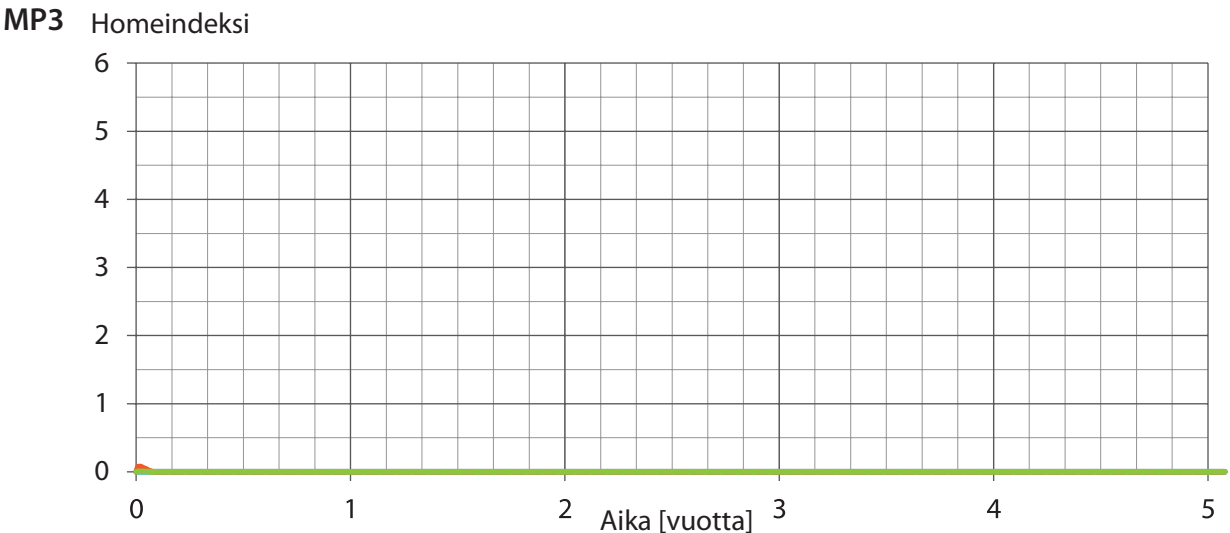
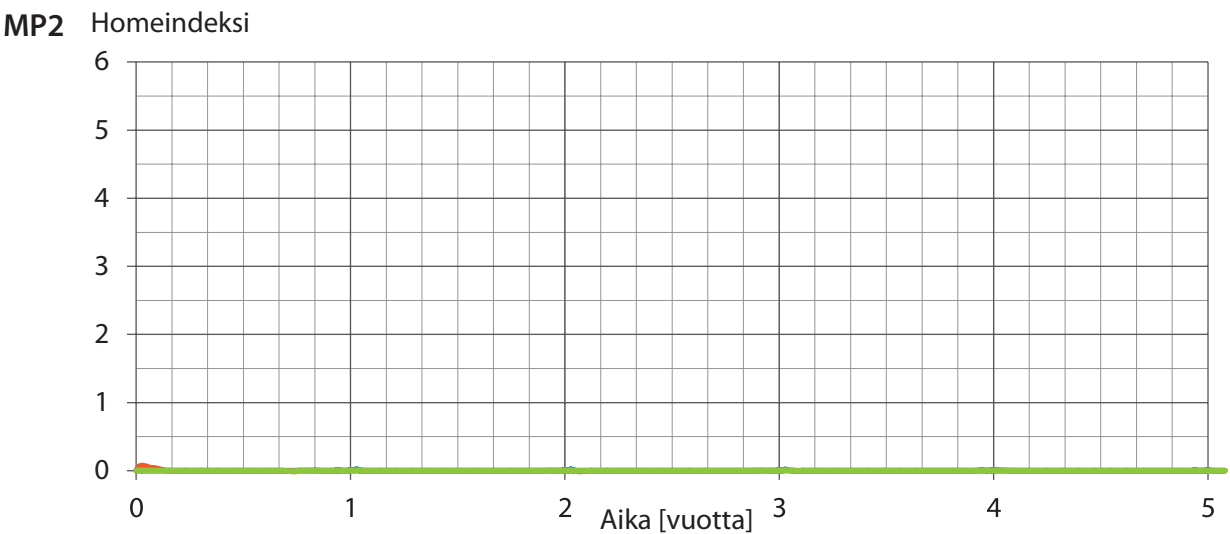
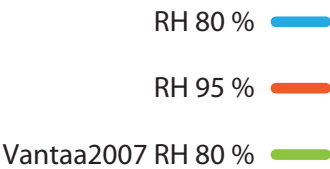
US3

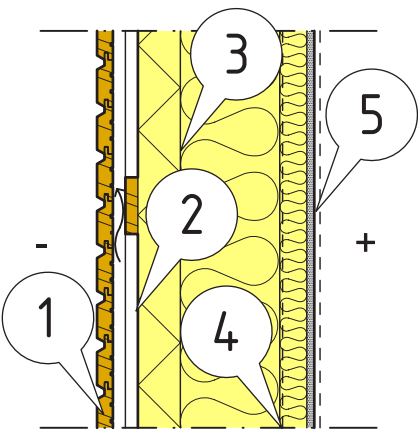
Ulkoerous

Tuuletusväli, ristiinkoolaus 22x100 mm	44
Lämmöneriste PU, $\lambda_U=0,023$ W/mK, saumat vaahdotetaan	100
Runkotolpat k600 rakennesuunnitelman mukaan	
Lämmöneriste PU, $\lambda_U=0,023$ W/mK, saumat vaahdotetaan	70
Asennustila ja ääneneriste, mineraalivilla	50
Sisäerouslevy	13
Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti	

ULKOSEINÄT 3, 4, 5 JA 6

Puurunkoisten ulkoseinärakenteiden toimivuuden turvaamiseksi hyvä kuljetusten aikainen suojaaminen ja rakentaminen sääsuojassa ovat aina suositeltavia. Kun rakenteet eivät pääse kostumaan rakennusvaiheessa, niiden toimivuudessa ei ole ongelmia. Tarkasteltavien rakenteiden US5 ja US6 kostuminen aiheuttaa homehtumisen riskin kasvua rakenteen sisäpintaa lähellä olevissa rakennekerroksissa. Rakenteessa US5 kosteus kuivuu lämmöneristeen ominaisuuksien johdosta hitaasti ulospäin, sillä runkorakenteen sisäpuoliset kerrokset estävät kuivumisen sisäänpäin. Rakenteessa US6 EPS-eriste kuivuu myös vain ulospäin. Rakenteen US4 lämmöneristyskerrokseen syntyy kostuneen lämmöneristyskerroksen kuivumisen johdosta lievä homehtumisen riski. Kaikki esitetyt rakenteet ovat kuitenkin kosteusteknisesti toimivia myös ennustetussa tulevaisuuden sateisemmassa säässä (Vantaa 2030).

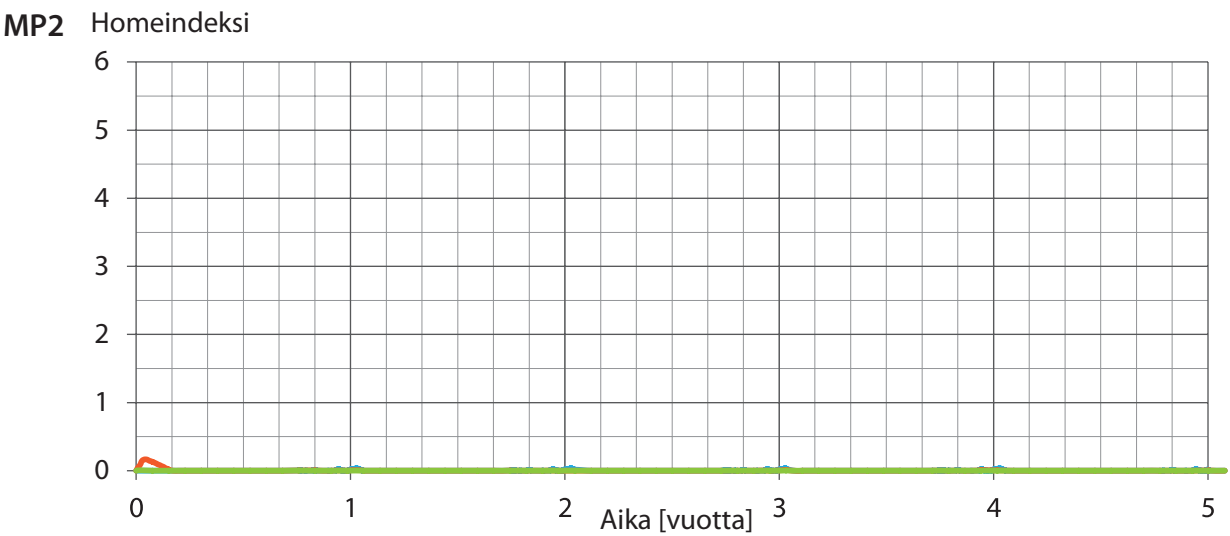
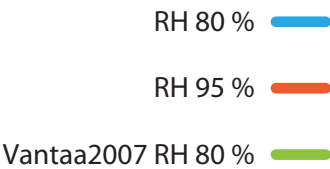


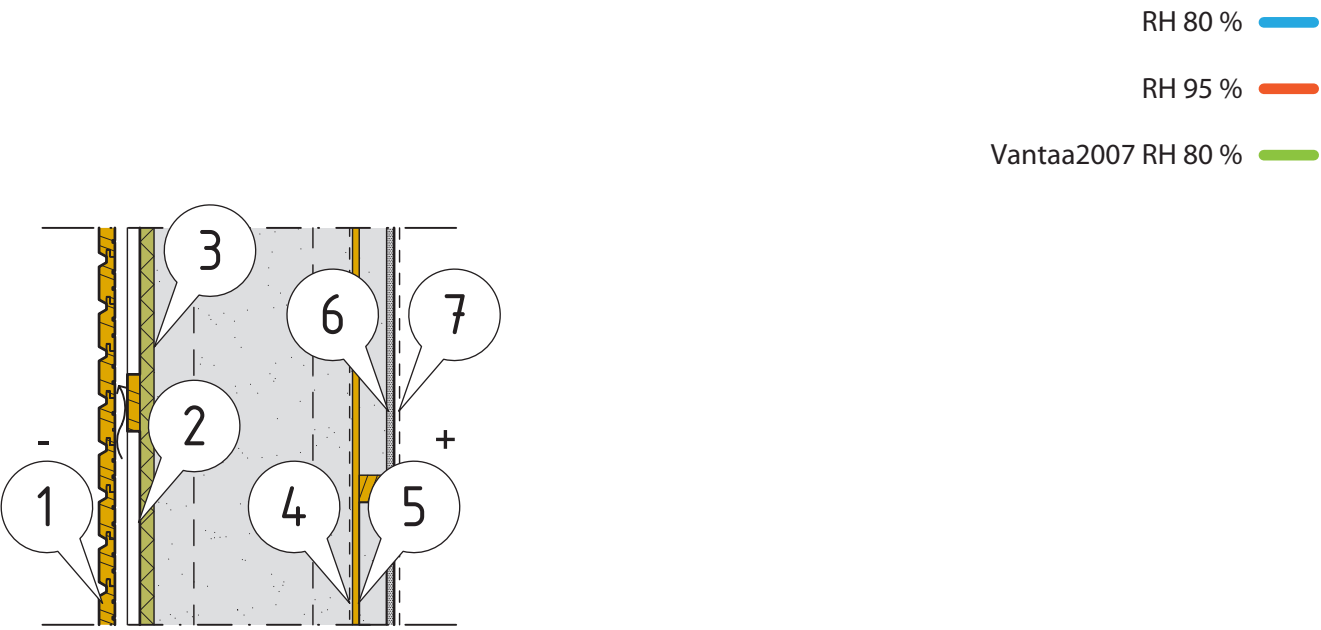


Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

US4

Ulkoerous	
Tuuletusväli, ristiinkoolaus 22x100 mm	44
Tuulensulkumineraalivilla, $\lambda_U=0,033$ W/mK	75
Lämmöneriste, mineraalivilla, $\lambda_U=0,033$ W/mK, kantava runko k600	175
Höyrynsulku	
Asennustila ja lämmöneriste, mineraalivilla, pystykoolaus	48
Sisäverhouslevy	13
Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti	

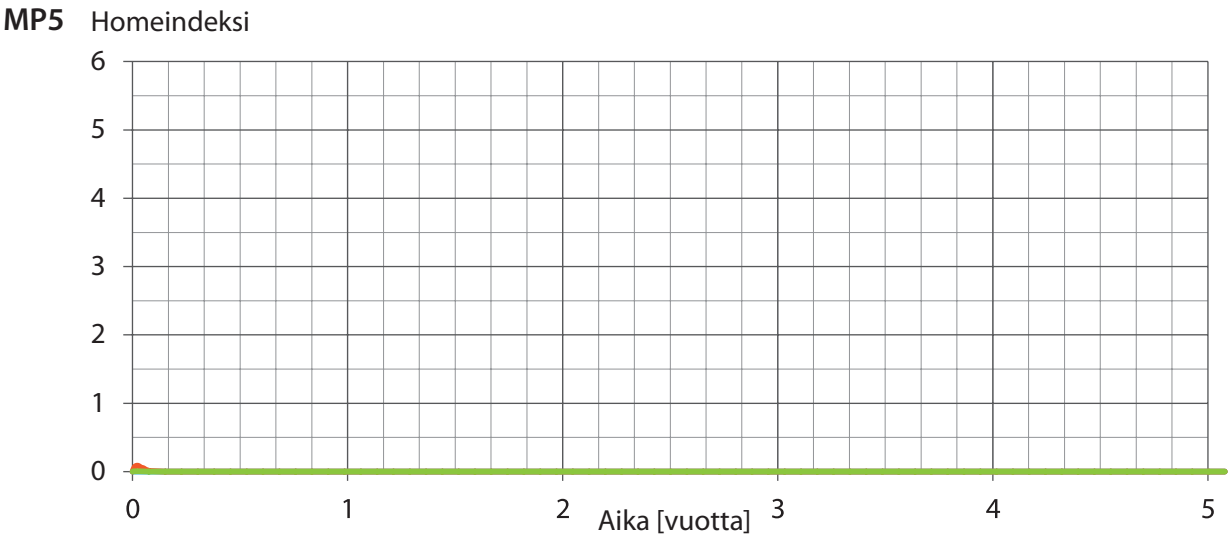
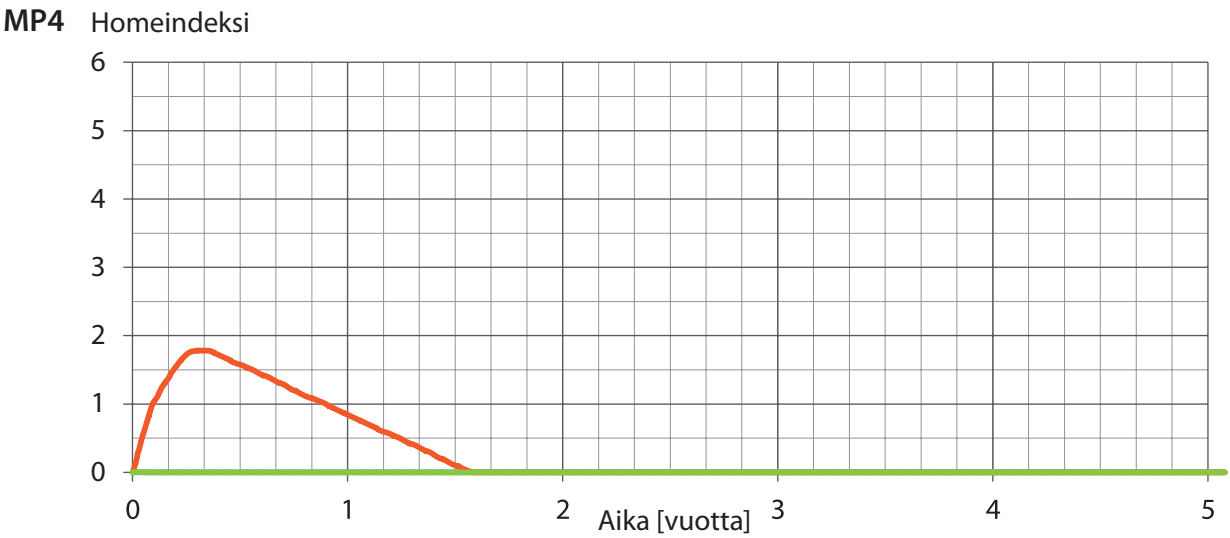
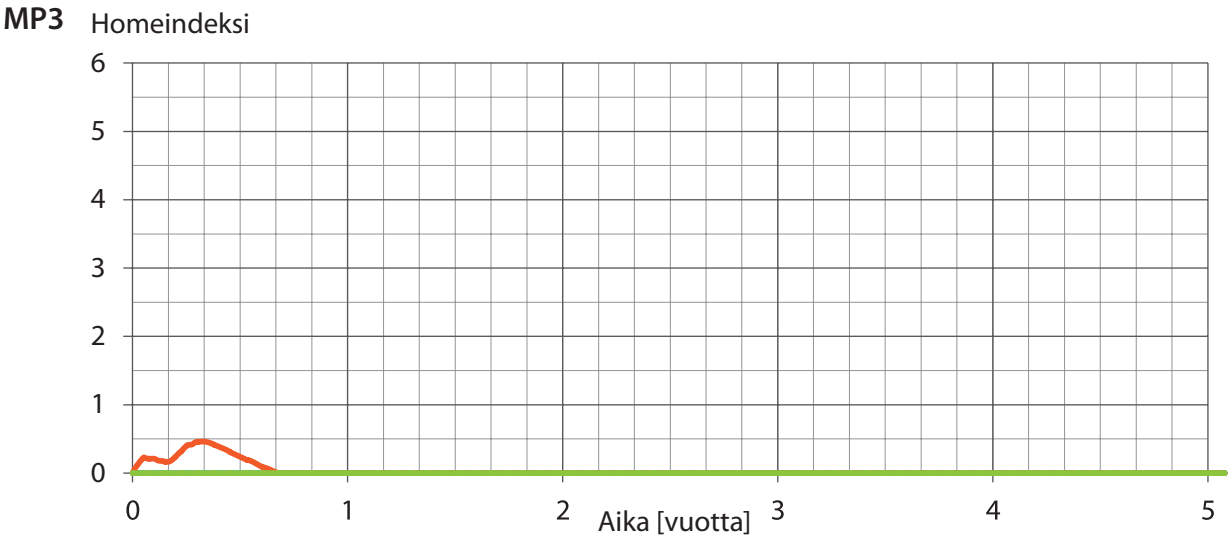


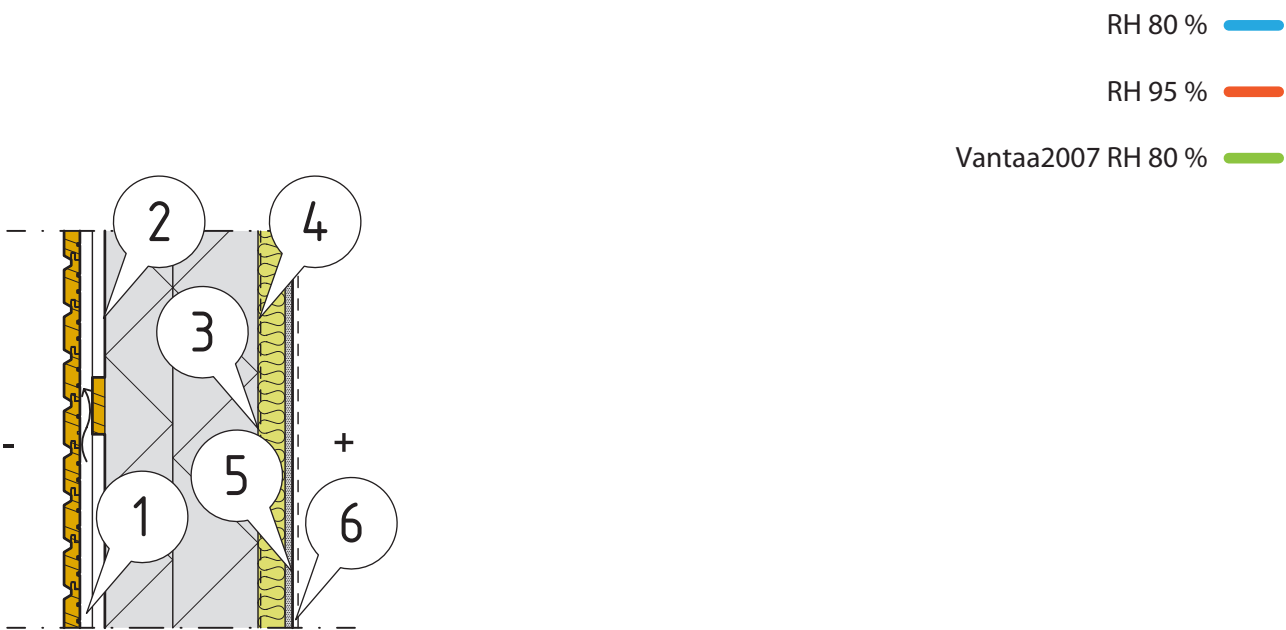


Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

US5

Ulkoerhous	
Tuuletusväli, ristiinkoolaus 22x100	44
Tuulensulkukuitulevy	25
Lämmöneriste, puukuitu, $\lambda_D=0,039$ W/mK, I-palkki-pystyrunko 350x70 mm k600	350
Ilmansulkukangas	
OSB-levy	12
Vaakakoolaus 48x48 mm k600, lämmöneriste, puukuitu	48
Sisäerhouslevy	13
Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti	

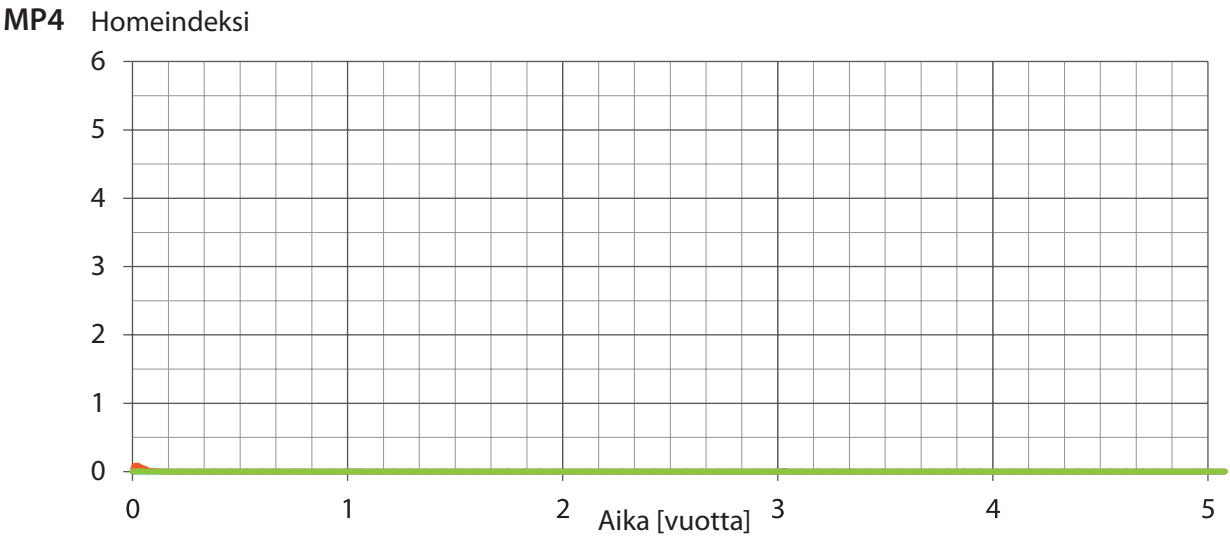
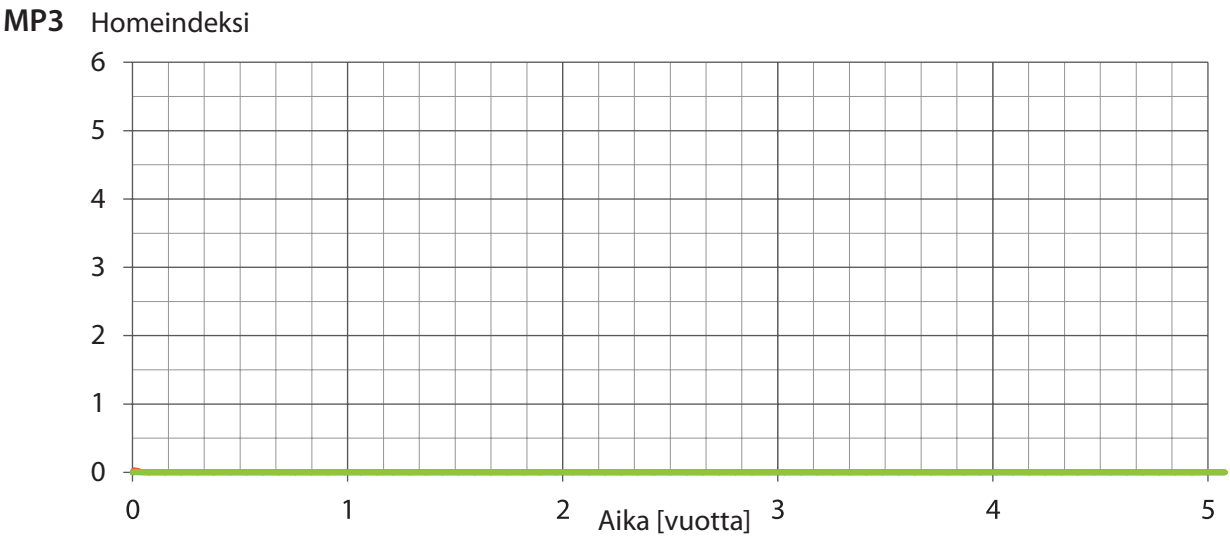
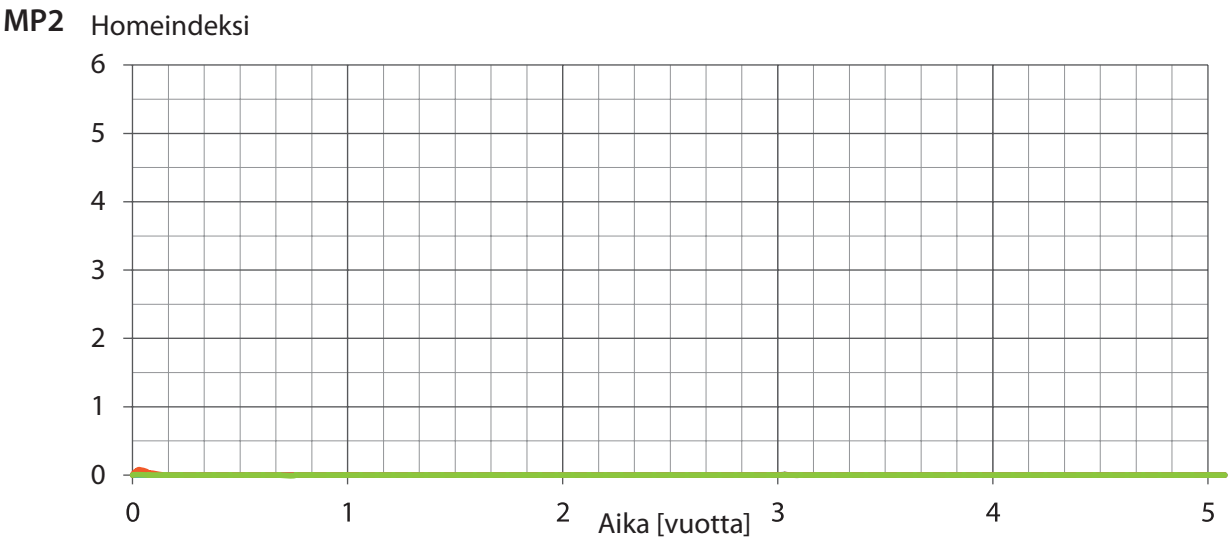




Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

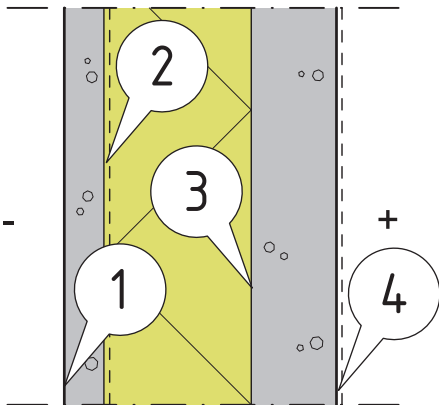
US6

Ulkoerhous	
Pystyrimoitus, 2 x 22x100 mm k600	44
Lämmöneriste, harmaa EPS-seinä, $\lambda_U=0,031$ W/mK runkotolppien ulkopintaan	120
Puurunko ja lämmöneriste, harmaa EPS-seinä, $\lambda_U=0,031$ W/mK	150
- Tiivistetään elastisella polyuretaanivaahdolla runkotolppien k600 väliin.	
Höyrynsulku, saumat teipattu	0,2
Koolaus 48x48 mm, asennustila, ääneneristysvilla tarvittaessa	48
Sisäerhouslevy	13
Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti	



ULKOSEINÄT 7, 8 JA 9

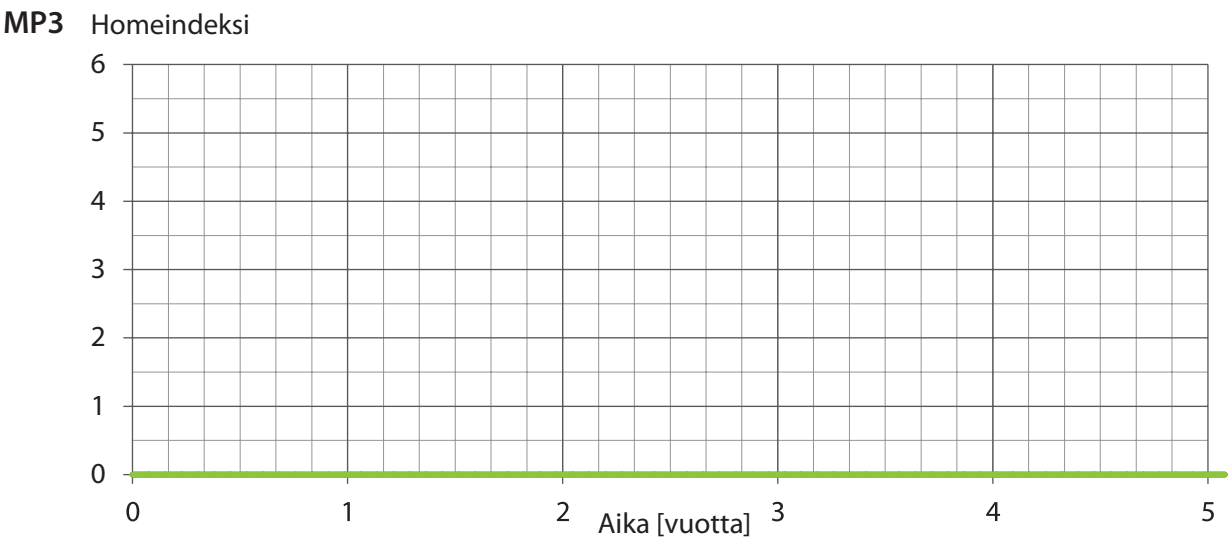
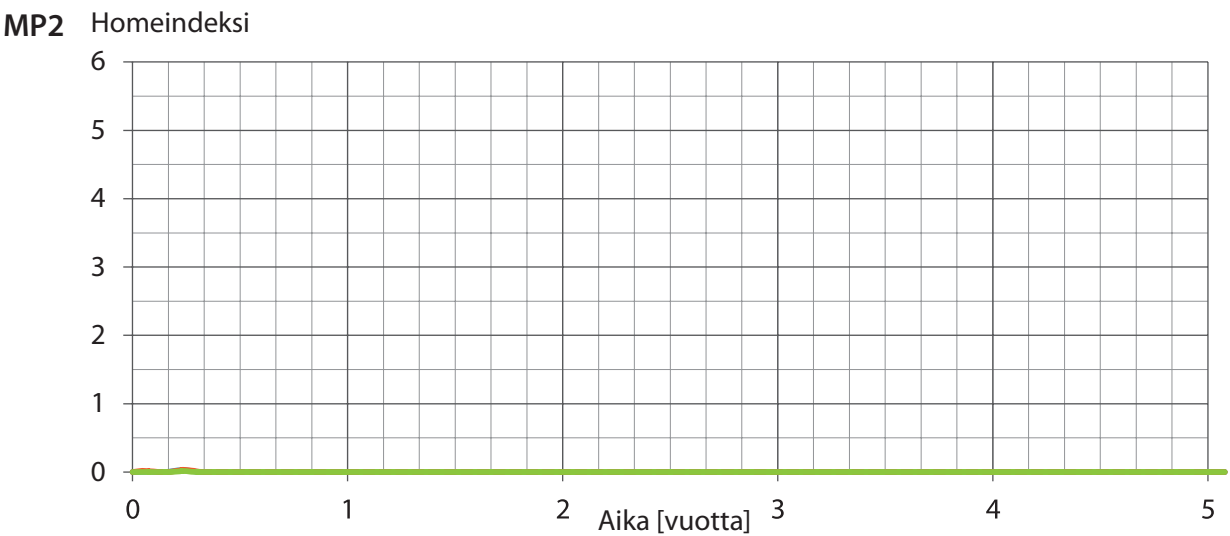
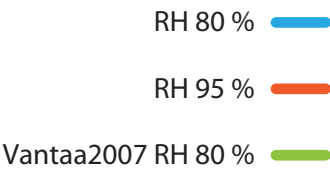
Rakenteet ovat kosteusteknisesti toimivia.

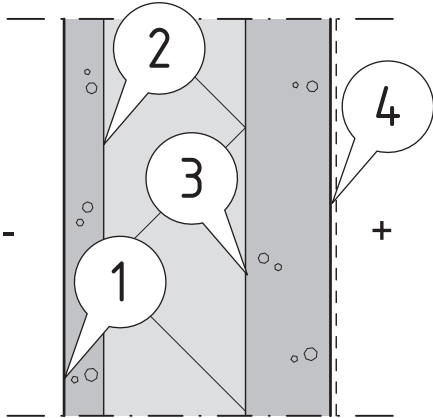


Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

US7

Pintakäsittely, työselostuksen mukaan	
Teräsbetoni (ulkokuorielementti), rakennesuunnitelman mukaan	80
Lämmöneriste mineraalivilla, uritettu ja urasuojattu, $\lambda_U=0,035$ W/mK	260
Teräsbetoni (sisäkuorielementti), rakennesuunnitelman mukaan	150
Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti	

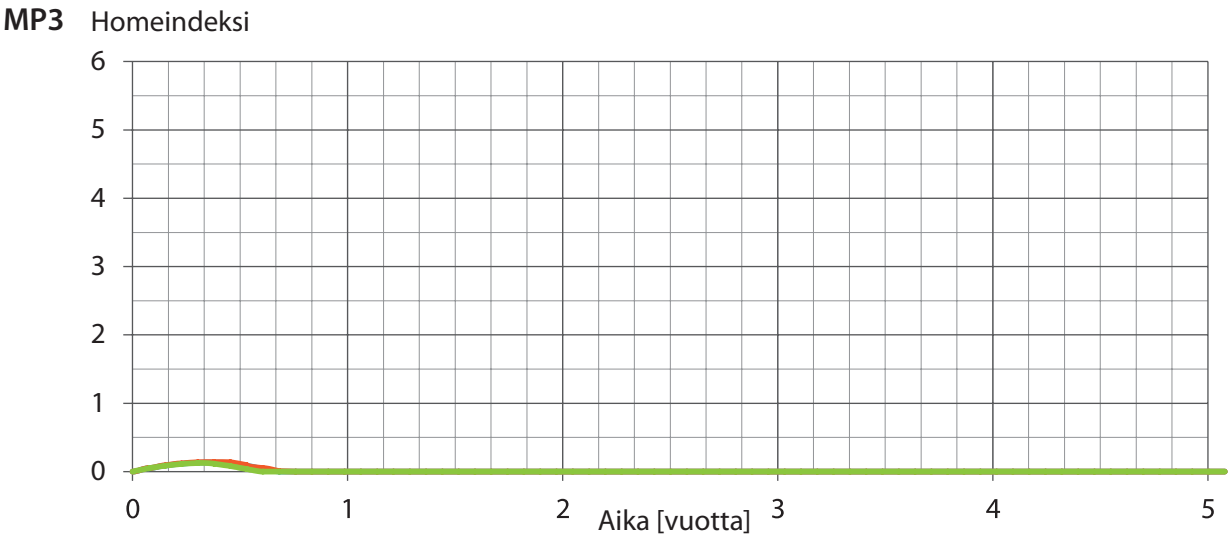
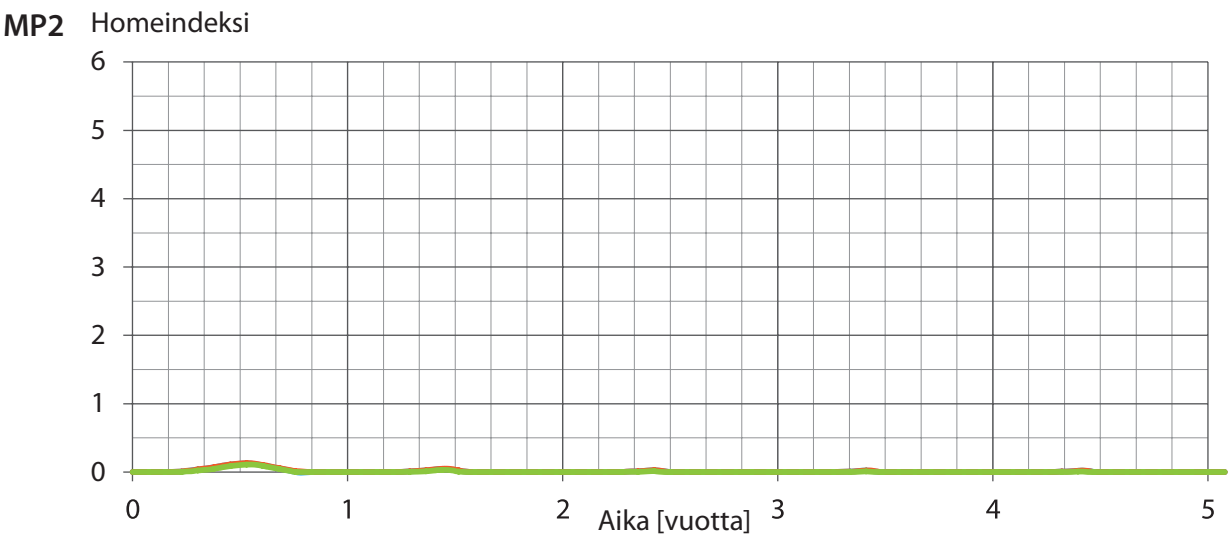
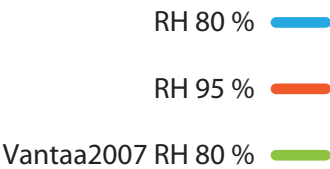


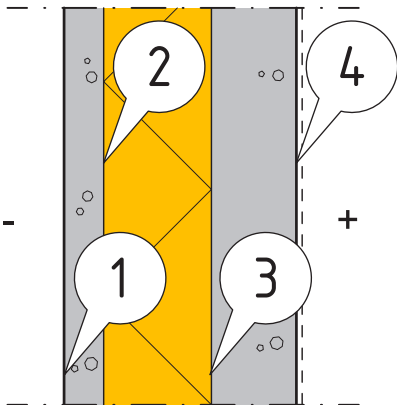


Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

US8

Pintakäsittely, työselostuksen mukaan	
Teräsbetoni (ulkokuorielementti), rakennesuunnitelman mukaan	80
Lämmöneriste harmaa EPS-seinä, $\lambda_U=0,031$ W/mK	250
- Työsaumojen ja läpivientien tiivistys PU-vaahdolla.	
Teräsbetoni (sisäkuorielementti), rakennesuunnitelman mukaan	150
Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti	

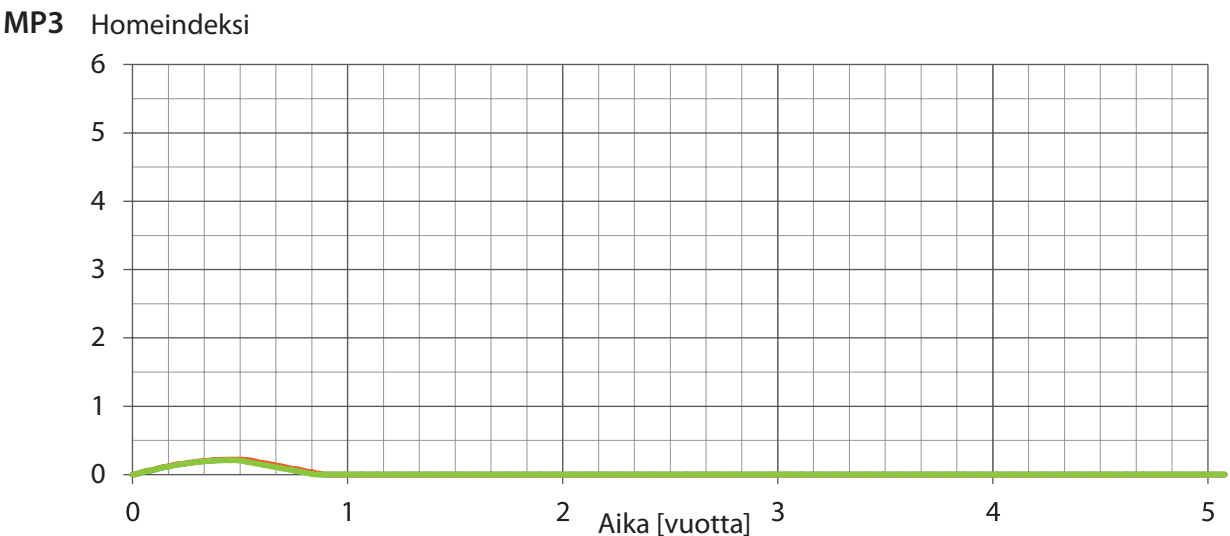
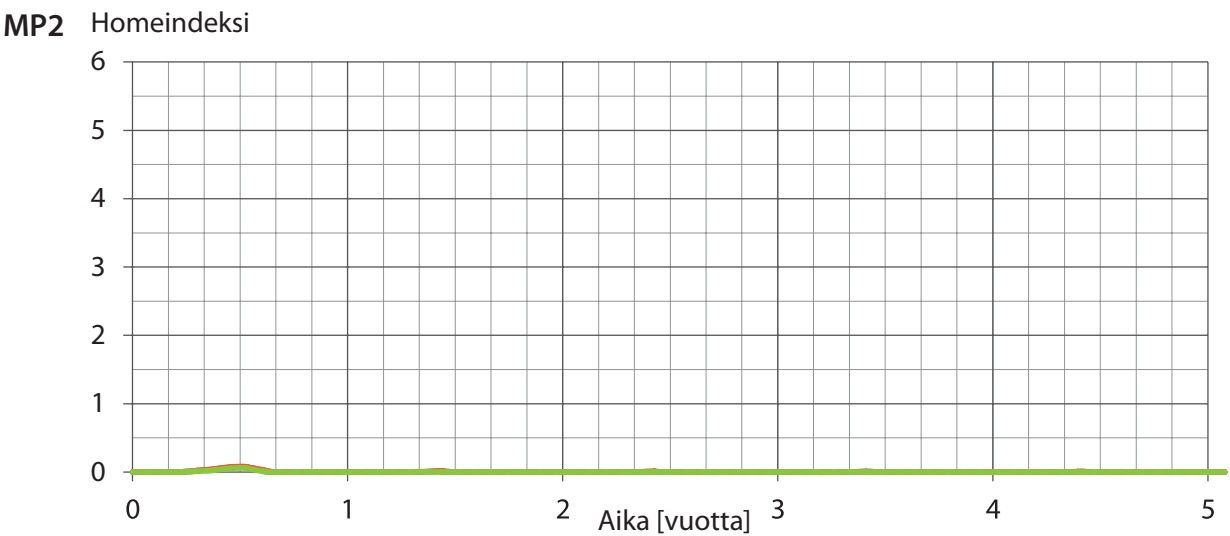
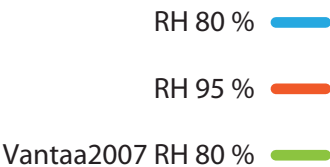




Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

US9

Pintakäsittely, työselostuksen mukaan	
Teräsbetoni (ulkokuorielementti), rakennesuunnitelman mukaan	80
Lämmöneriste PU, saumat vaahdotetaan, ei uritusta, $\lambda_U=0,023\text{ W/mK}$	190
Teräsbetoni (sisäkuorielementti), rakennesuunnitelman mukaan	150
Pintamateriaali tai -käsittely, huoneselostuksen mukaisesti	



1 LÄHTÖTIEDOT

1.1 Materiaaliominaisuudet

Laskennan perustaksi asetettiin vaatimus, että alapohja toimii kosteusteknisesti myös maltillisella ilmanvaihtuvuudella alustatilassa. Ryömintätilan Ilmanvaihtuvuudeksi oletettiin 1,0 1/h. [Laukkarinen 2012]

Maaperän ominaisuuksiksi oletettiin:

- RH 100 %
- Alkulämpötila 10 oC
- Lämmönjohtavuus 2 W/mK.

Simuloinnissa on käytetty ohjeellisia materiaalitietoja. Pääosin on käytetty laskentaohjelman materiaalikirjaston tietoja betonisten rakenteiden ja puurakenteiden tietona. Eristeiden ominaisuudet määriteltiin RIL 255-1-2014 mukaisesti ja muiden rakenteiden materiaalitiedot verrattiin mainittuun RIL-julkaisuun. Betonin lähtöarvokosteus määriteltiin kaikissa laskentatapauksissa olevan RH = 90 %.

Taulukoissa 1–3 on kosteuslaskennassa tarkasteltujen alapohjarakenteiden rakennekerrosten materiaaliominaisuudet

	Tiheys [kg/m ³]	Huokoisuus [m ³ /m ³]	Ominaislämpö- kapasiteetti [J/kgK]	Lämmön- johtavuus [W/mK]	Diffuusio- vastuskerroin ⁽¹⁾ [-]	Alkukosteus RH = 80 % kg/m ³	Alkukosteus RH = 95 % kg/m ³
Maaperä	1500,0	0,50	1500,0	2,0	5,0	12,0	49,6
Sorakerros	1400,0	0,30	800,0	0,7	1,0	5,0	17,3
Harmaa EPS -eriste	20,0	0,95	1500,0	0,031...0,038	50,0	0,18	0,35
XPS -eriste	30,0...40,0	0,95	1500,0	0,03	100,0	0,21	0,33
Betoni C35/45	2220,0	0,18	850,0	1,6	70,0	95,6	95,6

Taulukko 1. Simuloinnissa käytetyt materiaaliominaisuudet –
maanvaraiset alapohjat.

Diffuusiovastuskerroin on yksikötön suure, joka kuvaa kuinka paljon suurempi materiaalin diffuusiovastus on verrattuna saman paksuiseen ilmakerrokseen. Rakennekerroksen diffuusiovastus $S_d = \mu \times d$ [m].

	Tiheys [kg/m ³]	Huokoisuus [m ³ /m ³]	Ominaislämpö- kapasiteetti [J/kgK]	Lämmön- johtavuus [W/mK]	Diffuusio- vastuskerroin ⁽¹⁾ [-]	Alkukosteus RH = 80 % kg/m ³	Alkukosteus RH = 95 % kg/m ³
Tuulensulkulevy mineraalivilla	115,0	0,95	850,0	0,032	3,4	1,1	3,0
Tuulensulkulevy, puukuitu	300,0	0,8	1500,0	0,05	7,5	40,0	87,25
Vanerilevy	500,0	0,66	1300,0	0,12	188,0	70,0	113,0
Mineraalivilla	35,0	0,95	850,0	0,036...0,040	1,3	0,56	0,87
PU -eriste	30,0...40,0	0,95	1500,0	0,023	2100,0	2,25	2,95
Harmaa EPS -eriste	20,0	0,95	1500,0	0,031...0,038	50,0	0,18	0,35
Puukuitueriste	37,0	0,9	1880,0	0,038...0,040	1,55	5,6	14,0
Höyrynsulku	130,0	0,001	2300,0	2,3	100 000,0	0,0	0,0
Lattiatasoite	2200,0	0,18	850,0	1,6	92,0	73,5	73,5
Kipsilevy	700,0	0,77	110,0	0,19	6,9	6,3	19,0
Lattialauta	650,0	0,47	1500,0	0,13	200,0	98,0	176,6

Taulukko 2: Simuloinnissa käytetyt materiaaliominaisuudet –
tuulettuvat alapohjat, puurakenteiset.

Diffuusiovastuskerroin on yksikötön suure, joka kuvaa kuinka paljon suurempi materiaalin diffuusiovastus on verrattuna saman paksuiseen ilmakerrokseen. Rakennekerroksen diffuusiovastus $S_d = \mu \times d$ [m].

	Tiheys [kg/m ³]	Huokoisuus [m ³ /m ³]	Ominaislämpö- kapasiteetti [J/kgK]	Lämmön- johtavuus [W/mK]	Diffuusio- vastuskerroin ⁽¹⁾ [-]	Alkukosteus RH = 80 % kg/m ³	Alkukosteus RH = 95 % kg/m ³
Betoni C35/45	2220,0	0,18	850,0	1,6	70,0	95,6	95,6
Harmaa EPS eriste	20,0	0,95	1500,0	0,031...0,038	50,0	0,18	0,35
Mineraalivilla	35,0	0,95	850,0	0,036...0,040	1,3	0,56	0,87
PU -eriste	30,0...40,0	0,95	1500,0	0,023	2100,0	2,25	2,95
Lattiatasoite	2200,0	0,18	850,0	1,6	92,0	73,5	73,5

Taulukko 3: Simuloinnissa käytetyt materiaaliominaisuudet –
tuulettuvat alapohjat, betonirakenteiset.

Diffuusiovastuskerroin on yksikötön suure, joka kuvaa kuinka paljon suurempi materiaalin diffuusiovastus on verrattuna saman paksuiseen ilmakerrokseen. Rakennekerroksen diffuusiovastus $S_d = \mu \times d$ [m].

1.2 Tarkastelun oletukset

Suure	Arvo	Referenssi
Lämpö- ja kosteuslähteet		
Ilmavuoto-		
Kosteuskuorma	0 %	Osuus viistosateesta, ASHRAE 160 (ASHRAE 2009) mukaan. Tyvek-pintaisissa tuulensuojalevyissä ei ei ulkopuolista kosteuskuormaa.
Alustilan ilmanvaihtoluku	1,0 h ⁻¹	
Geometria		
Kallistuskulma	0°	
Rakennuskorkeus		Ei huomioitu
Pinnan siirtokertoimet		
Ulkopinnan lämmönvastus	0,04 m ² K/W	SRakMK C4
Ulkopinnan S _d -arvo	-	
Lyhytaaltainen absorptiokerroin	0,0	Säteilyä ei huomioitu alapohjarakenteissa
Sateen absorptiokerroin	0,0	Sadetta ei huomioitu alapohjarakenteissa
Sisäpinnan lämmönvastus	0,17 m ² K/W	SRakMK C4:n mukaan
Sisäpinnan S _d -arvo	-	
Alkuolosuhteet		
Rakenteen alkukosteus	80 % 95 %	Normaali tilanne Kostunut
Alkulämpötila	10 °C	
Laskentajakso		
Tarkastelu-aika	5 vuotta	1.1.2015 – 1.1.2020
Simuloinnin aika-askel	1 h	

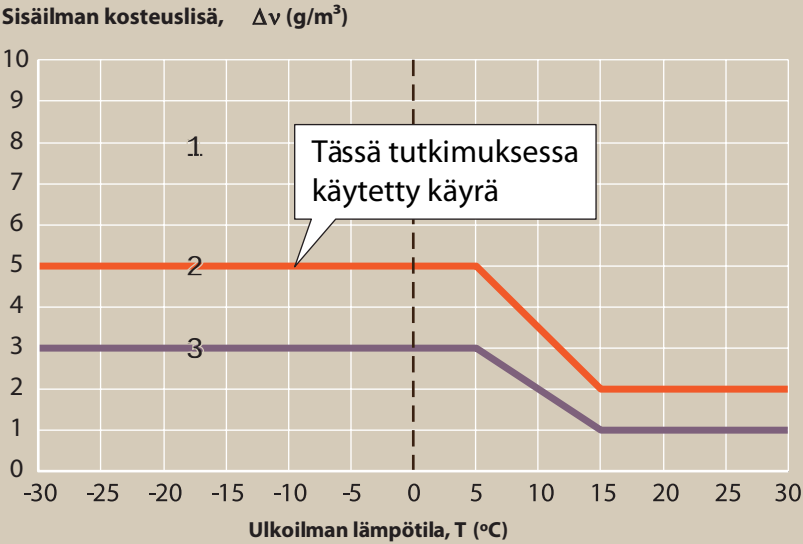
Taulukko 4. Simuloinnissa käytetyt lähtötiedot.

1.3 Ilmasto

Suure	Arvo	Referenssi
Ulkoilmasto	Vantaa 2030 ja Vantaa 2007	Liite 5
Ilmansuunta	Etelä	Liite 5
Sisäilman lämpötila	21 °C	
Sisäilman kosteuslisä	Käyrä 2	Kuva 1
Sisäilman suhteellinen kosteus	Käyrä B ja A	Kuva 2

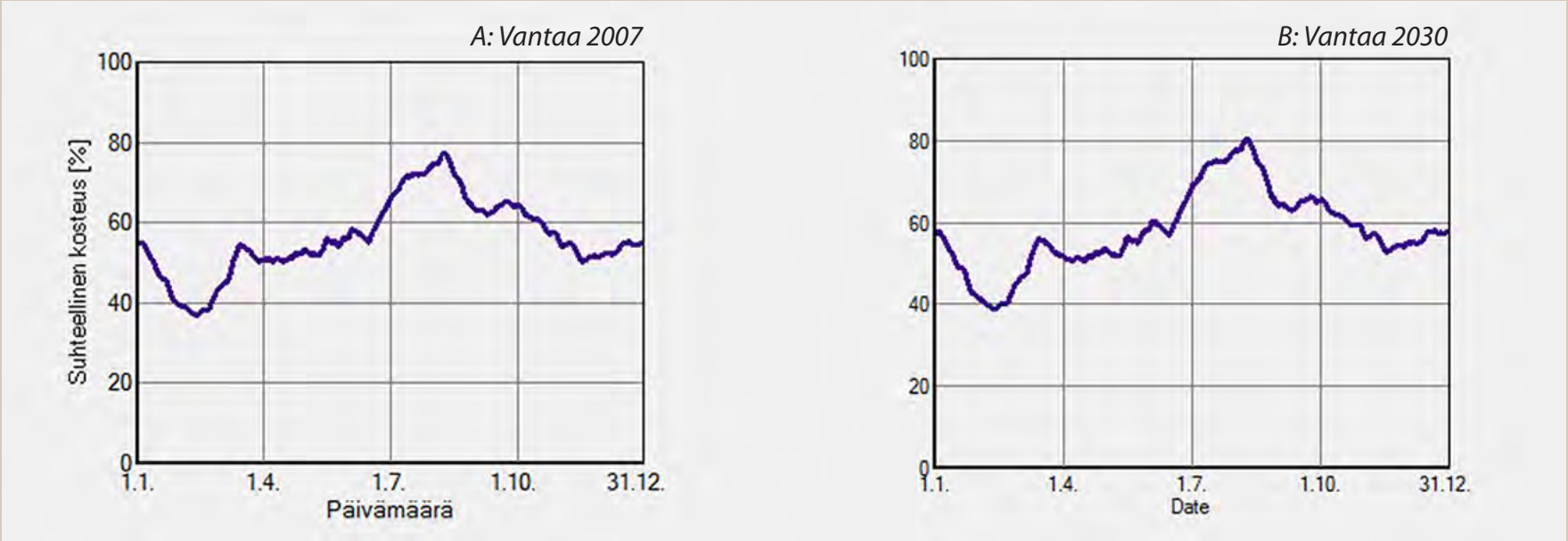
Taulukko 5. Tarkastelussa käytetyt ilmastotiedot.

Kuva 1. Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot (RIL 107-2012).



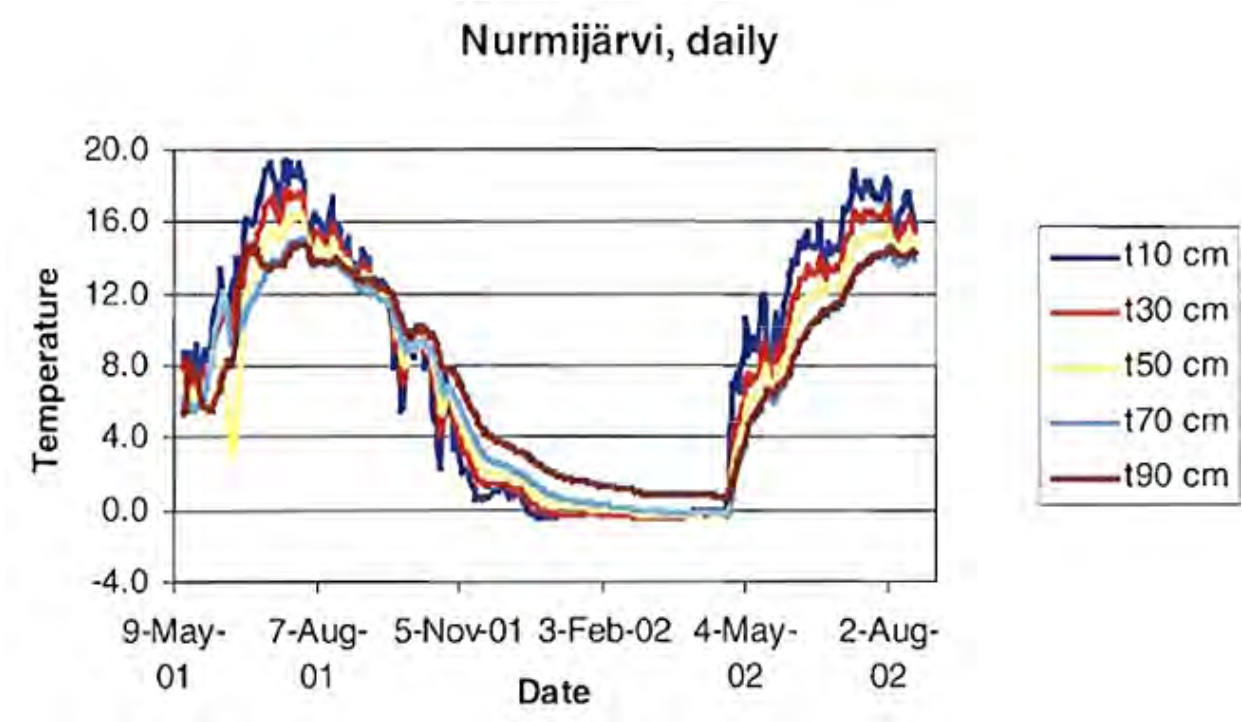
- 1 Kylpylät, uimahallit, laitoskeittiöt, pesulat, panimot, kirjapainot, kasvihuoneet, kostutetut tilat, ratsastusmaneesit, maatalouden tuotantorakennukset, eläinsuojat, teollisuuden kosteusrasitetut tilat
- 2 Asuinrakennukset, toimisto- ja liikerakennukset, hotellit ja majoitusrakennukset, ravintolat, kokoontumis- ja juhlatilat, opetusrakennukset ja päiväkodit, sairaalat ja hoitolaitokset, museot, liikuntahallit ja -tilat, jäähallit ja jäähdytetyt liikuntatilat, kylmä- ja pakkashuoneet, talviasuttavat vapaa-ajan asunnot
- 3 Vapaa-ajan asunnot, puolilämpimät tai kylmillään olevat rakennukset, varastot ja säilytystilat, ajoneuvosuojat

Kuva 2. Sisäilman suhteellinen kosteus sisälämpötilan ollessa 21 °C. Kosteuslisä "Kuva 1, käyrä 2" mukaisesti.



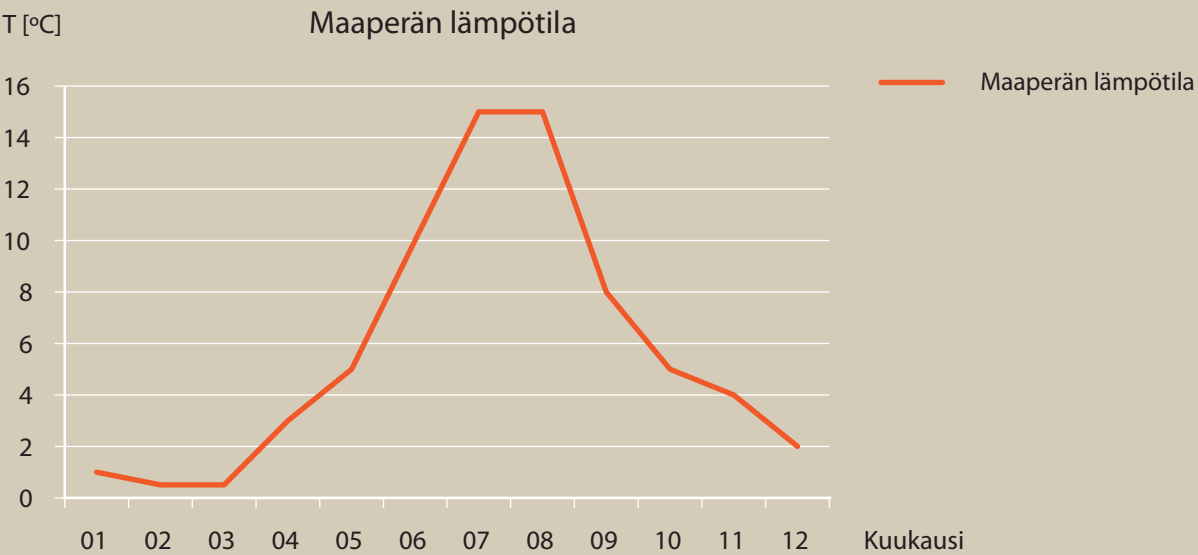
1.4 Maaperän ominaisuudet

Maaperän ominaisuudet määriteltiin Geologian raportin P31.4.035 ”GTK:n maaperän seuranta-asemat 2000 – 2002” Nurmijärven mitaustulosten perusteella 0,9 m maan syvyydessä.



Kuva 3: Maaperän lämpötila eri syvyyksillä (GTK., s. 8, kuva 5).

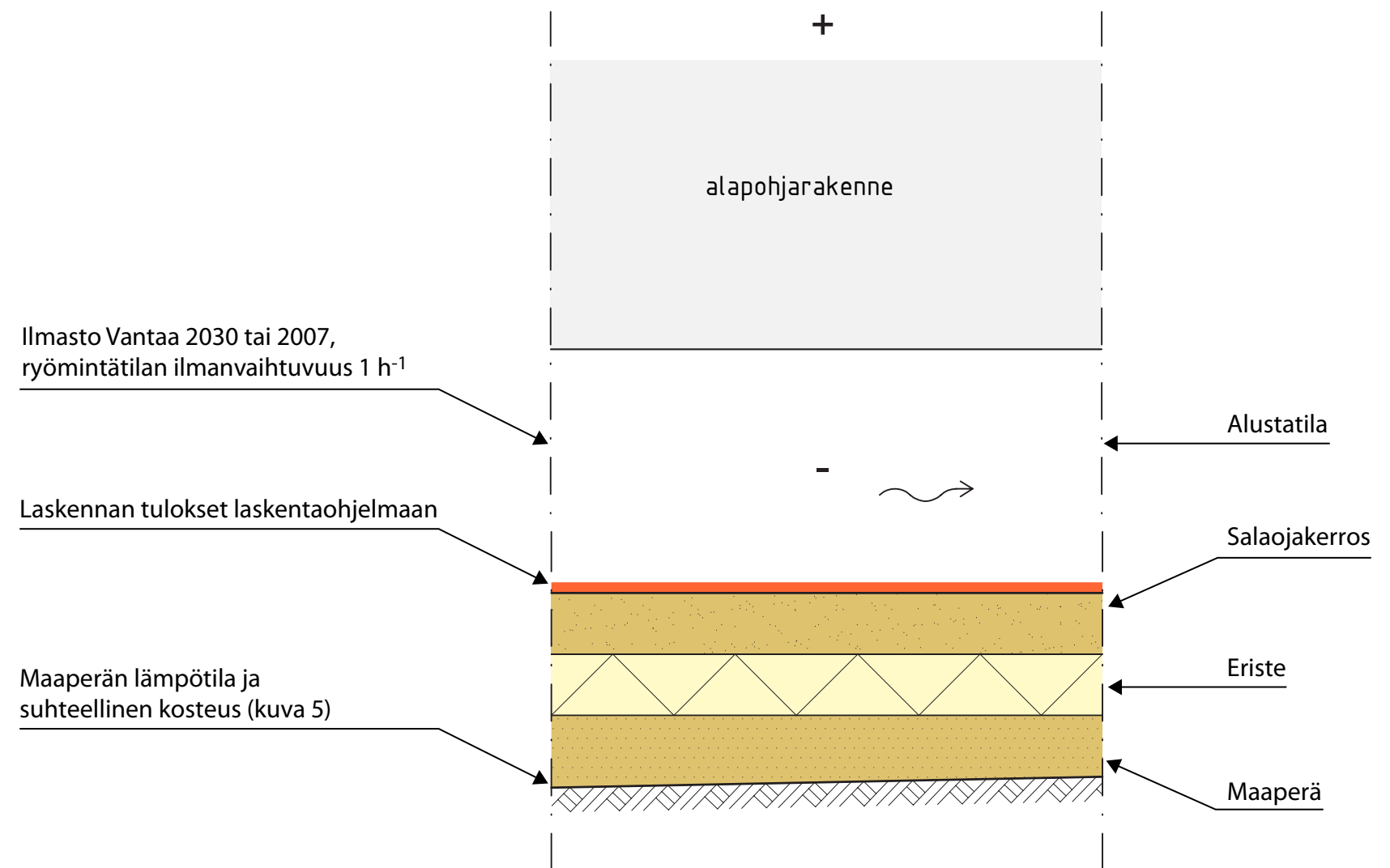
Syvyydelle 0,9 m määriteltiin kuukausittainen lämpötilakäyrä kuvan 4 mukaisesti:



Kuva 4: Laskennassa käytetty maaperän lämpötila syvyydellä 0,9 m.

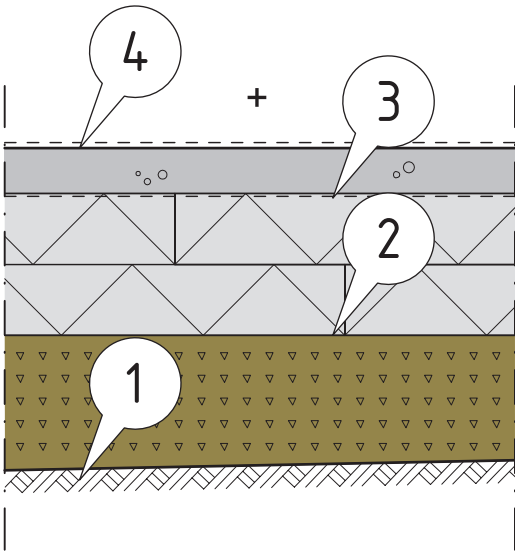
Valitun maaperätyypin vuosikeskilämpötilaksi arvioitiin 5,75°C. Maaperän suhteellisen kosteuden oletettiin olevan jatkuvasti 100 % 0,9 m syvyydellä.

Tuuletettujen alapohjien alustatilan ilmakerroksen vaikutus laskettiin Wufi 2D 3.4 ohjelmalla. Laskennassa simuloitiin ensin lämmön- ja kosteudensiirtyminen kaksiulotteisesti maaperässä, ryömintätilassa sekä suunnitelmien mukaisesti routasuojakerroksessa ja pintasorakerroksessa (kuva 5). Kosteudensiirtyminen rakenteessa laskettiin ryömintätilan ja sorakerroksen tai perusmaan rajapinnan laskentatulosten perusteella. Maaperän suhteellisen kosteuden ja lämpötilan muuttumista ei otettu huomioon. Laskentaparametrit pidettiin vakioina kaikissa laskentatapauksissa.



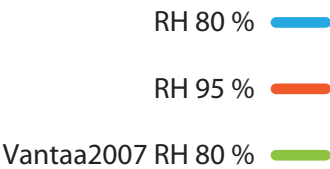
Kuva 5: Maaperässä tapahtuva lämmön- ja kosteudensiirtyminen.

2 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET



ALAPOHJAT 1 JA 2

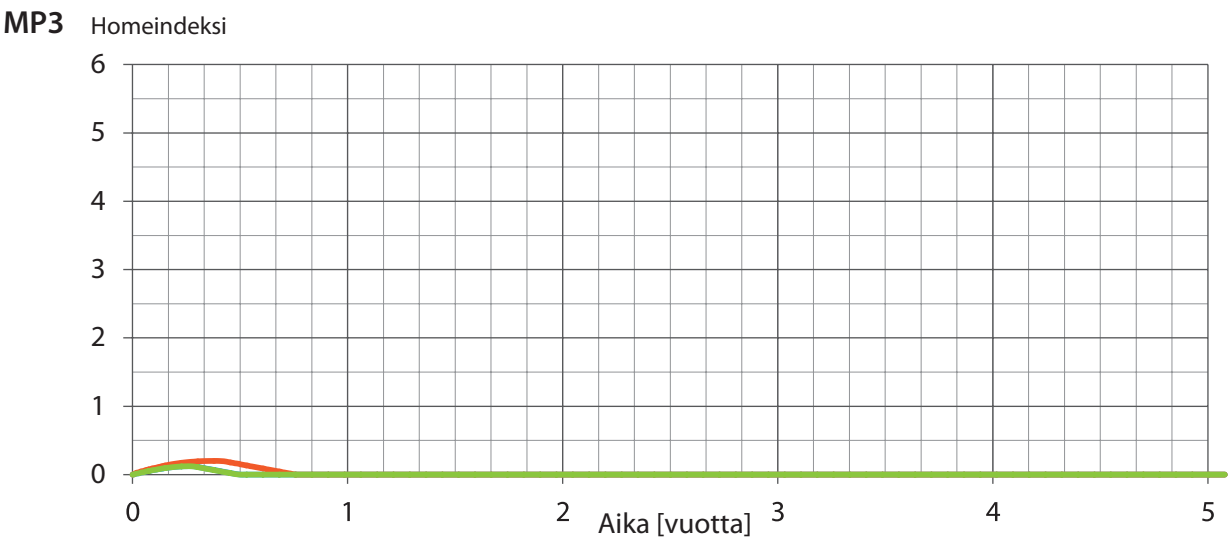
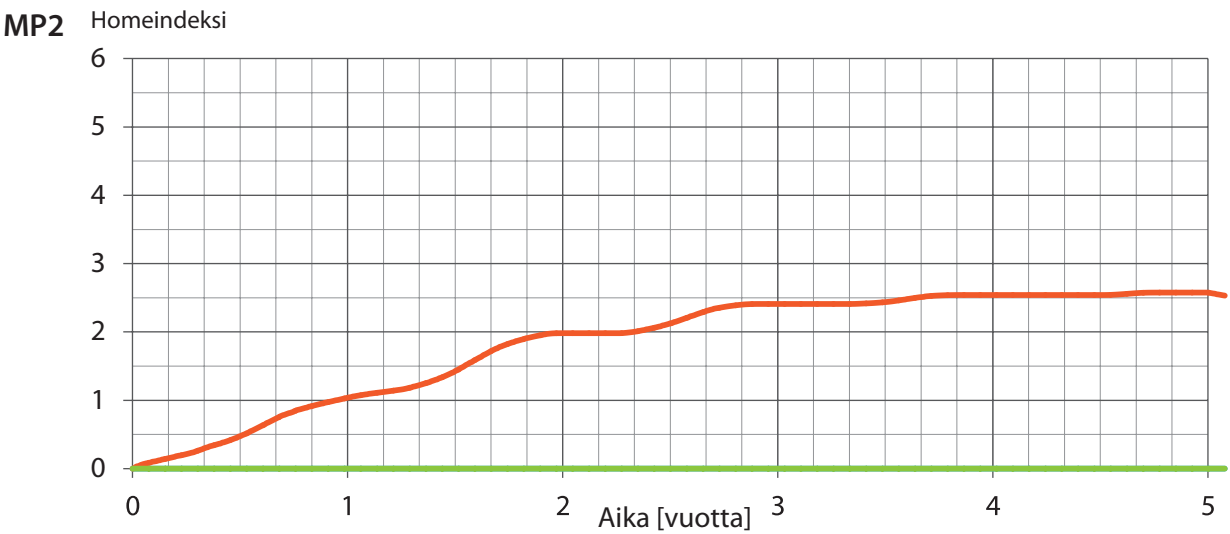
Kostean maan päälle asennettavan lämmöneristyksen alapinta voi pysyä maanvaraisessa rakenteessa koko elinkaaren ajan kosteana, eli lämmöneristyksen alapinnan suhteellinen kosteus on yli 90 %. Tämä pätee kaikkiin maanvaraisiin lattiarakenteisiin. Salaojituseroksessa olevissa orgaanisissa materiaaleissa voi tapahtua homeenmuodostusta, mutta sen vaikutukset sisäilmastoon ovat vähäiset. Kun lattia liitoksineen on ilmanpitävä, ei sisäilmastovaikutuksia ole.

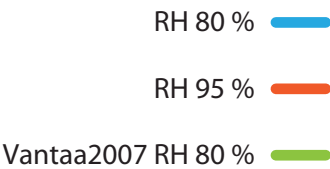
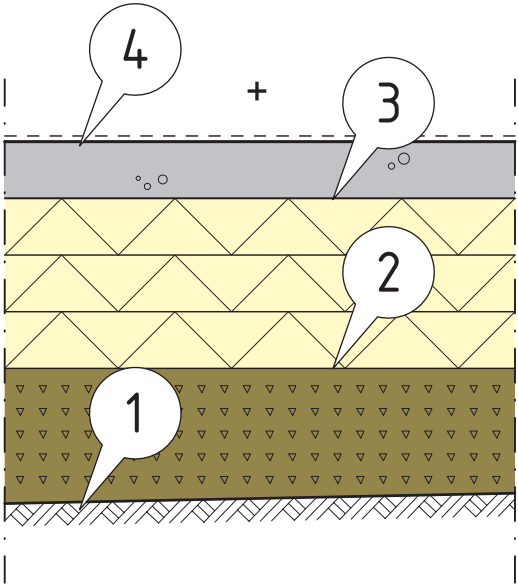


Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

AP1

- Lattiapinnoite huoneselostuksen mukaan
- Teräsbetonilaatta 80 mm, raudoitus ja betoniluokka rakennesuunnitelman mukaisesti 80
- Suodatinkangas tai sitkeä suojapaperi tarvittaessa
- Lämmöneriste, EPS-lattia, $\lambda_D=0,031$ W/mK 250
- Salaojituserros, tiivistetty sepeli Ø 6...16 mm ≥ 200
- Suodatinkangas tarvittaessa
- Perusmaa, kallistus salaojiin 1 : 50

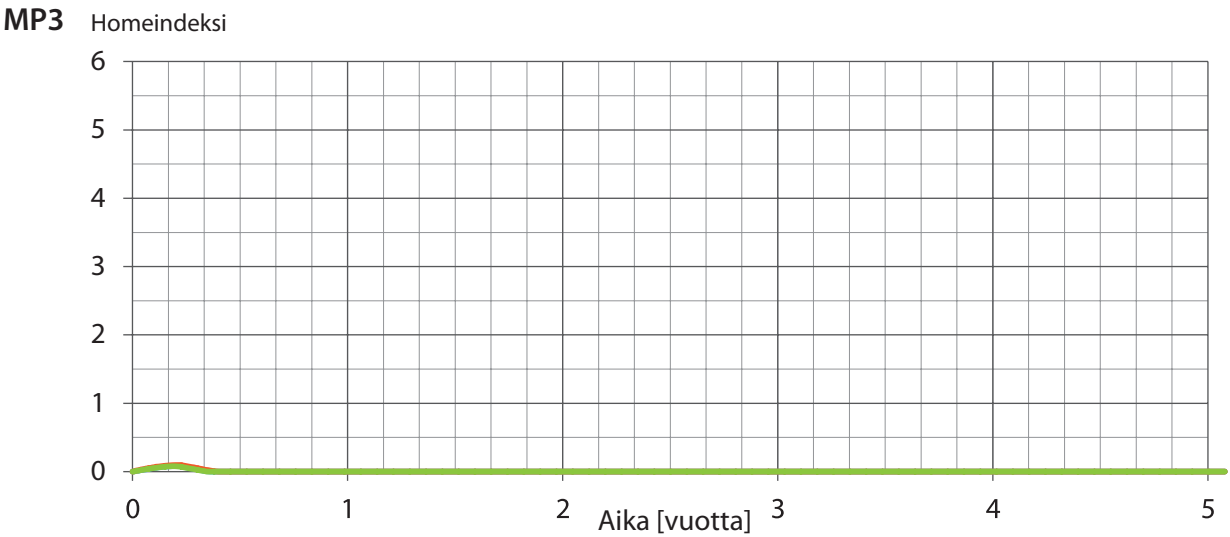
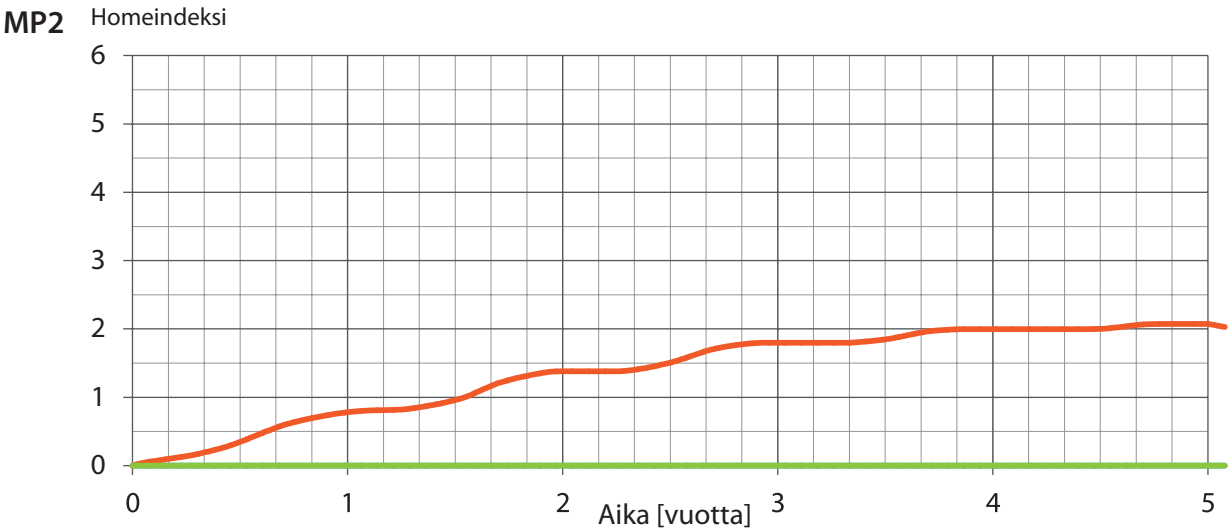


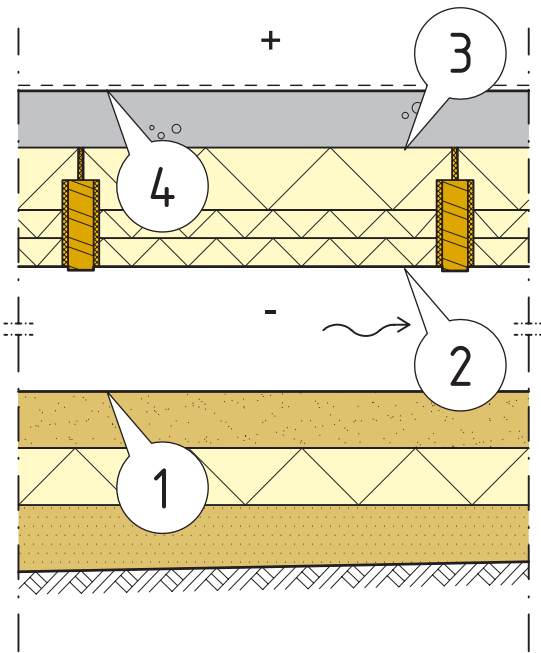


Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

AP2

- Lattiapinnoite huoneselostuksen mukaan
- Teräsbetonilaatta 80...100 mm, raudoitus ja betoniluokka rakennesuunnitelman mukaisesti
- Lämmöneriste XPS, $\lambda_U=0,038$ W/mK 300
- Salaojituserros, tiivistetty sepele Ø 6...16 mm ≥ 200
- Suodatinkangas tarvittaessa
- Perusmaa, kallistus salaojiin 1 : 50





Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

AP3

Lattiapinnoite huoneselostuksen mukaan

Teräsbetonilaatta 80...100 mm, raudoitus ja betoniluokka rakennesuunnitelman mukaisesti

Lämmöneriste XPS sekä lisäksi vasojen välissä 170 mm lämmöneriste XPS tiivistettynä elastisella polyuretaanivaahdolla vasoihin, $\lambda_0 = 0,035/0,037 \text{ W/mK}$ 210

Tuulettuva alustatila, tuuletusaukot 4...8 ‰ alustatilan pinta-alasta. ≥ 800

Karkea hiekka tai sora 50...100 mm 100

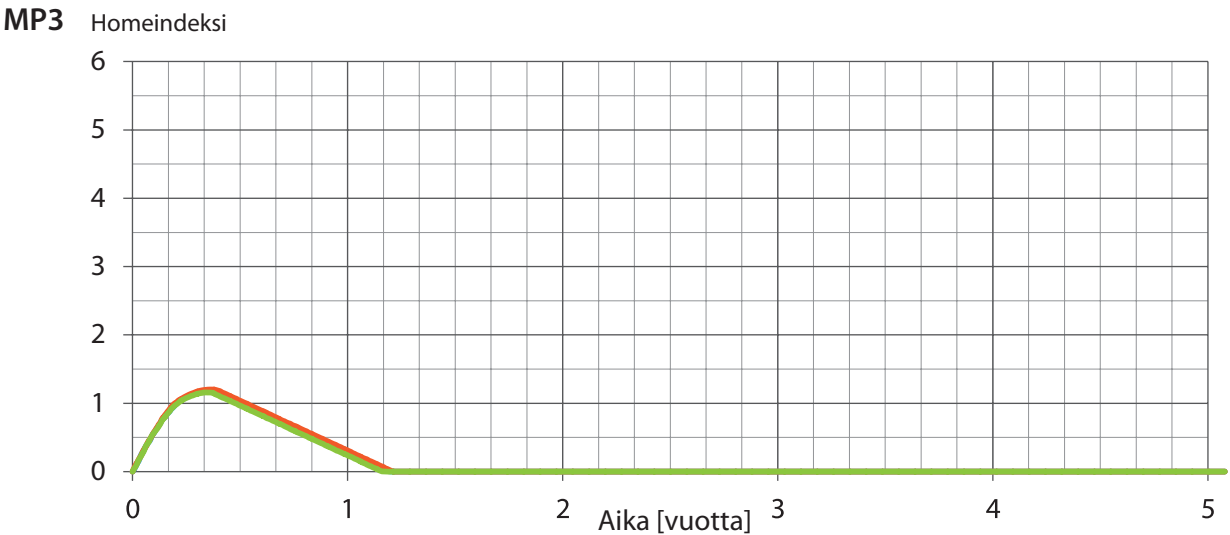
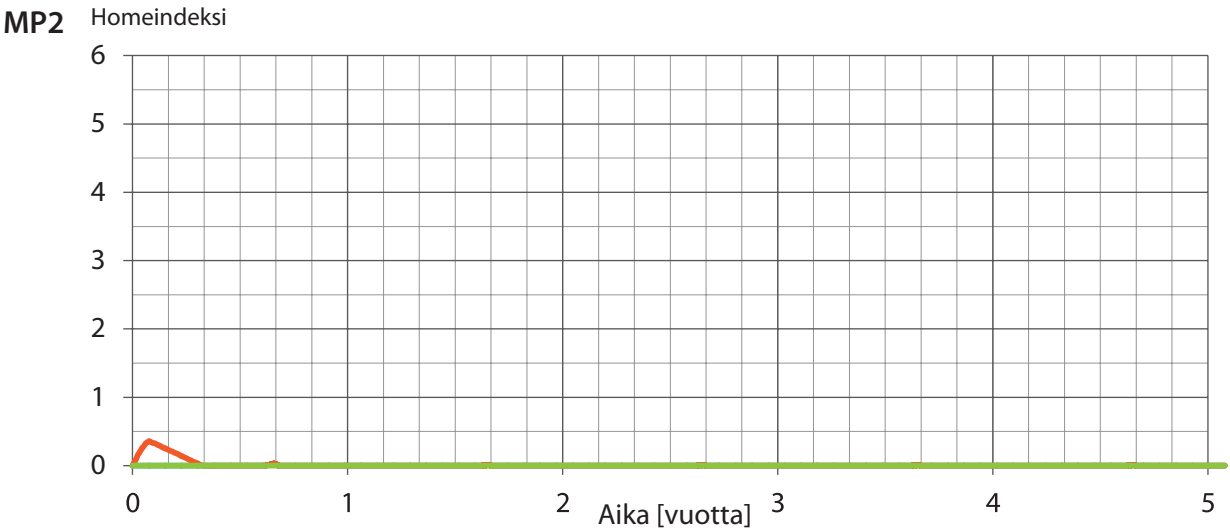
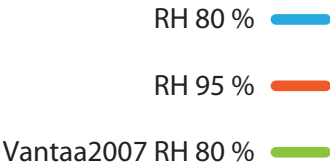
Lämmöneriste EPS 50...100 mm 100

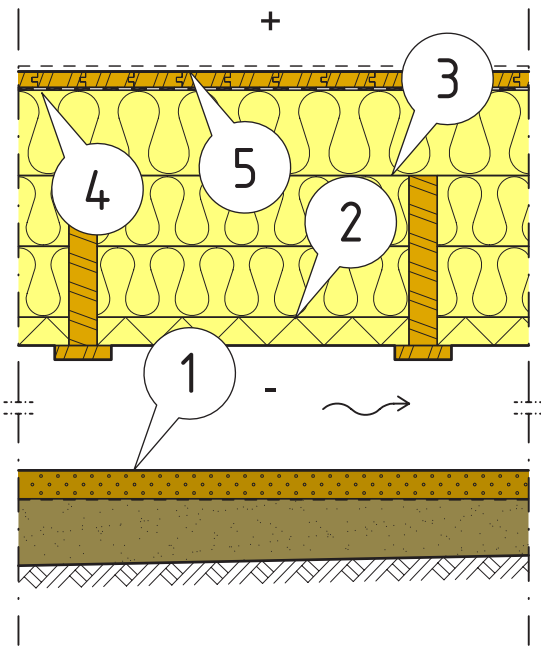
Kuiva tasaushiekka tarvittaessa

Perusmaa, kallistus salaojiin 1 : 50

ALAPOHJAT 3, 4 JA 5

Ryömintätilan maapohja käyttäytyy alapohjan rakenteesta riippumatta samalla tavalla. Ryömintätilan olosuhteiden hallinta tulee suunnitella. Oleellisia tekijöitä ovat tuuletuksen riittävyys, maanpohjan ja ryömintätilan välisen kosteudensiirron vähentäminen. Laskentatulosten perusteella ryömintätilan tuuletus ja maapohjan lämmöneristys riittävät estämään homeongelmat alapohjan alapinnassa. Rakennetta ei kuitenkaan pidä päästää kostumaan rakennusvaiheessa, koska ryömintätilan laskennassa käytetyn ilmanvaihtuvuuden kyky kuivattaa rakennetta on rajallinen valitusta ilmastotyypistä tai rakenteen alkukosteudesta riippumatta. Puurakenteiden kostuminen tulee aina estää ja valetun lattian (AP3) lattiapinnoite tai –materiaali voidaan asentaa vasta kun pintalaatta on kuivunut riittävästi.





RH 80 % 
RH 95 % 
Vantaa2007 RH 80 % 

Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

AP4

Lattiapinnoite huoneselostuksen mukaan

Lattiaponttilauta 28x95 mm 28

Ilman- ja höyrynsulku

Lämmöneriste mineraalivilla, $\lambda_U=0,036$ W/mK, koolaus 125x50 mm, koolausväli rakennesuunnitelman mukaan 125

Lämmöneriste mineraalivilla, $\lambda_U=0,036$ W/mK (125 + 125 mm), kantava rakenne, lattiakannattajat 300x50 mm, koolausväli rakennesuunnitelman mukaan 250

Tuulensulkumineraalivilla, $\lambda_U=0,032$ W/mK 55

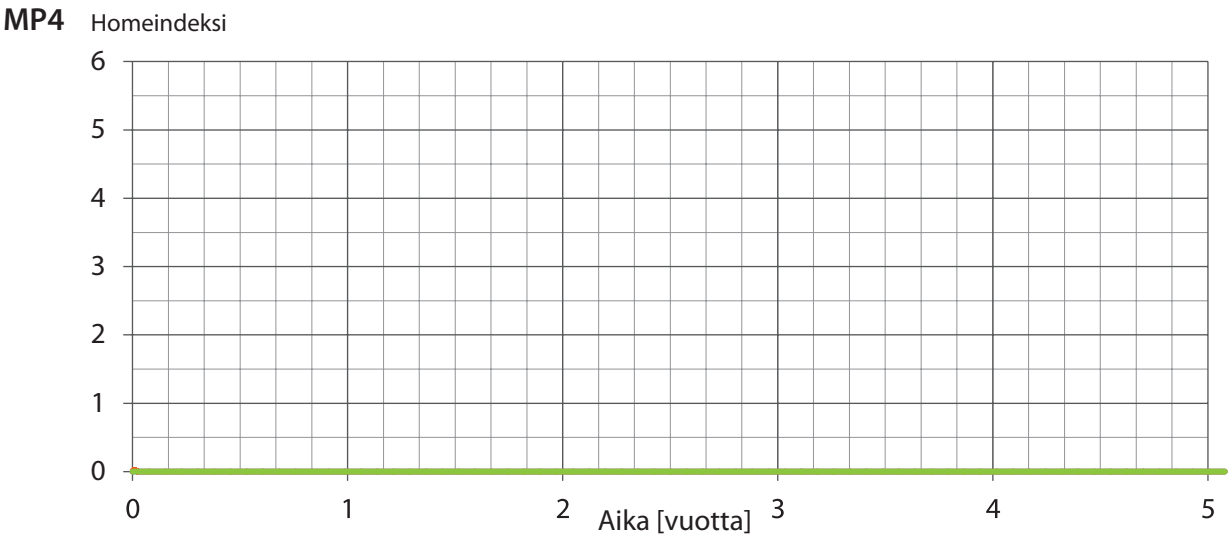
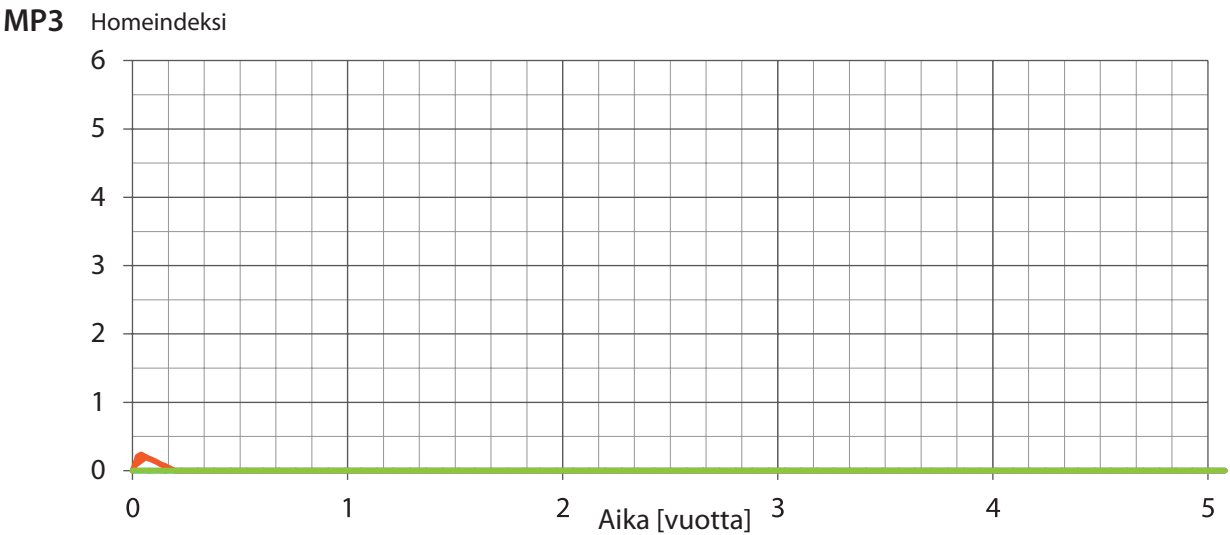
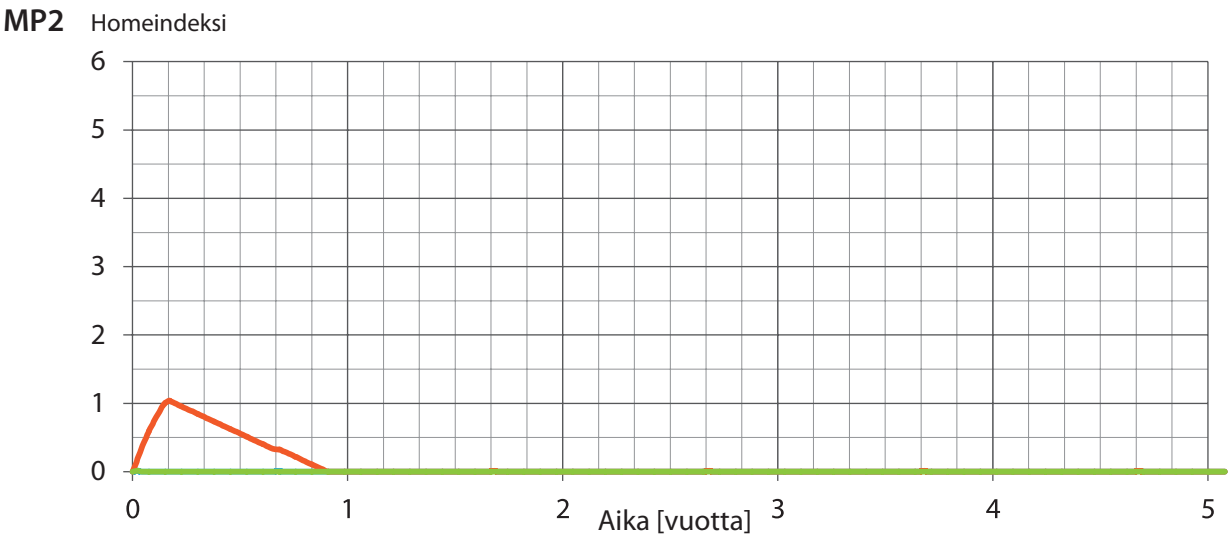
Tuulettuva alustatila, tuuletusaukot 4...8 ‰ alustatilan pinta-alasta. ≥ 800

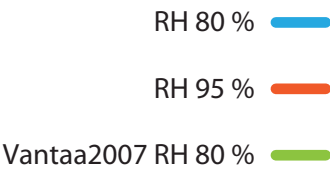
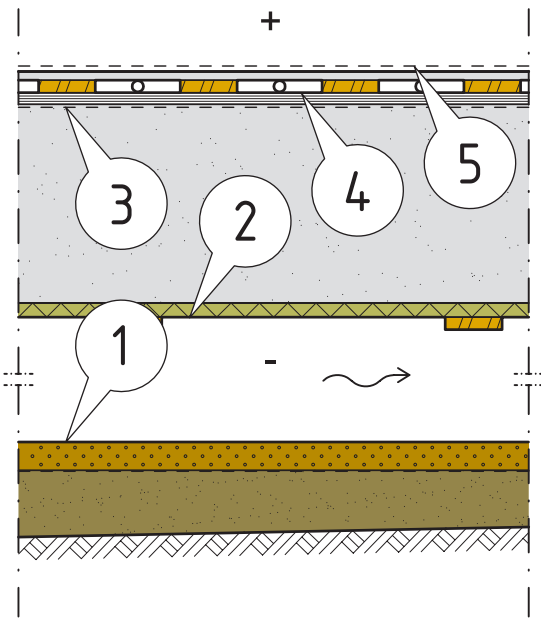
Kevytsora 50...100 mm 50

Suodatinkangas

Soratäyttö

Perusmaa, kallistus salaojiin 1 : 50

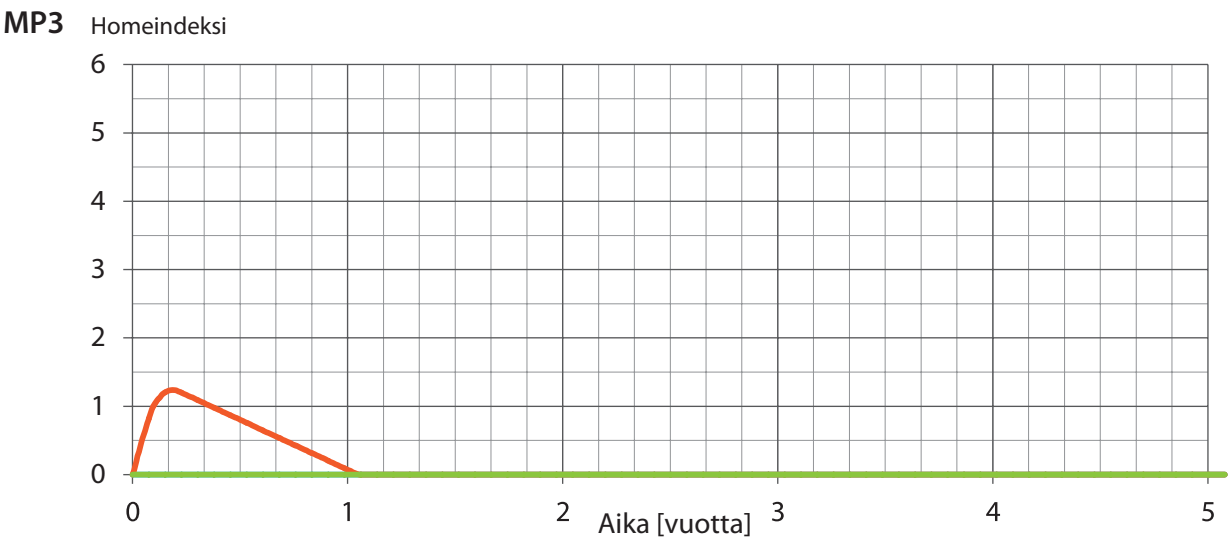
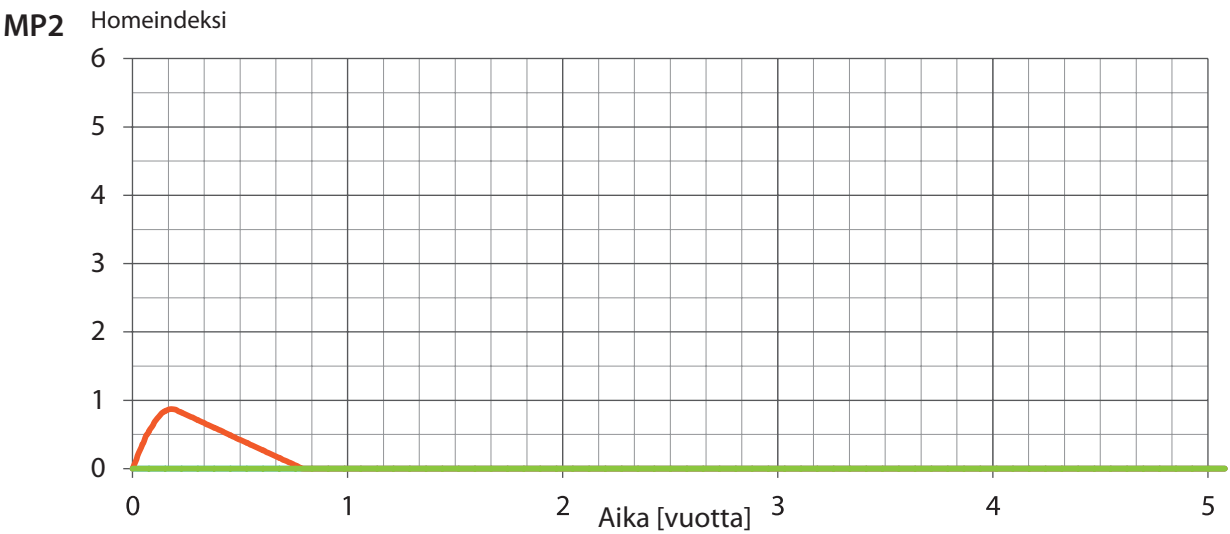


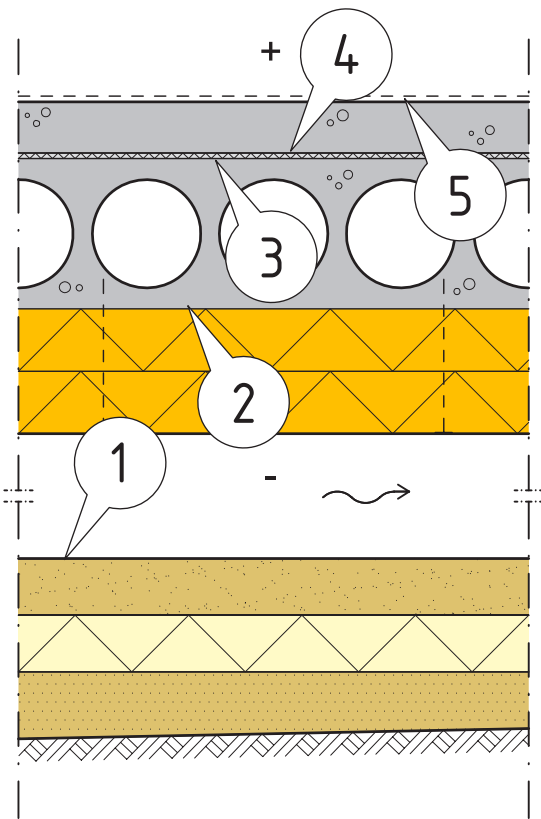


Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

AP5

Lattiapinnoite huoneselostuksen mukaan	
Kipsilevy (mikäli pintamateriaali parketti)	15
Harvalaudoitus, LL-putket/lämmönlvovutuslevyt	22
Vaneri	21
Ilmansulkukangas	0,2
Lämmöneriste, puukuitu, $\lambda_D=0,039\text{ W/mK}$, kantava rakenne	350
Tuulensulkukuitulevy	25
Tukilaudoitus 22x100 mm k600	
Tuulettuva alustatila, tuuletusaukot 4...8 ‰ alustatilan pinta-alasta.	≥ 800
Kevytsora 50...100 mm	50
Suodatinkangas	
Soratäyttö	
Perusmaa, kallistus salaojiin 1 : 50	





Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

AP6

Lattiapinnoite huoneselostuksen mukaan

Teräsbetonilaatta, raudoitus ja betoniluokka rakennesuunnitelman mukaisesti

Umpisolumuovi 10

Kantava rakenne, ontelolaatta, rakennesuunnitelman mukaisesti

Lämmöneriste PU 110+110, $\lambda_D=0,023$ W/mK, saumat vaahdotetaan 220

Tuulettuva alustatila, tuuletusaukot 4...8 ‰ alustatilan pinta-alasta. ≥ 800

Karkea hiekka tai sora 50...100 mm 100

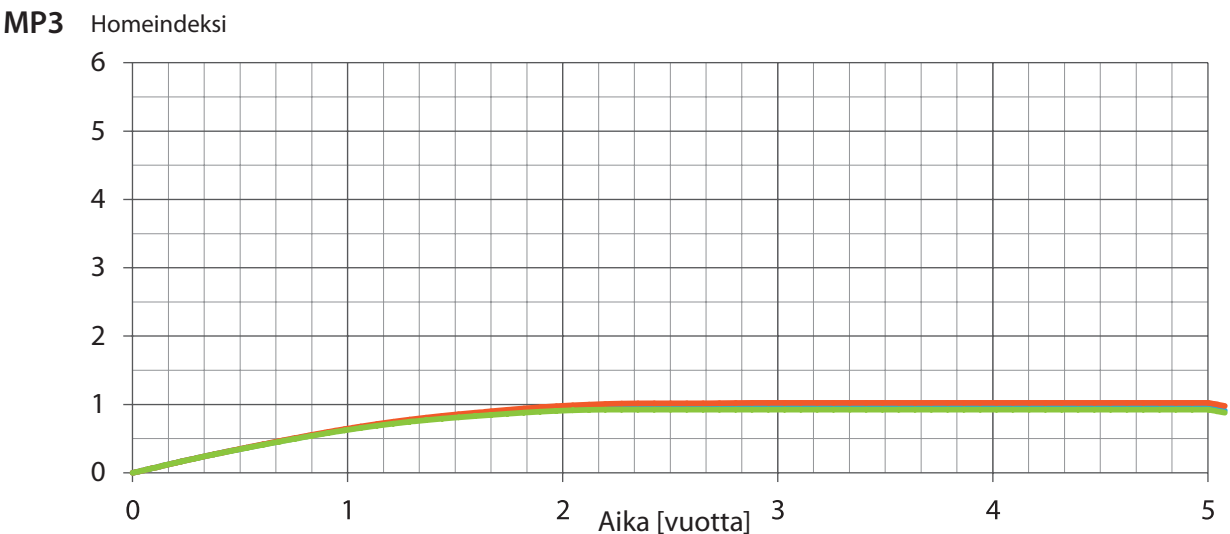
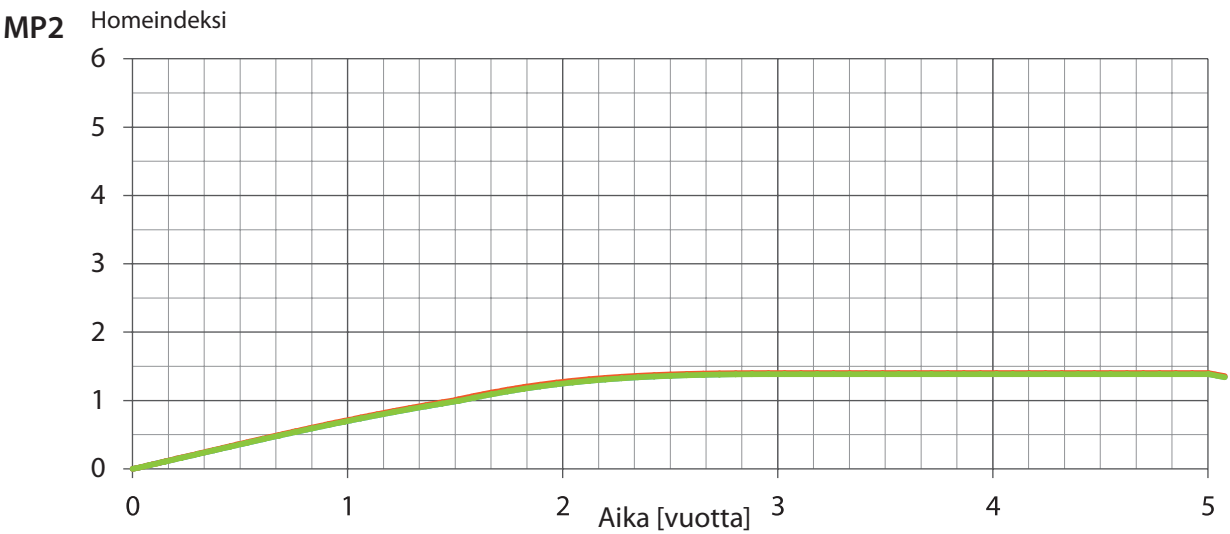
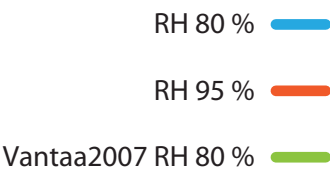
Lämmöneriste EPS 50...100 mm 100

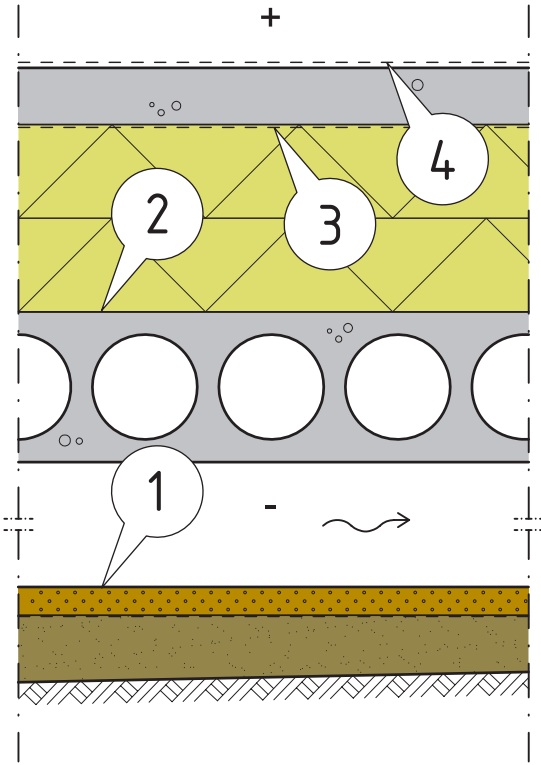
Kuiva tasaushiekka tarvittaessa

Perusmaa, kallistus salaojiin 1 : 50

ALAPOHJAT 6 JA 8

Tuuletettujen alapuolelta lämmöneristettyjen ontelolaatta-alapohjien toimivuuteen vaikuttaa lähinnä ontelolaatan kuivuminen. Kosteus ontelolaatta aiheuttaa teoreettisen homeenmuodostuksen mahdollisuuden. Homeenkasvu on mahdollista, mikäli rajapinnalla on orgaanista ravintoa homeelle. EPS- ja PU-lämmöneristeet ovat homeenkasvun kannalta turvallisia eristysratkaisuja ko. rakennetyypissä. Ontelolaatan ja onteloissa mahdollisesti olevan veden kuivuminen tulee varmistaa.





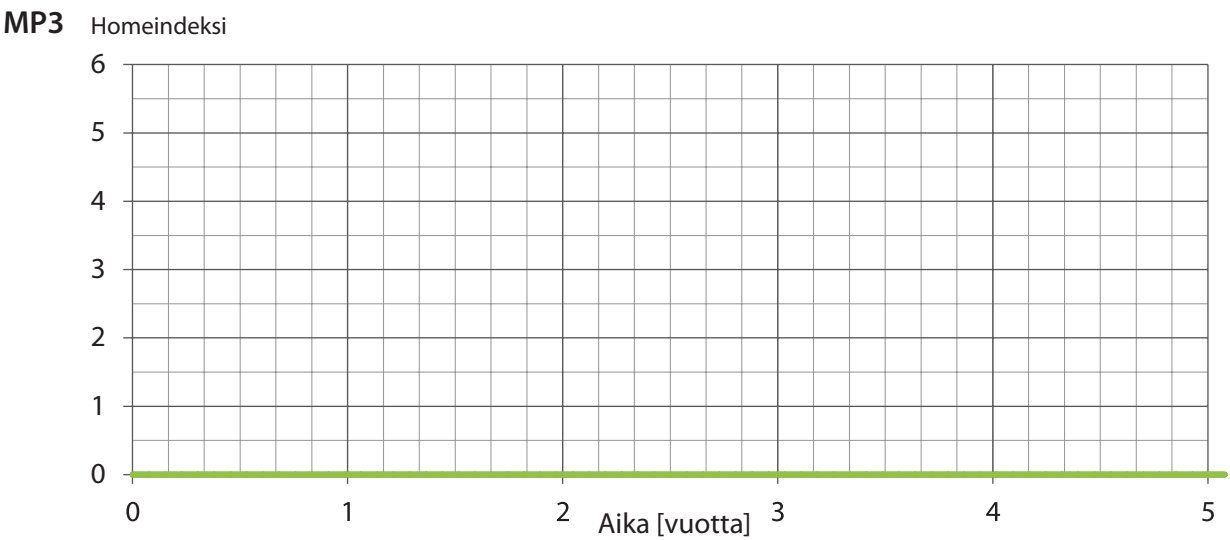
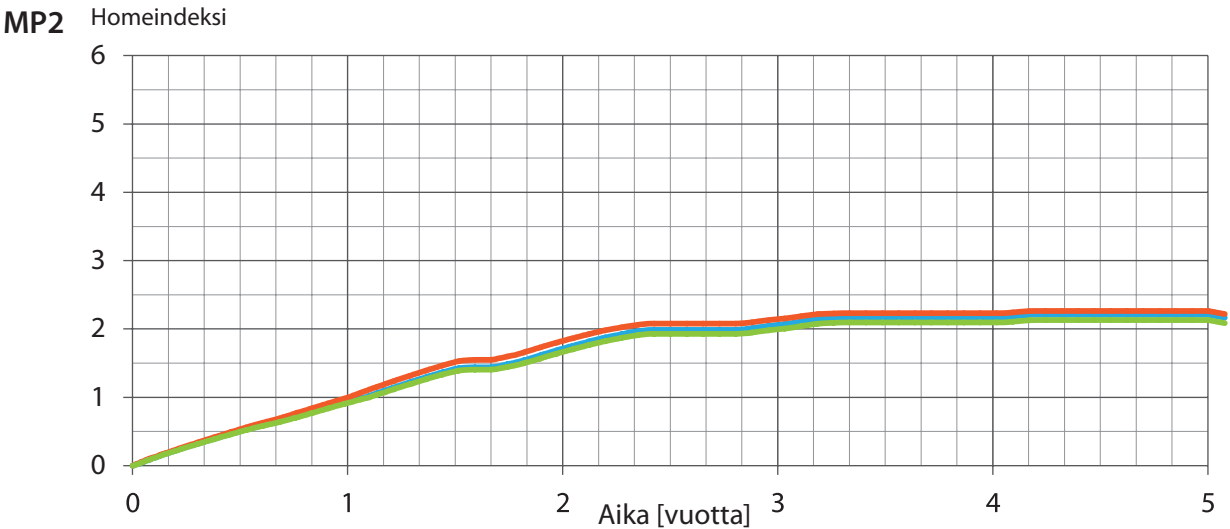
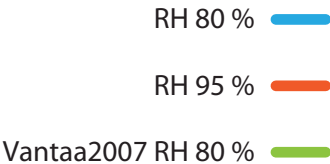
Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

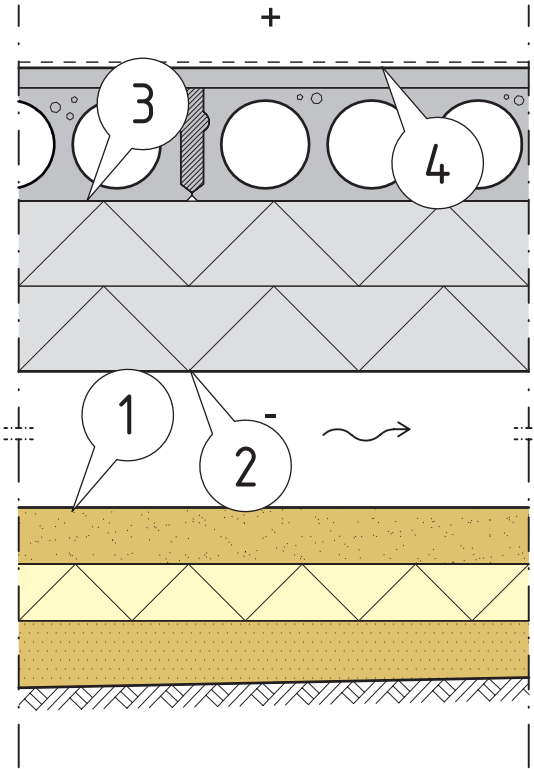
AP7

Lattiatpinnoite huoneselostuksen mukaan	
Teräsbetonilaatta, raudoitus ja betoniluokka rakennesuunnitelman mukaisesti	
Sitkeä pahvi tai kuitukangas	
Lämmöneriste, mineraalivilla, $\lambda_U=0,033\text{ W/mK}$	330
Kantava rakenne, ontelolaatta, rakennesuunnitelman mukaisesti	
Tuulettuva alustatila, tuuletusaukot 4...8 ‰ alustatilan pinta-alasta.	≥ 800
Kevytsora 50...100 mm	50
Suodatinkangas	
Soratäyttö	
Perusmaa, kallistus salaojiin 1 : 50	

ALAPOHJAT 7, 9 JA 10

Laskentatuloksista ilmenee rakennetyypille varsin tyypillinen tilanne. Yläpuolelta lämmöneristetyin ontelolaatan kosteus ei pääse kuivumaan. Ontelolaatan lämpötila on ympäri vuoden rakenteen lämmöneristykseen yläpinnan lämpötilaa matalampi, mikä estää kosteuden siirtymisen ylöspäin rakenteessa. Ryömintätilan ilman kosteus on suhteellisen korkea, jolloin kuivuminen alaspäin on myös hidasta. Rakenne on kuitenkin toimiva, jos ontelolaatalle varataan riittävä kuivumisaika, ja ontelolaatan yläpinta puhdistetaan mahdollisista orgaanisista jätteistä ennen lämmöneristämistä.





Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

AP8

Lattiapinnoite huoneselostuksen mukaan

Tasoite

Kantava rakenne, ontelolaatta, rakennesuunnitelman mukaisesti

Lämmöneriste, harmaa EPS, $\lambda_D=0,031$ W/mK

Tuulettuva alustatila, tuuletusaukot 4...8 ‰ alustatilan pinta-alasta.

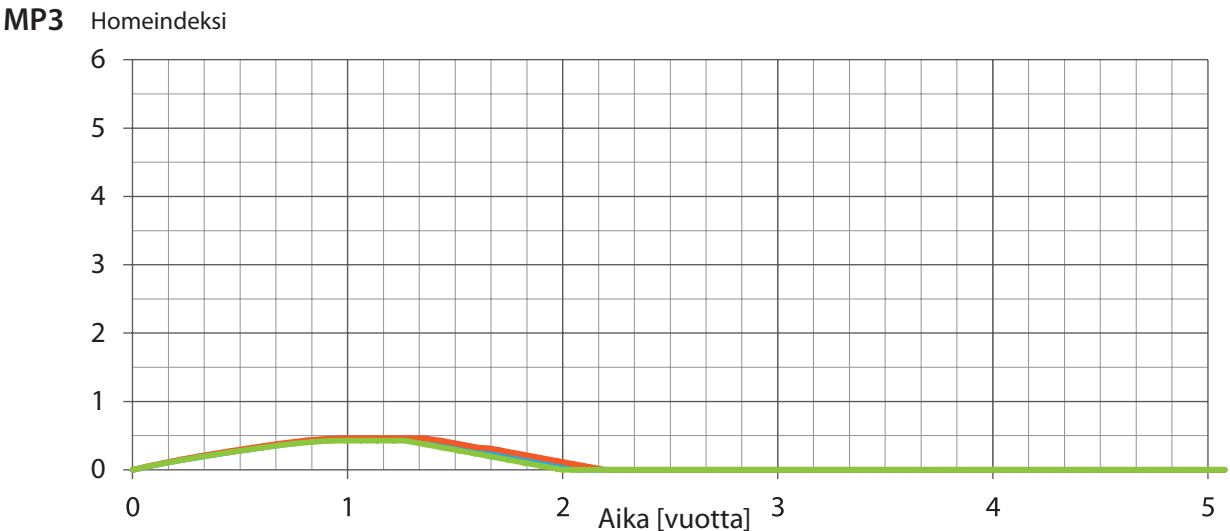
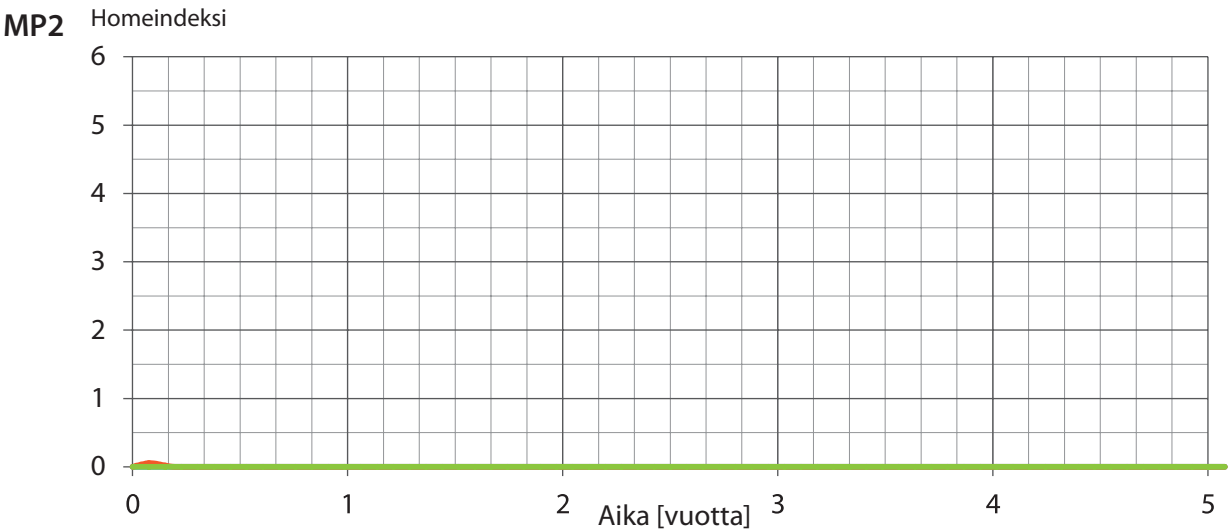
Karkea hiekka tai sora 50...100 mm

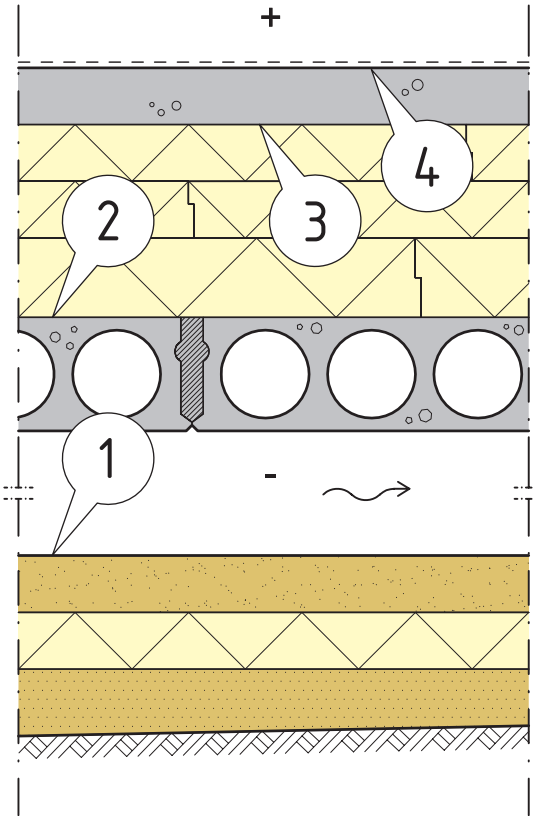
Lämmöneriste EPS 50...100 mm

Kuiva tasaushiekka tarvittaessa

Perusmaa, kallistus salaojiin 1 : 50

- RH 80 %
- RH 95 %
- Vantaa2007 RH 80 %





Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

AP9

Lattiapinnoite huoneselostuksen mukaan

Teräsbetonilaatta 80...100 mm, raudoitus ja betoniluokka rakennesuunnitelman mukaisesti

Lämmöneriste, XPS saumat limittäin, $\lambda_D = 0,035/0,037 \text{ W/mK}$ 340

Kantava rakenne, ontelolaatta, rakennesuunnitelman mukaisesti

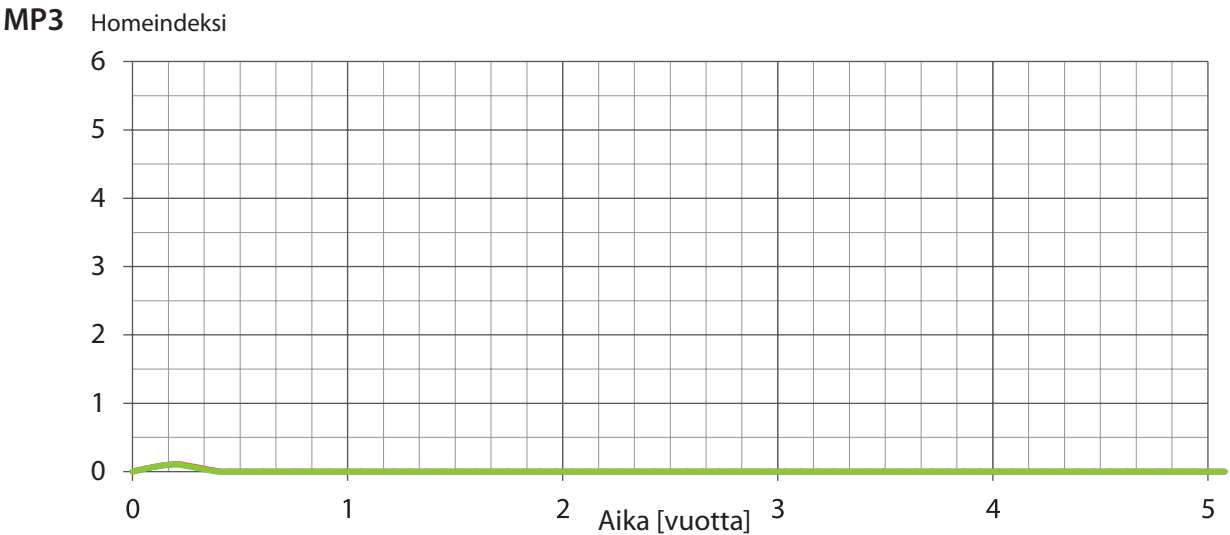
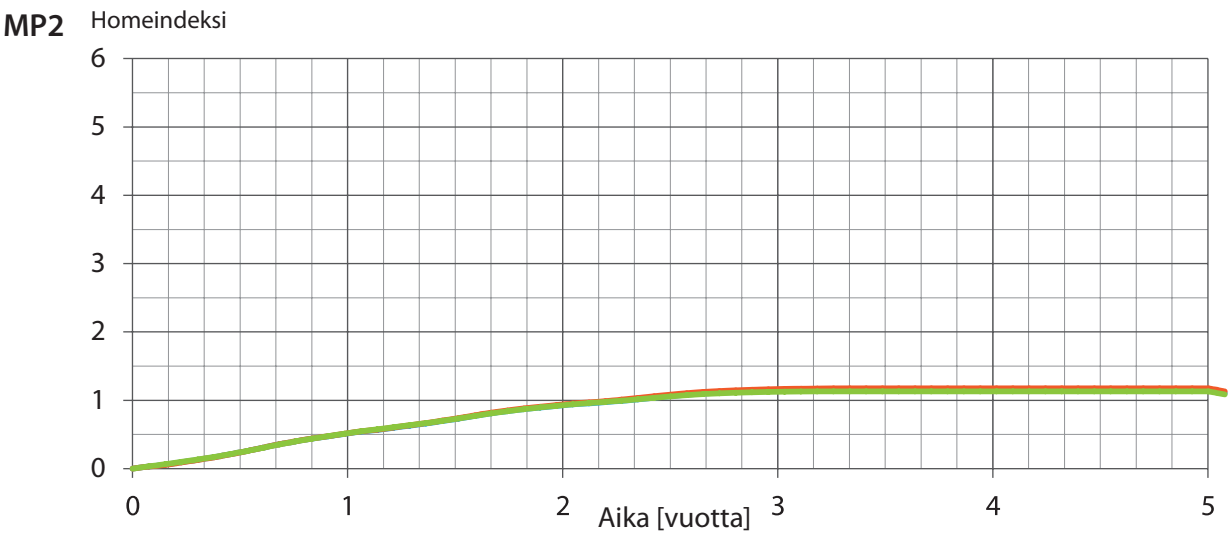
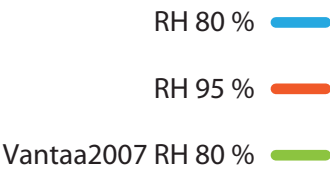
Tuulettuva alustatila, tuuletusaukot 4...8 ‰ alustatilan pinta-alasta. ≥ 800

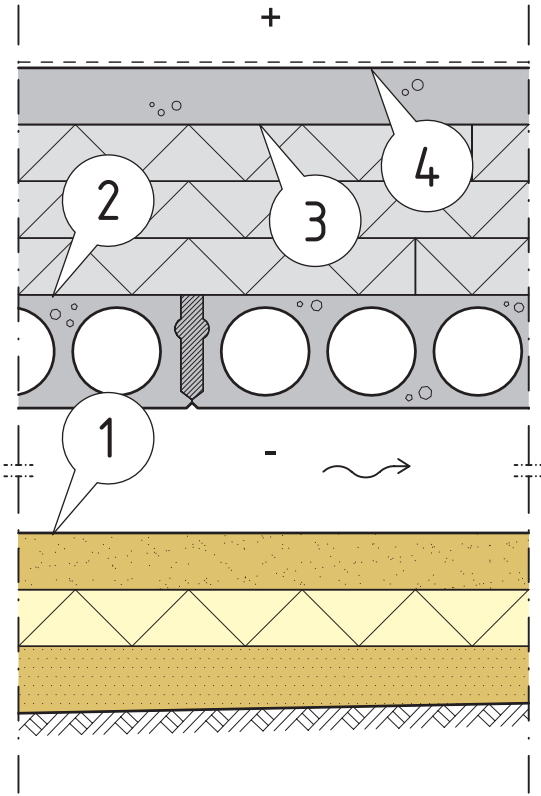
Karkea hiekka tai sora 50...100 mm 100

Lämmöneriste EPS 50...100 mm 100

Kuiva tasaushiekka tarvittaessa

Perusmaa, kallistus salaojiin 1 : 50





Kosteuslaskennassa käytetty monitorointipiste

AP10

Lattiapinnoite huoneselostuksen mukaan

Teräsbetonilaatta 80...100 mm, raudoitus ja betoniluokka rakennesuunnitelman mukaisesti

Lämmöneriste, harmaa EPS-lattia saumat limittäin, $\lambda_U=0,031$ W/mK 300

Kantava rakenne, ontelolaatta, rakennesuunnitelman mukaisesti

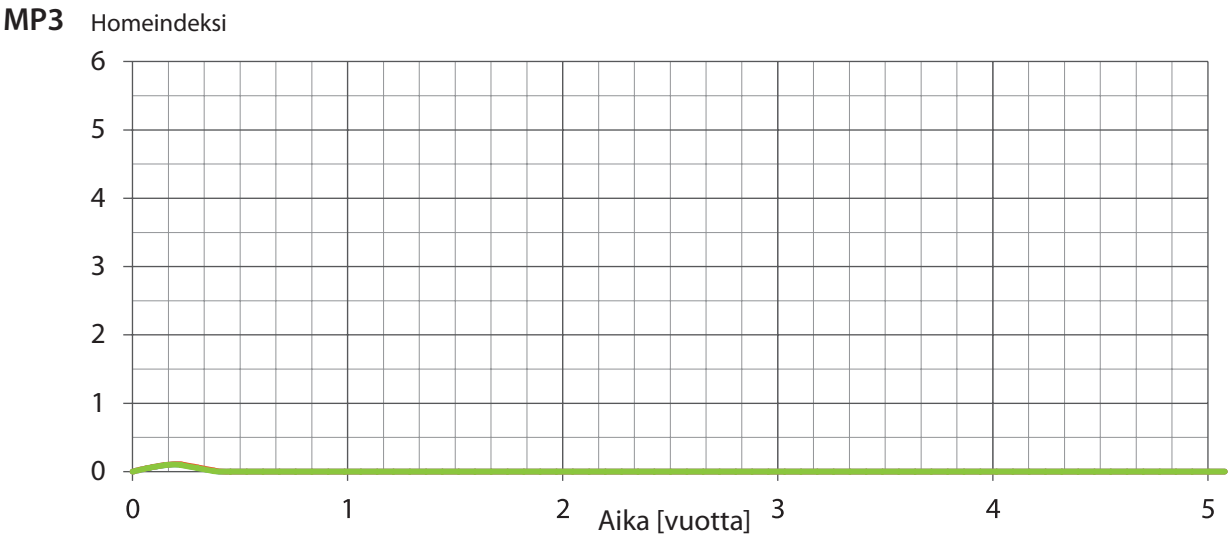
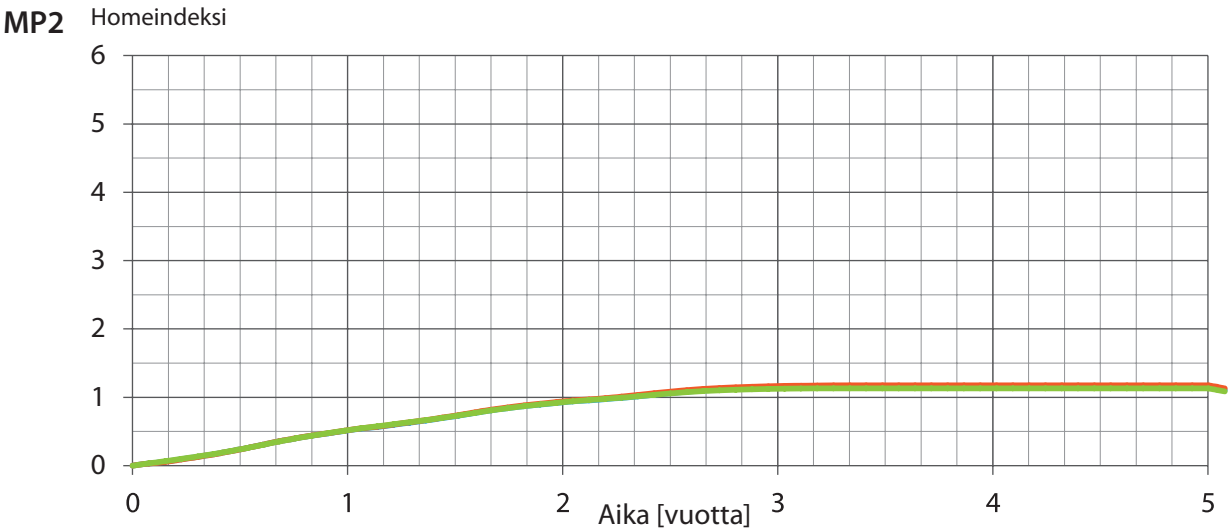
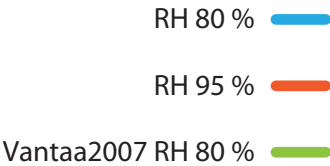
Tuulettuva alustatila, tuuletusaukot 4...8 ‰ alustatilan pinta-alasta. ≥ 800

Karkea hiekka tai sora 50...100 mm 100

Lämmöneriste EPS 50...100 mm 100

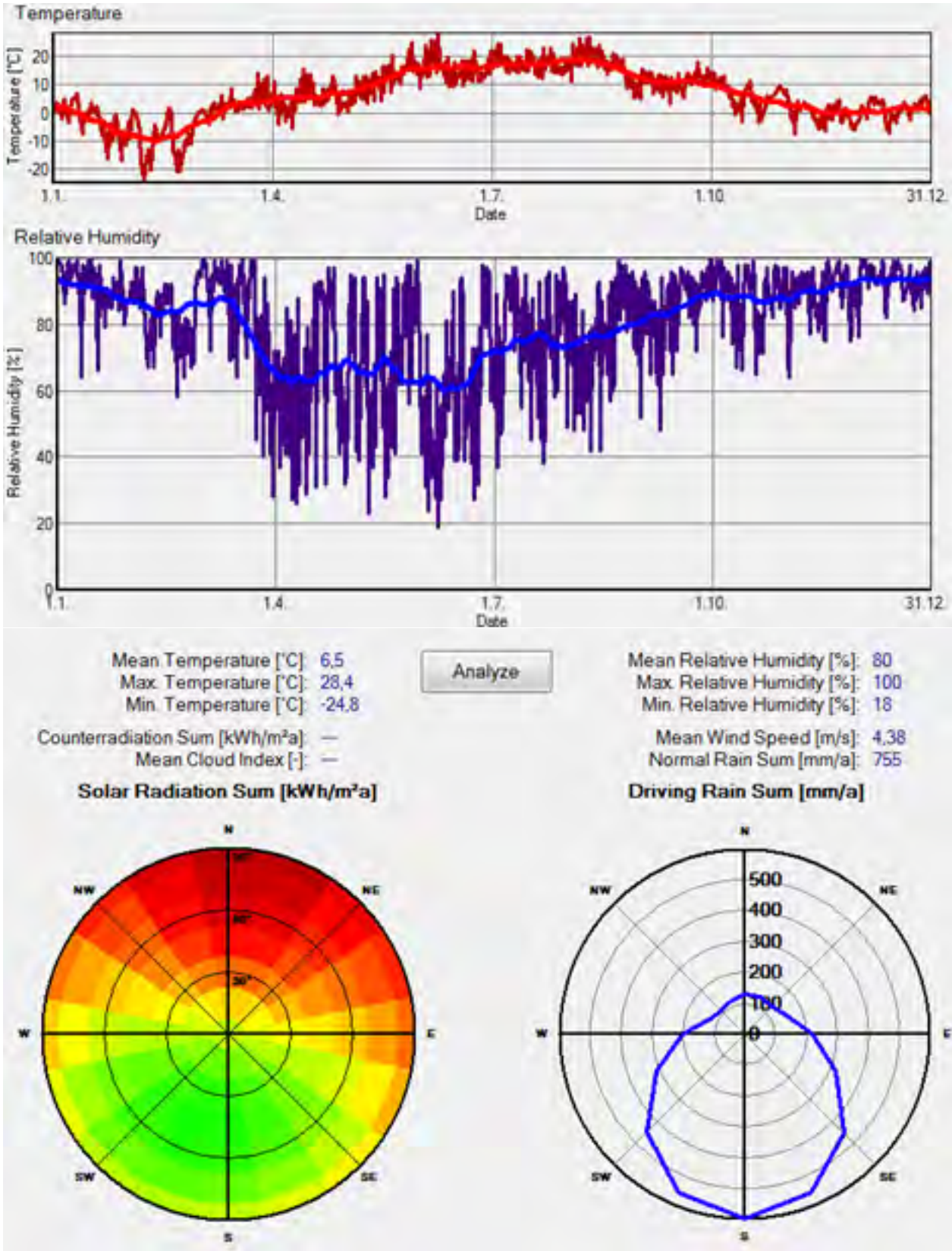
Kuiva tasaushiekka tarvittaessa

Perusmaa, kallistus salaojiin 1 : 50

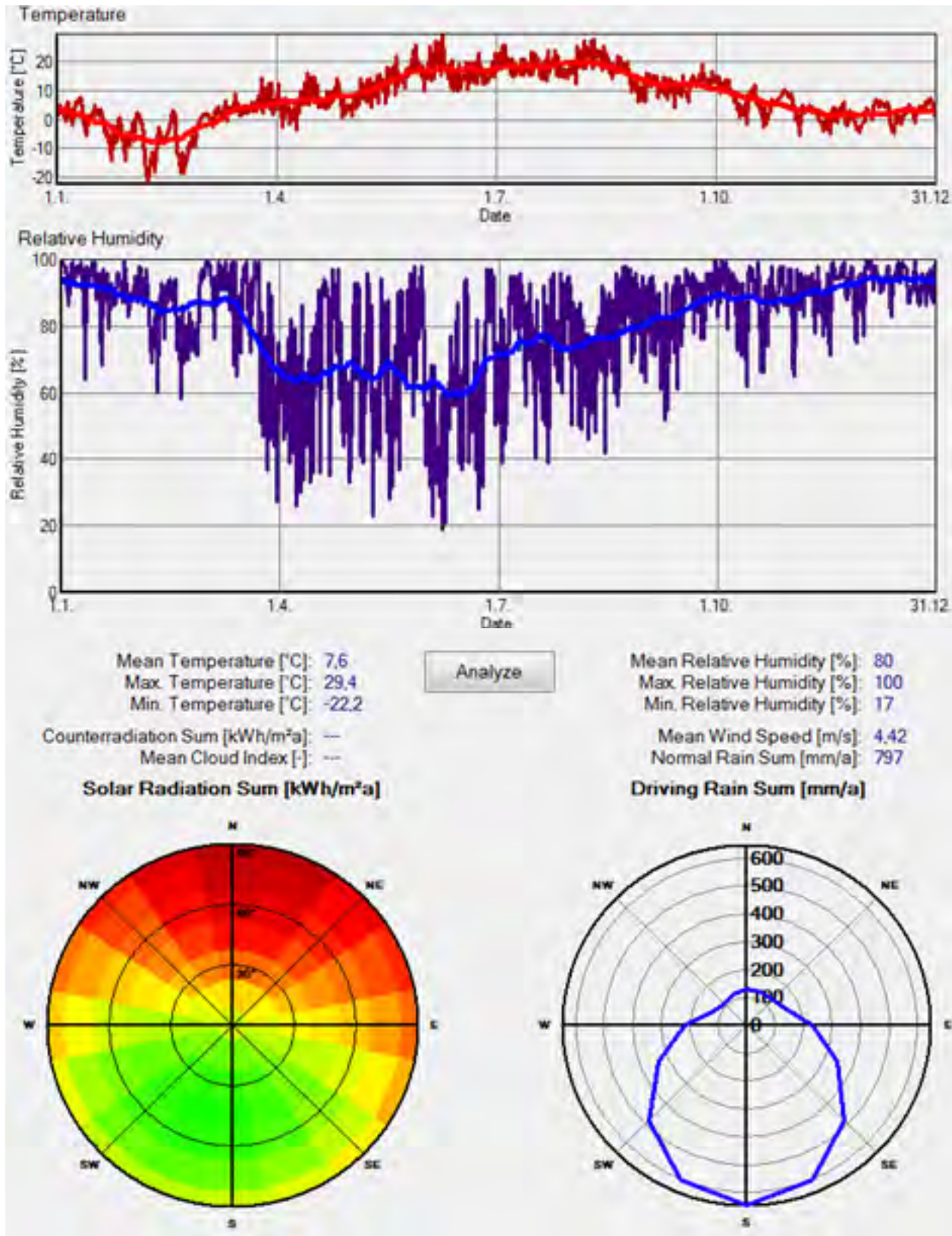


LIITE 5:

Vantaa 2007 ja Vantaa 2030 säätiedot



Vantaa 2007



Vantaa 2030

RAHOITTAJAT

