



Lausunto rakenteiden energiatehokkuuden  
parantamisen vaikutuksista rakenteiden  
kosteustekniseen toimivuuteen

Tilaaaja: Ympäristöministeriö



## TIIVISTELMÄ

Ympäristöministeriössä valmistellaan rakentamismääräyksiä, joiden seurauksena uudisrakennusten energiatehokkuus paranee noin 30 % nykymääräysten mukaiseen rakentamistapaan verrattuna. Jo nykyisen rakennuskannan rakennuksissa ja niiden sisäilmastoissa esiintyy paljon ongelmia, joiden eräs usein toistuva syy on rakenteiden liika kosteus. Suunnitellut muutokset rakenteissa ja erityisesti eristyspaksuuden lisääminen ovat aiheuttaneet huolta rakennusten kosteusteknisen toimivuuden heikentymisestä vielä nykyisestäään, sillä matalaenergiarakentamisen ratkaisut saattavat korostaa rakenneteknisten virheiden vaikutusta.

Tulevien määräysten tavoitetasona on runsaan 30 % parannus nykymääräysten U-arvoihin. Tässä selvityksessä esitetään VTT:n asiantuntemukseen perustuva koostettu näkemys siitä, voidaanko esitetyn tasoinen rakenneosien lämmönläpäisykertoimien parannus toteuttaa niin, ettei se heikennä rakenteiden kosteusteknistä toimivuutta ja turvallisuutta.

Selvityksen perusteella rakenteiden kosteustekninen toimivuus ei aseta rajoituksia lämmöneristystason parantamiselle 30 % - 40 % :lla nykyisiin rakentamismääräyksiin (C3/2007) verrattuna. Useat rakenneosat soveltuvat matalaenergiarakentamiseen sellaisinaan tai kohtuullisen pienin muutoksin. Muutamien yksittäisten rakenneosien valinta matalaenergiakohteisiin edellyttää erityistä asiantuntemusta ja tarkkaa suunnittelua.

Rakennukset ovat usean toisiinsa vaikuttavan tekijän muodostamia kokonaisuuksia. Syitä rakennuskannassa esiintyviin kosteusongelmiin on lukuisia ja niistä monet vaikuttavat usein samanaikaisesti. Tässä selvityksessä tarkasteltiin pelkistetysti lämmönläpäisykertoimen parantamisen kosteusteknisiä vaikutuksia.

Kosteusteknisiä ongelmia ilmenee jo nykytasolla ja huomio on kiinnitettävä ennen kaikkea huolelliseen rakentamistapaan ja toimivien rakennejärjestelmien kehittämiseen. Mahdolliset suunnittelun tai toteutuksen virheiden aiheuttamat kosteusriskit ovat matalaenergiatason rakenteissa samat kuin nykyisen määräystason mukaan tehdyissä. Energiatehokas rakentaminen ei poista kosteusongelmia, mutta jos suunnittelun ja toteutuksen laatu paranee energiatehokkaita rakenteita käytettäessä, kosteusongelmat voivat tätä kautta myös vähentyä. Tutkimuksen ja kehityksen haasteena tulee olemaan uusien, monimuotoisten ja entistä energiatehokkaampien rakennejärjestelmien kosteusteknisesti turvallisen toiminnan varmistaminen muuttuvissa kuormitusoloissa.

---

<b>Tilaaaja</b>	Ympäristöministeriö Teppo Lehtinen PL 35 00230 Valtioneuvosto Laskutusosoite: Ympäristöministeriö, PL 600, 50101 Mikkeli
<b>Tilaus</b>	28.11.2008 päivätty konsulttisopimus YM69/612/2008
<b>Yhteyshenkilö VTT:ssä</b>	<b>VTT</b> Erikoistutkija Tuomo Ojanen PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4743 Sähköposti Tuomo.Ojanen@vtt.fi

---

**Tehtävä** **Lausunto rakenteiden energiatehokkuuden parantamisen vaikutuksista rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen**

Tähän selvitystyöhön osallistuivat VTT:n asiantuntijoina erikoistutkijat Hannu Viitanen, Ruut Peuhkuri, Kalle Tanskanen ja Tuomo Ojanen

**Yleistä**

Tässä selvityksessä esitetään katsaus nykyistä paremmin eristettyjen rakenteiden vaikutuksesta rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen. Selvityksen taustalla on ympäristöministeriössä valmisteilla olevat rakennusten energiatehokkuutta koskevat rakentamismääräykset, joiden avulla saavutetaan noin 30 % säästö nykymääräysten mukaiseen rakentamiseen verrattuna. Työssä pyritään antamaan riittävä näkemys siitä, voidaanko eri rakenneosien lämmönläpäisykertoimia parantaa nykymääräyksiä mukaisesta tasosta valmisteilla olevan esityksen mukaisesti ilman, että tämä aiheuttaisi riskin rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen ja turvallisuuteen.

Selvityksessä on pyritty antamaan vastaus pelkistetysti lämmönläpäisykertoimen parantamisen vaikutuksiin, mutta useissa kohdin on tämän ohella ollut syytä tarkastella rakenteen tyypillisiä kosteustekniseen toimivuuteen vaikuttavia riskitekijöitä yleisesti.

**Tausta ja tavoitteet**

Rakennusten lämmöneristys- ja energiatehokkuusmääräysten parantaminen edellyttää rakenteiden lämmönläpäisykertoimien (U-arvojen) pienentämistä nykyisiä määräyksiä vastaavista tasoista. Tulevien määräysten tavoitetasona on runsaan 30 % parannus nykymääräysten U-arvoihin.

Rakenteiden lämpötilakentän muutos vaikuttaa suoraan myös niiden kosteustekniseen toimivuuteen: kosteudensiirtymiseen vaikuttavat vesihöyryn osapainegradientit muuttuvat ja rakenteen ulkopuolen kerrokset ovat entistä lähempänä ulkoilman olosuhteita, mikä voi lisätä kosteuden seurannaisvaikutuksia, esimerkiksi biologisten haittojen, kuten homeen kasvun mahdollisuuksia. Tä-

mä on johtanut epäilyihin nykyistä paremmin eristettyjen rakenteiden rakennusfysikaalisesta (yhdistetty lämpö- ja kosteustekninen) toimivuudesta.

Rakennuksissa ja niiden sisäilmastoissa esiintyy paljon ongelmia, joiden eräs pääasiallisista syistä on liika kosteus väärässä paikassa. Siksi muutokset rakenteissa aiheuttavat huolta myös niiden kosteusteknisen turvallisuuden kannalta. Syitä kosteusongelmiin on lukuisia ja usein monia samanaikaisesti vaikuttavia. Pelkästään paremmasta lämmöneristystasosta johtuvia kosteusvaurioita ei ole tiedossa.

Suuri osa rakenteista tehdään vastaamaan voimassa olevien määräysten minimitasoa, mutta myös matalaenergiarakenteita on tutkittu, kehitetty ja rakennettu. Rakennukset ovat usean toisiinsa vaikuttavan tekijän muodostamia kokonaisuuksia, joten yhdessä rakenteessa ilmenevät ongelmat ovat yleensä useiden tekijöiden yhteisvaikutuksesta johtuvia. Siten yksittäisen tekijän erottaminen kokonaisuudesta ei aina ole mahdollista.

Olellainen kysymys on, voidaanko rakenteiden lämmöneristystasoa parantaa ehdotetulla tavalla ilman, että tämä lisää kosteusteknisen toimivuuden riskejä. Tämän selvityksen tavoitteena on vastata kysymykseen olemassa olevan tiedon pohjalta. Selvityksessä pyritään arvioimaan paremman eristystason mahdollisesti aiheuttamaa kosteusteknisen toimivuuden riskin kasvun suuruusluokkaa ja suhteuttamaan se muihin kosteuskuormitusta aiheuttaviin tekijöihin.

Käytännön kannalta on tärkeää tietää, kuinka suurina ovat lämmöneristysten parantamisen aiheuttamat mahdolliset muutokset eri rakennetyyppien toimivuusvaatimuksiin.

Selvityksen perusteella rakenteet jaetaan neljään ryhmään sen perusteella, miten kosteustekninen toimivuus muuttuu ja miten se tulee ottaa huomioon tehtäessä rakenteista ehdotuksen mukaista matalaenergiatasoa vastaavia:

- a) Rakenneosissa ei ole merkittävää, paremmasta U-arvosta johtuvaa kosteusteknistä riskiä
- b) Rakenneosissa ei ole riskiä, kun niihin tehdään matalaenergiatason edellyttämät, kosteusteknisen toimivuuden varmistavat muutokset
- c) Rakenneosissa on riski, joko voidaan yksilöidä ja siihen voidaan kehittää ratkaisuja erillisissä hankkeissa
- d) Rakenneosia ei voida toteuttaa esitettyjen tavoitteiden mukaisesti ilman merkittäviä kosteusriskejä, jotka yksilöidään.

## Toteutus

Selvitys pohjautuu VTT:ssä olemassa olevaan, lukuisissa tutkimus-, kehitys- ja selvityshankkeissa hankittuun asiantuntemukseen.

## Tarkastelumenetelmistä

50-luvun lopulla Glaser /1/ kehitti menetelmän, jolla voidaan laskennallisesti arvioida kapasiteetittoman rakenteen vesihöyryvirtoja asetetuissa kastumis- ja kuivumistilanteen oloissa. Näiden kosteuskertymien tase kuvasi rakenteen toimivuutta. Tämä tarkastelu soveltui lähinnä kylmävarastojen rakenteiden toimivuuden arviointiin ja mitoitukseen. Parempien menetelmien puuttuessa tätä ns. Glaserin menetelmää alettiin soveltaa myös ulkovaipparakenteisiin.

Vielä pelkistetympi menetelmä on ns. kastepistemenetelmä, jossa rakenteen toimivuutta arvioidaan valituissa olosuhteissa siihen mahdollisesti muodostuvan laskennallisen vesihöyryn kyllästyspisteen avulla. Vielä nykyäänkin kastepistettä näkee käytettävän kuvattaessa esimerkiksi paremman eristystason muodostamia riskejä rakenteiden toimivuuteen. Nämä menetelmät jättävät huomiotta mm. olosuhteiden dynamiikan, muut kuin sisäilman kosteuslähteet (alkukosteus, sade, kapillaarisesti siirtyvä tai ilmavirtausten kuljettama kosteus), materiaalien kosteuskapasiteetit, olosuhteiden mukaan muuttuvat ominaisuudet, auringon säteilyn ja vastasäteilyn, ja ne antavat pelkistetyn kuvan yhdestä valitusta tilanteesta.

Nykyinen tietämys materiaalien dynaamisen kosteusteknisen toimivuuden perusteista on kehittynyt rakennusfysiikan tutkimuksen alkuajoista. Rakennuksen ulkovaipan rakenteet ovat alttiina muuttuville ilmasto-oloille, niiden materiaaleilla on usein huomattava kosteuskapasiteetti hygroskooppisella alueella /2/ ja hetkellinen kondenssi on enemmän sääntö kuin poikkeus useimmissa rakenteissa.

Dynaamisten laskenta- ja simulointimallien asiantunteva käyttö yhdessä kokeellisen käytännön tiedon kanssa on paras tapa selvittää monimuotoisten rakenteiden toimivuuden vaatimukset todellisia vastaavissa oloissa sekä arvioida eri tekijöiden vaikutuksia toimivuuteen.

## Yleistä kosteustekniseen toimivuuteen vaikuttavista tekijöistä

Rakennuksen kokonaistoimivuus merkitsee sen ulkovaipan, taloteknisten järjestelmien sekä sisä- ja ulkoilmaston muodostaman kokonaisuuden hyvää yhteensopivuutta ja niiden eri osien tarkoituksenmukaista toimivuutta rakennuksen käytön aikana.

Yksittäisten rakenneosien toimivuus riippuu muusta kokonaisuudesta. Ohessa joukko yleisiä tekijöitä, jotka vaikuttavat suoraan rakennuksen tai rakenteiden kokonaistoimivuuteen tai jotka on otettava huomioon eri rakennetapauksissa.

### Ilmatiiviys

Ulkoiset ilmavirtaukset rakenteeseen tai sen läpi tulee estää riittävällä tuulensuojauksella ja rakennuksen ilmatiiviydellä. Tuulensuojauksen ja rakenteiden ilmatiiviyden hallinta ovat matalaenergiarakentamisen olennaisia vaatimuksia. Tiivis ulkovaippa mahdollistaa painesuhteiden ja ilmanvaihdon tarkan hallinnan estämällä samalla epäpuhtauksien ja esimerkiksi radonin pääsyn sisäil-

maan. Merkittävät vuotoilmavirtaukset voivat pilata rakenteen lämpö- tai kosteusteknisen toimivuuden /3, 4/.

Nykyinen rakennusten ilmatiivyyden merkityksen korostaminen edistää hyvää rakentamistapaa, jossa edellytetään detaljien tarkkaa suunnittelua ja niiden käytännön toteutusta.

Tässä tarkastelussa rakennuksen ilmatiiviys oletetaan riittäväksi niin, etteivät rakenteeseen tai sen läpi tapahtuvat sisä- tai ulkoilman virtaukset vaikuta sen toimintaan.

### Sisäisen konvektion merkitys

Sisäinen konvektiovirtaus rakenteen lämmöneristekerroksessa voi vaikuttaa lämpötila- ja kosteuskentän jakaumaan erityisesti seinärakenteissa. Edellytyksenä konvektiolle on, että lämmöneriste on hyvin ilmaa läpäisevää materiaalia tai, että lämmöneristeen ja muiden materiaalikerrosten rajapinnoilla on virtausta edistäviä rakoja.

Tutkimusten /5,6 / perusteella luonnollinen pelkkä lämmöneristeen sisäisen konvektion merkitys jää vähäiseksi. Lämpöhäviöiden kasvu seinässä, jossa on 300 mm paksu yhtenäinen mineraalivillaeristeontelo, on 1 – 2 % luokkaa, kun lämpötilat seinän eri puolilla ovat +20 / -20 °C.

Laboratoriokokeissa rakenteille on mitattu suuruusluokaltaan suurimmillaan 10 - 15 % heikennyksiä U-arvossa, mikä kuvaa rakenteen rajapintojen epäideaalisuuksien ja rakojen konvektiota edistävää vaikutusta sen lämpötekniiseen toimintaan. Konvektio tehostuu kun lämmöneristeontelon paksuus ja sen pinta-lämpötilojen ero kasvaa. Alemmilla lämpötilaeroilla myös konvektion merkitys on pienempi.

Sama konvektiovaikutus näkyy myös kosteuden kulkeutumisessa rakenteen sisällä: kosteus kulkeutuu ilmavirran mukana ja hakeutuu kylmimpiin kohtiin ontelon ulkopinnassa. Kosteus ei lisäännä rakenteessa sen sisäisen konvektion vaikutuksesta, vaan se jakautuu uudelleen. Konvektion aiheuttama paikallinen kosteuden kerääntyminen liittyy selviin virheisiin eristekerroksessa, jolloin rakenne ei myöskään täytä sille asetettuja lämmöneristävyysvaatimuksia.

Yhteenvetona konvektion merkityksestä on, että rakentamisen laatu – niin suunnitelmien kuin toteutuksen – on ratkaisevassa asemassa eristerakenteen toimivuuden kannalta. Tämä korostuu lämpötekniisessä toimivuudessakin. Konvektio voi esiintyä matalaenergiarakenteissa voimakkaampana kuin ohuemmissa eristerakenteissa. Lämpötekniisesti hyvin toimivissa rakenteissa myös konvektio on vähäistä, eikä sillä ole olennaista vaikutusta kosteusriskeihin. Jos kosteusongelmia esiintyy, on rakenteessa liikaa kosteutta jostain muusta virhetilanteesta johtuen.

Sisäisen konvektion rajoittaminen on syytä ottaa huomioon matalaenergiarakenteiden suunnittelussa ja toteutuksessa erityisesti seinärakenteissa. Seinärakenteiden eristeontelot voidaan rakenteellisesti katkaista konvektiota estävin

kerroksin ja konvektiota voidaan olennaisesti vähentää tuulensuojan ulkopuolisella eristekerroksella  $1/5 - 7/$ . Tällaiset rakenneratkaisut ovat suhteellisen helposti toteutettavissa useista kerroksista tehtyjen eristysten tapauksessa. Suunnittelussa ja toteutuksessa tulee varmistaa lämmöneristeen rajapintojen ilmatiiviys. Ylä- ja alapohjan vaakaeristeissä konvektion riski ja merkitys on huomattavasti pienempi kuin seinissä tai kallistetuissa rakenteissa.

### Massiivisuuden merkitys

Rakenteen lämmöneristävyttä kuvaavaa U-arvoa ja sen termisen massan dynaamisia vaikutuksia ei tule sekoittaa keskenään. Rakenteen U-arvo on laskennallisesti tai kokeellisesti määritetty, varmuutta sisältävä tekijä, joka kuvaa rakenteen mitoitusilanteen lämpöhäviötä sen pinta-alayksikköä kohden jatkuvuustilassa (lämpötilat vakioita) ja käyttöolosuhteiden kosteudessa. Rakenteeseen ei U-arvomäärityksen perusteella kohdistu auringon säteilyä tai taivaan vastasäteilyä ja sen pintojen konvektiiviset lämmönsiirtokertoimet ovat vakioita. U-arvon määritelmä mahdollistaa rakenteiden vertailun keskenään samoissa oloissa. On selvää, että käyttöoloissa erilaiset dynaamiset ilmastotekijät vaikuttavat rakenteen lämpövirtoihin, eikä niillä siten ole suoraa yhteyttä U-arvoon.

Rakenteen terminen massa vaikuttaa rakenteen kosteuskenttään välillisesti lämpötilan muutostilanteissa. Vaikutus on käytännössä merkityksetön kosteusteknisen pitkäaikaistoimivuuden kannalta. Rakenteen lämmöneristeen sisäpuolinen terminen ja hygroskooppinen massa voivat parantaa sisäilman viihtyisyyttä tasoittamalla vaihtelevien kuormien aiheuttamia ilman lämpötila- ja kosteusvaihteluita.

### Rakennusten jäähdytys

Rakennuksen jäähdytystarve aiheutuu sen sisäisistä lämpökuormista, ulkoa sisälle tulevasta lämpövirroista (merkittävin tekijä on yleensä auringon säteily ikkunoiden kautta), rakenteiden kyvystä sitoa sisäilman lämpökuormia (sisäpuolinen terminen massa) ja rakennuksen käyttötarpeen asettamista vaatimuksista sisäilman olosuhteille.

Tarkastellaan toimistohuonetta, jonka ulkoseinä on 3 m leveä ( $h=2,5$  m) ja siinä on  $2,5$  m<sup>2</sup> ikkuna. Oletetaan kesäaikana sisäilman lämpötilaksi  $+25$  °C ja ulkoilman  $+15$  °C. Jos rakenteiden U-arvoja parannetaan runsaat 30 % nyky-määräyksistä (seinä  $0,24$ :stä  $0,14$ :ään  $W/Km^2$  ja ikkuna  $1,4$ :stä  $1,0$ :aan  $W/Km^2$ ), pienenee johtumishäviö rakenteiden kautta ulos näissä oloissa noin 14 W. Tämä on pieni arvo verrattuna auringon säteilytehoon (voi olla useita satoja  $W/m^2$ ) tai sisäisiin kuormiin. Lämpöhäviöillä rakenteiden kautta ei ole juurikaan merkitystä jäähdytystarpeeseen, olennaista on minimoida auringon säteilykuormitus ja sisäiset kuormat.

Kesäajan ajoittainen kondenssi höyrynsulun ulkopuolella on mahdollinen, mutta merkittävää on kosteuden määrä rakenteessa. Vaikka auringon säteilyn lämmittävä vaikutus, korkea ulkoilman lämpötila ja huonetilan jäähdytys voivat johtaa hetkelliseen kosteusvirtaan rakenteen uloimmista osista sisälle päin, ei tämä tuo olennaista riskiä rakenteeseen. Tyypillisesti kuivumisjakso ulos-

päin on kesäaikaanakin Suomessa huomattavasti pidempi kuin jaksot, jolloin kosteuden on mahdollista siirtyä sisäänpäin. Lämmöneristyksen määrän kasvatus ei ainakaan edistä kosteuden siirtymistä sisäänpäin, joten mahdollinen ongelma koskee yleensä rakenteita, eikä korostu matalaenergiarakenteissa.

### Rakenteen ulkopinnan lämpötila

Kun rakenteen lämmönläpäisykerrointa parannetaan (U-arvoa pienennetään), vähenee lämpöhäviöiden lämmittävä vaikutus ja erityisesti sen ulkopinnan kerrokset ovat lähellä ulkoilman olosuhteita.

Tuuletetuissa rakenteissa niiden ulkopinta on lähellä tilannetta, jossa materiaalit ovat sateelta suojattuina tuuletetussa, lämmittämättömässä varastossa. Esimerkiksi puu ei lahoa tällaisissa oloissa, vaikka sen pintaan voi kasvaa homepilkkuja tai tulla sinistymiä. Tällaisissa oloissa ei materiaalien rakenteellinen vaurioituminen ja lujuuden menetys ole todennäköistä Suomen ilmastossa. Poikkeuksena on täysin suojaamattoman metallipinnan korroosio, mutta tällaisia materiaaleja ei rakenteissa ole.

Toimivuuden edellytyksenä on, että tuuletus ja sateensuojaus ovat toimivat ja muut kosteuskuormat ovat hallittuja, ts. rakenteen alkukosteus ja sisäilmasta tuleva kosteuskuormitus ovat kohtuullisella tasolla tuuletukseen nähden.

Suurella osalla rakenteita lämmöneristystaso on jo nykyään niin hyvä, että lämpöhäviöiden aiheuttama ulkopinnan lämpötilataso ei juuri eroa lämmittämättömän rakenteen tapauksesta. Lisäksi riittävän alhaiset lämpötilatasot (tyypillisesti  $< 0\text{ °C}$ ) rajoittavat tehokkaasti esimerkiksi korroosiota ja homeen kasvua.

### Rakenteiden kuivumispotentiaalit

Toinen kosteusteknisen toimivuuteen vaikuttava tekijä on rakenteen lämpötilagradientin muutos lämmöneristyksen kasvaessa, mikä vaikuttaa vesihöyryn osapainegradienttiin ja edelleen rakenteen kuivumiskykyyn. Gradientti on potentiaaliero jaettuna etäisyydellä, tässä kosteuden kulkumatalla rakenteen läpi, ts. rakenteen paksuudella.

Rakenteen paksuuden kaksinkertaistaminen, esimerkiksi lämmöneristyskerroksen kasvatus 200 mm:stä 400 mm:iin, pienentäisi gradientin puoleen. Tämä siis alentaa rakenteen läpi suuntautuvia kosteusvirrantiheyksiä. Toisaalta myös gradientti tuulensuojan tai muun vastaavan kerroksen yli alenee, kun lämpötilat rakenteen ulkopinnan lähellä lähestyvät ulkoilman tasoa. Tämä pienentää kosteudensiirtymistä kyseisen kerroksen läpi. Olennaista on kuitenkin se, onko tämä muutos merkittävä rakenteen kuivumiskyvyn kannalta. Tähän taas vaikuttavat materiaalikerrosten kosteudensiirto-ominaisuudet enemmän kuin itse siirtopotentiaali.

Vielä merkittävämpää on, minkä suuruinen kosteudensiirto rakenteesta ulos on välttämätön, jotta rakenne toimii turvallisesti. Kun rakenteet sekä rakennus ovat kokonaisuutena toimivia, on sisäilmasta peräisin olevan kosteuden määrä



normaalirakenteilla hyvin pieni verrattuna esimerkiksi alkukosteuden edellyttämään kuivumiskykyyn tai muihin satunnaisiin kosteuskuormiin.

Rakenteiden kosteusteknisessä toimivuudessa on olennaista, kuinka suuriin satunnaisiin kuormiin tulee varautua, ts. kuinka paljon rakenteen tulee voida sietää sen tai jonkin muun rakennusosan virheestä aiheutuvaa ylimääräistä kuormitusta.

### Vastasäteilyn merkitys

Rakenteesta ulospäin säteilynä tapahtuva lämmönsiirto aiheuttaa ajoittain rakenteen ulkopinnan jäähtymisen ulkoilmaa tai sen vesihöyryn kyllästyslämpötilaa alemmalle tasolle. Säteilyjäähdyminen johtuu ympäröivien pintojen tai erityisesti kirkkaan taivaan näkymisestä ympäröivää ilmaa kylmempänä, jolloin tämä ns. vastasäteily jäädyttää pintoja. Ilmiö näkyy esimerkiksi hyvin eristetyissä ikkunoissa ja kevytrakenteisen yläpohjan alapuolisissa materiaali-kerroksissa.

Matalaenergiarakentaminen voi teoriassa hieman lisätä esiintyvien kondenssiolojen määrää, mutta käytännössä kuitenkin säteilyolot ovat ilmiön kannalta hallitsevia.

Esimerkiksi yläpohjassa katteen alapuolisia rakenteita ei voida suojata tällaiselta alijäähtymisen vaikutuksilta pelkästään lämpöhäviöiden avulla edes nykyääräykset täyttävien rakenteiden tapauksissa. Vastasäteilyn vaikutuksia voidaan torjua muilla keinoin kuin lämpöhäviöitä ylläpitämällä tai kasvattamalla. Tällaisia ovat mm. riittävä lämpö- ja kosteuskapasiteetti estämään katto-pinnan jäähtymisen vaikutukset alapuolisissa puu- yms. rakenteissa. Tyypillisesti oireina on homeen kasvusto (tyypillisesti pilkkuja) katteen alusrakenteissa. Lahoamaan rakenteet eivät pääse, jollei kosteus tiivisty ja keräänny paikallisesti rakenteisiin ja tuuletus on riittämätön. Tilanne vastaa kohtuullisesti tuuletetun seinärakenteen ulkooverhouksen sisäpintaa. Haitta on lähinnä esteettinen.

Homeen kasvu kuuluu osana ulkotilassa olevien kyllästämättömien puurakenteiden käyttäytymiseen. Katon alusrakenteiden homeesta ei ole sisäilman kannalta enempää ongelmia kuin muistakaan ulkona homehtuvista materiaaleista. Korvausilmaa ei tietenkään pidä ottaa tällaisista tiloista ja rakenteiden ilmatii- viys on pidettävä riittävänä.

Hyvin lämpöä eristävien ikkunoiden ulkopinnassa voi satunnaisesti esiintyä tiivistynyttä vettä tai jäätä, jos ikkunasta on esteetön näkymä taivaalle. Ikkunasyvennys ja erilaiset rakenteelliset esteet (räystäät yms.) rajoittavat tehokkaasti ilmiön esiintymistä. Ulkopinnan kastumisesta voidaan verrata sateen aiheuttaman kastumisen haittaan, huurteen muodostuminen on hieman pitkäkestoisempi ilmiö, mikä edellyttää jäätyneen kerroksen sulamista ennen sen haihtumista. Ilmiön esiintyminen osoittaa rakenneosan olevan hyvin lämpöä eristävä, eikä siitä ole haittaa rakenteille, koska ikkunoiden tulee olla asianmukaisesti suojattuja mm. sadetta vastaan. Ulkopinnan kondenssiin voidaan U-arvon tason lisäksi vaikuttaa suunnittelussa mm. varjostuksin ja pinnoittein.

Jos halutaan käyttää U-arvoltaan alle  $1,0 \text{ W/Km}^2$  ikkunoita, olisi niiden ajoittainen (tyypillisesti joitakin kertoja vuodessa tapahtuva) mahdollinen kondenssi ja huurtuminen syytä olla tiedossa ja ottaa huomioon ikkunoiden sijoittelussa mm. läpinäkyvyyden osalta. Jos tällaisilta ikkunoilta vaaditaan jatkuvaa huurtumattomuutta, olisi niille tehtävä erillinen suunnitelma kondenssin estämiseksi.

### **Esimerkki tuulettujen rakenteiden toimivuudesta - Rankarakenteinen ulkoseinä**

Tässä esimerkissä tarkasteltiin laskennallisesti, miten matalaenergiarakenteen ja nykymääräykset täyttävän rakenteen ulkopinnan olosuhteet poikkeavat toisistaan kosteusteknisen toimivuuden kannalta. Esimerkki kuvaa hyvin kaikkien tuulettujen rakenteiden ulkopinnan olosuhteiden muutosta kun U-arvot ovat nykyistä paremmat.

Tarkastelussa oli tuuletusraallinen puurunkoinen rakenne, jossa oli kipsilevytuulensuoja (9 mm) ja kipsinen sisäverhouslevy (13 mm). Sisäverhouksen ja lämmöneristeen välissä oli PE-höyrynsulku, jonka vesihöyrynvastus asennettuna oletettiin suhteellisen alhaiseksi, diffuusiovastus kerrokselle asetettiin tasolle  $5 \cdot 10^{10} \text{ m}^2 \text{ s Pa/kg}$  ( $S_d = 10 \text{ m}$  vastaten paikallaan olevan ilmakerroksen vastusta).

Lämmöneristeenä käytettiin mineraalivillaa, jonka lämmönjohtavuus oli  $0,040 \text{ W/Km}$ . Lämmöneristyskerroksen paksuus oli nykymääräykset täyttävässä perustapauksessa 175 mm ja matalaenergiatason tapauksessa 345 mm. Runkoratkaisuista riippuen perustapauksen U-arvo on luokkaa  $0,24 \text{ W/Km}^2$  ja matalaenergiarakenteen tasolla  $0,12 - 0,13 \text{ W/Km}^2$ . Parannus U-arvossa olisi siis huomattavasti ehdotettua noin 30 % parannusta suurempi, mikä tuo tarkasteluun lisävarmuutta.

#### Kuivumispotentiaali ulkopinnasta

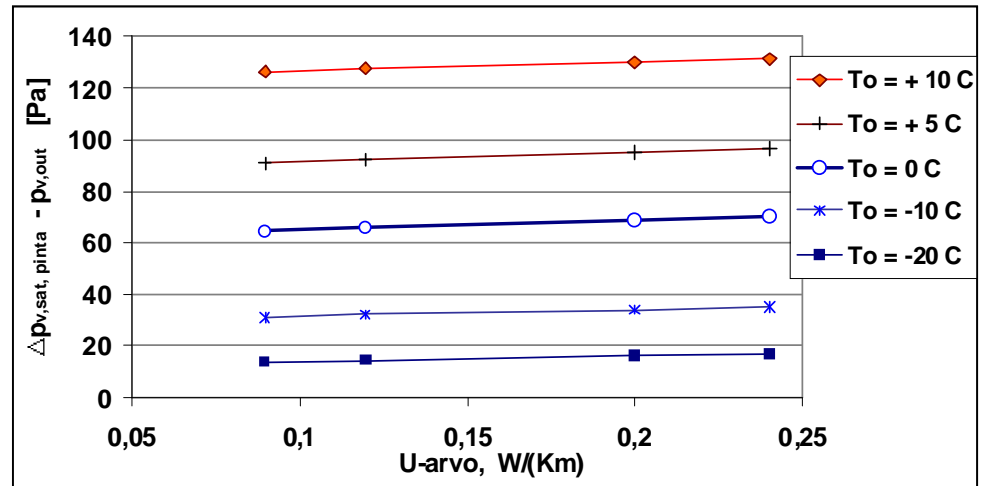
Rakenteen kuivuminen perustuu pääosin vesihöyryn osapaine-eron aiheuttamaan kosteudensiirtoon rakenteessa ja siitä ulos. Muutokset tässä potentiaalisissa vaikuttavat siis kosteusvirran tiheyksiin, kosteuskenttiin ja kuivumiskykyyn.

Vuoden keskilämpötila ulkoilmassa oli  $+2,76 \text{ }^\circ\text{C}$ . Puurungon keskikohdalla, jossa lämmöneristyskyky on paras, on laskennallinen ulkopinnan lämpötila em. oloissa 175 mm eristepaksuudella  $+2,90 \text{ }^\circ\text{C}$  ja 345 mm vastaavasti  $+2,84 \text{ }^\circ\text{C}$ . Jo nykymääräysten mukaisessa rakennetapauksessa ulkopinnan lämpötila on hyvin lähellä ulkoilman oloja, eikä matalaenergiatason rakenteessa ole tähän nähden suurta eroa.

Koska suhteellinen muutos lämpötilaerossa ulkoilmaan on kuitenkin kohtalainen, selvitettiin sen vaikutus vesihöyryn osapaine-eroon rakenteen pinnasta ulkoilmaan (Kuva 1). Rakenteen pinta oletettiin kyllästystilaan (kuivumistilanne) ja ulkoilma 90 % RH suhteelliseen kosteuteen.

Tuloksen mukaan U-arvon parantaminen tasolta  $0,24 \text{ W/Km}^2$  tasolle  $0,09 \text{ W/Km}^2$  vaikuttaa hyvin vähän pinnan ja ympäristön väliseen vesihöyryn osa-

paine-eroon, joka kuvaa rakenteen ulkopinnan kuivumispotentiaalia. Siten olosuhteiden mahdollistama kuivuminen matalaenergiarakenteen ulkopinnasta on jokseenkin samanlaista kuin nykytason rakenteillakin.



Kuva 1. Rakenteen ulkopinnan kuivumispotentiaali rakenteen U-arvon funktiona ulkolämpötilan ollessa parametrina, kun ulkopinta on kyllästetyssä ja ulkoilma oletettiin 90 % RH kosteuteen.

### Ulkopinnan olosuhteiden homeutumisherkyys

Kuvattuja rakenteita tarkasteltiin laskennallisesti /8/ käyttäen tunneittain muuttuvia olosuhteita sisä- ja ulkopuolen ilmatiloissa. Ulkoilman olosuhteina käytettiin Jyväskylän mitoitussuunnan sääoloja.

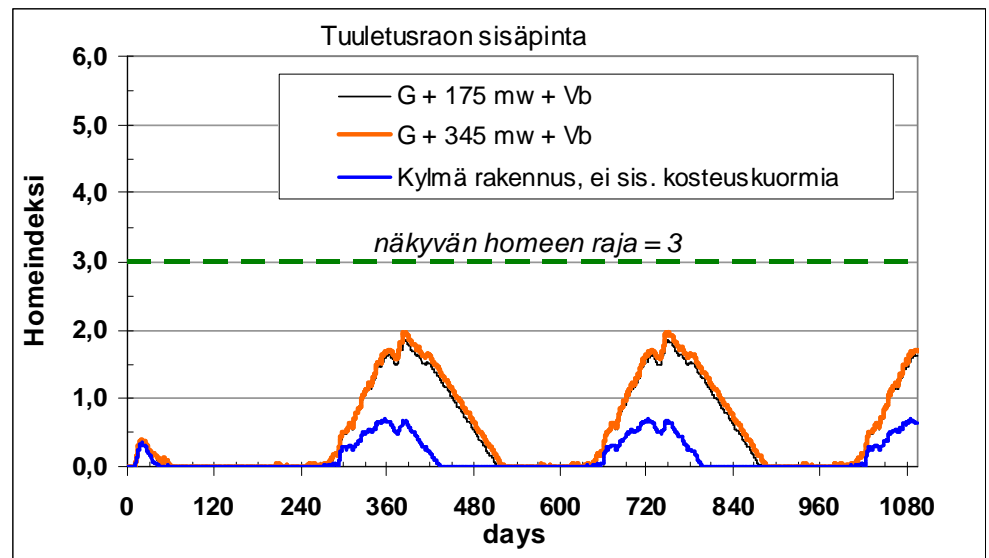
Seinä oli varjossa, tuuletusraossa oli ulkoilman olosuhteet, eikä sinne päässyt sadetta. Sisäilman lämpötila oli vakio  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$  ja kosteuslisäys ulkoilmaan verrattuna oli  $+4 \text{ g/m}^3$  lämmityskaudella.

Laskennan tuloksena saatiin tarkastellun kolmen vuoden jaksolle pinnan lämpötilan ja kosteuden arvot tunnin välein, joiden perusteella voitiin laskennallisesti arvioida pinnan homeutumisherkyys. Homeen kasvua kuvataan homeindeksillä (vaihteluväli 0 – 6) /9 - 12/, joka saa arvon 3 kun ensimmäinen homeen kasvun alku voidaan havaita pinnalla ilman apuvälineitä. Taso 1 vastaa tilannetta, jossa ensimmäiset homekasvun indikaatiot (itiöiden itäminen ja rihmaston kasvun alku) voidaan havaita mikroskoopin avulla pinnalla.

Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden arvioiminen yllä mainitun homeindeksin avulla on tämänhetkisen state-of-art tiedon ja kokemuksen perusteella paras ja kattavin laskennallisen tarkastelun menetelmä: Rakenteiden dynaamisesti vaihteleva kosteuspuiteisuus ei yleensä anna riittävää tietoa todellisesta pitkäaikaistoimivuudesta, lukuunottamatta selkeitä kosteuden jatkuvan kerääntymisen tapauksia. Homeindeksi, jonka määrittämisessä yhdistyvät tärkeimmät rakenteiden toimivuuden muuttujat – lämpötila, suhteellinen kosteus, aika ja materiaali – antaa näiden muuttujien yhteisvaikutuksen oletetuissa käyttöolosuhteissa. Tulos tulkitaan parhaiten homeen kasvun potentiaalia kuvaavana suureena.

Kuva 2 esittää normaalirakenteen ja matalaenergiarakenteen ulkopinnan homeindeksin laskennallisen kehityksen tarkastelujakson aikana olettaen pinnan vastaavan homehtumisherkkyydeltään puuta. Lisätapauksena tarkastelussa oli kylmä rakennus ilman lämpöhäviöitä tai kosteuskuormia sisäilmasta.

Tuloksen perusteella matalaenergiarakenne ja normirakenne edustavat täysin samanlaista homehtumisriskiä. Niiden ulkopinnan laskennallinen homeindeksi jäi korkeimmillaan tasolle 2, mikä edustaa ulkopuolen rakenneosissa turvallista tasoa. Koska kylmän rakennuksen ulkoseinä kuormittui vain ulkoilman kosteudesta ja koska rakenne oli selvästi kylmempi kuin matalaenergiarakennuksen, sen homeindeksi jäi muita tapauksia alemmalle tasolle.



Kuva 2. Laskennallinen homeindeksi määräysten mukaiselle ja matalaenergiatason rakenteelle olettaen tarkastelukohta puuksi, joka on homehtumisen kannalta herkimpiä materiaaleja. Lisänä tarkastelussa on kylmä rakennustapaus, jossa rakenteen sisäpuolelta ei tule lämpöä tai kosteutta ulkopintaan.

Laskennan avulla tarkasteltiin vielä tapausta, jossa matalaenergiarakenteen lämmöneristyksestä oli 50 mm tuulensuojavillana uloimman kipsilevyn ulkopuolella ja loput 245 mm sen sisäpuolella. Tässä tapauksessa rakenteen ulkopinnan homeindeksi jäi jokseenkin nolnaan. Matalaenergiarakenteen kosteustekninen toimintavarmuus siis parani verrattuna nykymääräysten mukaisesti eristettyyn tavanomaiseen rakenteeseen verrattuna. Esitetty tulos on yhtenevä aiemmin tehdyissä tutkimuksissa julkaistujen tulosten kanssa /13/.

#### Yhteenveto tuuletetun rankarakenteen kosteusteknisestä toimivuudesta

Tuuletetun ja sateelta suojatun rankarakenteen ulkopinnan olosuhteet eivät olennaisesti muutu parannettaessa lämmöneristystä matalaenergiatasolle. Siten sekä rakenteen ulkopinnan kuivumiskyky että ulkopinnan olosuhteiden aiheuttama riski biologisen kasvun alkamiseen on lähes samanlainen tarkastelluissa tapauksissa.

Tuuletetusta matalaenergiarakenteesta voidaan pienin muutoksin tehdä kosteusteknisesti turvallisempi kuin tyypillisestä (tuulensuojalevy + eristevilla + sisäverhous), nykymääräysten mukaan eristetystä rakenteesta.

Tarkastelun tulokset pätevät hyvin kaikille riittävän hyvin tuuletetuille rakenteille ja niiden tuuletusvälin ulkopinnan olosuhteille. Lämmöneristysmääräyksiä voidaan huolelta parantaa 30 % -40 %:a nykyistä paremmalle tasolle ilman, että pinnan olosuhteiden muutos toisi merkittäviä riskejä rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen. Tässäkin rakenteessa ylimääräisten kosteuskuormien esiintyminen on estettävä huolellisella suunnittelulla ja toteutuksella.

Ilmaston muuttuessa on ilmeistä, että nykynormien mukainen ja matalaenergiatason rakenne käyttäytyvät molemmat ainakin tuuletuksien ulkopinnan olosuhteiden osalta samalla tavoin, joten tulevat riskit ovat molemmille ilmeisen samantyyppiset ja riippumattomia rakenteiden eristystasosta.

## Tarkastelu rakenteittain

Tuuletetut rakenteet toimivat jokseenkin edellä esitetyn rankarakenteen tavoin. Seuraavassa on käyty läpi eri rakenteita ja niiden merkittävimpiä kosteusriskejä matalaenergiarakentamisen kannalta.

### Tuuletettu yläpohja

Tuuletetun yläpohjan lämpöhäviöillä ei ole nykymääräysten mukaisessa rakentamisessakaan mitään olennaista merkitystä tuuletuksien tai siihen rajoittuvien ulkoilman puoleisten, kylmien rakenneosien lämpötilaan. Tulos on selkeä jo rankarakenteen ulkopinnan lämpötilatarkastelun perusteella. Tuuletus, mahdollinen auringon säteily ja säteilylämmönsiirto ympäristön kanssa ovat lämpötilaa hallitsevia tekijöitä. Jos yläpohjan lämpötilatasoon haluttaisiin vaikuttaa rakenteiden johtumishäviöiden avulla, tulisi eristetäsoa pienentää olennaisesti nykyisestä.

Yläpohjan tai muidenkaan rakenteiden kosteustekninen toimivuus ei voi perustua turhilla lämpöhäviöillä ylläpidettyyn lämpötilatasoon. Riittävällä tuuletuksella voidaan yläpohjan olosuhteet pitää ulkoilman sateelta suojattuja olosuhteita vastaavassa tilassa, joka ei pitkäaikaisenaan aiheuta rakenteellista vaurioitumista (lahoa). Homeen kasvua tällaisen yläpohjan tuuletuksessa tapahtuu lähes aina, jollei sitä estetä homeen kasvuun vaikuttavien kemiallisten käsittelyin tai tilan turhalla lämmityksellä. Kosteus ja lämpimät syksyt ja talvet toisaalta lisäävät ulkoilmaan rajoittuvien rakenteiden homeutumisalttiutta.

Yläpohjien todelliset kosteusongelmat aiheutuvat tyypillisesti katteen, sen läpivientien ja detaljien vuodoista, tuulen aiheuttamasta veden tai lumen kulkeutumisesta tuuletusväliin, toimimattomasta tuuletuksista tai kostean sisäilman vuotovirtauksista yläpohjaan. Yläpohjan lämmöneristystasolla ei näitä virheitä voida estää eikä niiden seurauksia voida poistaa. Tässäkin tapauksessa rakenteen ja rakennuksen kokonaisuuden suunnittelu, toteutus ja toimivuuden varmistus ovat merkittäviä tekijöitä pyrittäessä kohti kosteusteknisesti turvalli-

sia rakenteita. Hyvä ilmatiiviys ja sisäilman pääsääntöinen alipaineisuus ovat toimivien yläpohjarakenteiden edellytyksiä.

Tuuletuksen mukana tulee aina kosteaa ulkoilmaa, joka voi hetkellisesti tiivistyä tai kerääntyä kylmiin rakenneseisiin. Riittävä tuuletus kuitenkin poistaa tämän kosteuden kuivumisjaksojen aikana.

Eräs mahdollinen ratkaisu tuuletuksen mukana kuljettuvan ulkoilman kosteuden kerääntymistä vastaan on ns. suljettu aluskatejärjestelmä /14, 15/, jossa hyvin vesihöyryä läpäisevä aluskate päästää kosteuden kuivumaan yläpuoliseen tuuletusrakoon. Aluskate suojaa rakennetta yläpuoliselta kosteudelta (tiivistyminen ja vuoto) ja lämmöneristettä tuulen painevaikutuksilta ja voi lisäksi rajoittaa rakenteen läpi tapahtuvia ilmavuotoja. Lisäksi ratkaisu alentaa homeutumista aiheuttavien olosuhteiden esiintymistä yläpohjan rakenteissa. Toinen esitetty ratkaisu tuuletuksen tuomiin kosteushaittoihin on tarpeen mukaan säätävä yläpohjan tuuletus /16/.

Katon harjan suuntaiset tuuletusvälit ovat joskus ahtaat ja niiden tuulettumisen toimivuus on syytä erikseen varmistaa suunnitelmissa.

Tuulettuvan yläpohjan lämmöneristäminen matalaenergiatasolle ei lisää rakenteen kosteusriskejä.

#### Ryömintätilainen alapohja

Kun alapohjan rakenteet on höyrynsululla asianmukaisesti suojattu, on alapohjan ryömintätilan kosteus pääsääntöisin peräisin maaperästä ja tuuletuksen mukana tulevasta ulkoilman kosteudesta. Keväällä ja alkukesästä ulkoilman lämmitessä siihen sitoutuu entistä enemmän kosteutta, mutta alapohjan rakenteet lämpenevät huomattavasti hitaammin, mikä johtuu pääasiassa siihen rajoittuvan maan termisestä massasta. Siksi tuuletuksen mukana tuleva kosteus voi ajoittain kerääntyä rakenteisiin. Tämä tulee voida poistaa riittävän nopeasti ja ennen kuin kosteutta on kertynyt liiaksi.

Lisänä kosteuskuormassa on maaperästä haihtuva kosteus, mikä voi virheellisissä tapauksissa olla runsasta, esimerkiksi jos alapohjan alla on ajoittain vapaa vesipinta. Riittävä tuuletus ja mahdollinen käyttäjän säätämä tuuletusaukkojen aukio lo riittävät poistamaan normaalin tuuletuksen mukana ja maaperästä tulevan kosteuden ennen sen aiheuttamia rakenteellisia haittoja. Homeen kasvua tässä rakenteessa ei voi estää, mutta se ei ole rakennetta vaurioittava. Alapohjan on oltava riittävän ilmatiivis, jotta epäpuhtaudet eivät pääse sisäilmaan vuotoilman mukana.

Kuten selostuksessa /17/ todetaan, on kesä ryömintätilaisen alapohjan ongelmallisinta aikaa. Jos alapohjan U-arvoa parannetaan tasolta 0,20 W/Km<sup>2</sup> tasolle 0,17 W/Km<sup>2</sup>, muuttuu lämpövirran tiheys sisäilmasta (+23 °C) ryömintätilaan (+13 °C) arvosta 2,0 W/m<sup>2</sup> tasolle 1,7 W/m<sup>2</sup> ja kylmän pinnan lämpötila muuttuu vastaavasti arvosta +13,07 °C arvoon +13,08 °C. Laskennallinen muutos jatkuvuustilassa on noin 0,01 °C, millä ei ole ratkaisevaa merkitystä esimerkiksi pinnan homeenkasvun olosuhteiden kannalta.

Samoin kuin tuuletetun yläpohjan tapauksessa kosteustekninen toimivuus perustuu tässäkin rakenteessa tuuletuksen riittävyteen ja tasaiseen jakautumiseen koko ryömintätilan alueelle. Lämmöneristystaso alapohjassa on nykyään räystenkin perusteella niin hyvä, ettei lämpöhäviöillä ole olennaista vaikutusta tilan ja siihen rajoittuvien rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimivuuteen. Olennaista on tässäkin välttää ylimääräisiä kosteuskuormia hyvällä suunnittelulla ja toteutuksella.

Ryömintätilaisen alapohjan kosteustekninen toimivuus on herkkä ylimääräisille kosteuskuormille, jotka voivat aiheuttaa siinä ongelmia. Nykyistä parempi lämmöneristys ei lisää ongelmia, mutta ongelmien esiintyminen matalaenergiarakenteissa on yhtä todennäköistä kuin nykyisissäkin rakenteissa.

Kenttähavainnoissa lahon esiintyminen ryömintätilaisissa alapohjarakenteissa liittyy aina rakennusvirheisiin tai käytön aikaisen toimivuuden varmistamisen laiminlyönteihin, jolloin rakenteeseen on päässyt vapaata vettä. Vesi on aiheuttanut pitkäaikaiset kondenssiolosuhteet tai päässyt kapillaarisesti imeytymään rakenteisiin. Pitkäaikainen altistus vedelle on voinut johtaa lahon kehittymiseen.

Tyypillisesti liiallisen kosteuden seuraukset rajoittuvat homeen kasvuun, jolloin rakenteellista heikkenemistä ei tapahdu. Homeen kasvun rajoittamiseksi ryömintätilan materiaalivalinnoissa tulee välttää helposti homehtuvia materiaaleja. Samoin toteutusvaiheessa tulee huolehtia kaiken orgaanisen rakennusjätteen poistamisesta ryömintätilasta.

Alapohjan tasoitettuna maakerroksen päällä on syytä käyttää suojamuovia, joka estää kosteuden liiallisen nousun maaperästä ryömintätilaan. Muovin tulee ulottua rakennuksen perustukseen saakka, jolloin mahdollinen vesi voi kulkeutua salaojituksen kautta pois alapohjan alueelta. Muovin päälle tulee hiekkakerros, sitten mahdollinen lämmöneriste (EPS, XPS) ja sen päälle suojahiekka. Lisää toimintavarmuutta saadaan, kun alapohjan alapinta eristetään, esimerkiksi kalvomaisiin, vesihöyryä läpäiseviin lämpösäteilykatkoin /18/. Tämä voi tuoda tarvittavan pienen lämpötilatason korotuksen rakenteen kriittisiin kohtiin.

Maaperän riittävä kosteussuojaus ja lämmöneristäminen erityisesti rakennuksen reuna-alueilta voivat olla riittäviä keinoja estämään kylmän maaperän aiheuttaman alapohjan liiallisen jäähtymisen ja liian pitkät kosteuden kertymisjaksot.

Tuuletusputki ryömintätilasta katolle varmistaa tuuletuksen toimivuuden ja epäpuhtauksien tuulettumisen ulos. Tätä voidaan tarvittaessa tehostaa puhaltimella, joka pitää alapohjassa pienen alipaineen.

Ryömintätilaisen alapohjarakenteen toimivuus on syytä varmistaa huolellisella suunnittelulla ja toteutuksella, vaikka lämmöneristystason parantaminen ei aiheuta rakenteeseen olennaista riskiä.

### Maanvastainen alapohja

Lämmöneristyksen parantaminen matalaenergiatasolle ei aiheuta ongelmia, mutta suunnittelu ja toteutus on tehtävä huolellisesti maaperän vedenpinnan korkeuden hallitsemiseksi (salaojitus) ja sen kapillaarisen kosteuden nousun estämiseksi.

### Rakennusten routasuojaus

Routasuojaus onnistuu matalaenergiarakennuksissa, mutta sen toimivuus on syytä suunnitella hankalissa kohteissa erikseen. Ongelmatapauksena on tyypillisesti matalaperusteinen, routivalle maalle tehty rakennus.

### Eristeharkko-, tiili- ja kuorimuuriseinät

Alan yritykset ovat aktiivisesti kehittäneet tuotteitaan energiatehokkaaseen suuntaan. Kehitystyön tuloksena monilla valmistajilla on U-arvoltaan 0,17 W/Km<sup>2</sup> tasoisia seinärakenteita. Energiatehokkuuden parantaminen ehdotettuun tasoon ei tuo uusia kosteusteknisiä ongelmia näiden rakenteiden tapauksessa. Uusia rakenneratkaisuja voidaan kehittää entistä paremmiksi lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden osalta.

### Teräsohutlevy- ja betonisandwich- rakenteet

Energiatehokkuuden parantaminen ehdotettuun tasoon ei lisää näiden rakenteiden kosteusteknistä riskiä.

### Käännetyt kattorakenteet

Käännettyjen kattorakenteiden kosteustekninen toimivuus ei riipu käytettävän lämmönerityskerroksen paksuudesta.

## **Katsaus rakenteisiin ja rakenneosiin joiden kosteusteknisen toimivuuden varmistamien edellyttää tavanomaista tarkempaa selvitystä ja suunnittelua**

### Sisäpuolinen eristäminen

Joissain tapauksissa massiiviset rakenteet, esimerkiksi hirsiseinät halutaan eristää sisäpuolelta. Sisäpuolinen eristäminen vaatii aina tarkempaa suunnittelua kuin ulkopuolinen eristäminen, joka yleensä parantaa rakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa.

Suurin riski liittyy vanhojen rakenteiden sisäpuoliseen lisäeristämiseen korjausten yhteydessä. Tällöin sisäpuolisen eristerakenteen ilmatiiviys saattaa olla puutteellinen lattia- ja kattoliitosten tai väliseinien kohdalla, mikä voi johtaa haitalliseen sisäilman kosteuskonvektioon uuden eristerakenteen ja vanhan rakenteen rajapinnan kautta /19/. Tämä on helpoimmin vältettävissä uudisrakentamisessa, jossa materiaalikerrosten liitosdetaljit on mahdollista toteuttaa tarkasti ja ilmatiiviisti.



Sisäpuolisen eristämisen heikkoutena on myös se, ettei rakenteellisia kylmäsiltoja pystytä poistamaan. Niiden merkitys tulee huomioida ratkaisun sekä lämpö-, että kosteusteknistä toimivuutta arvioitaessa.

### Hirsiseinät

Sisäpuolelta eristettyjen hirsiseinien osalta on otettava huomioon rakenteiden mahdollinen höyrinsuluttomuus. Monesti hirsirakenteet halutaan tehdä ilman höyrinsulkua, jolloin sisäpuolinen vesihöyryn siirtymistä rajoittava vastus jää sisäverhouksen ja ilmansulun varaan. Tämä on mahdollista tehdä kosteusteknisesti turvallisesti, mutta sisäpuolisen lämmöneristeen paksuus on tällöin rajallinen.

Yleisesti esitetty ohjeellinen 50 mm maksimipaksuus sisäpuoliselle eristekerrokselle sisältää runsaasti varmuutta. Turvallisen toimivuuden rajapaksuus voi olla paksumpikin riippuen mm. eristeen sisäpuolisista rakennekerroksista, ilmastosta, seinän suuntauksesta ja hirsikerroksen paksuudesta. Matalaenergiatasoon pääsy edellyttää usein seinän rajoitettua tuuletusta /20, 21/.

### Höyrinsuluttomat rakenteet

Useissa tapauksissa rakenteessa ei tarvita (muovista) höyrinsulkua, mutta kuitenkin riittävä vesihöyryn siirtymistä rajoittava kerros. Lisäksi rakenteiden tulee olla riittävän ilmatiiviitä ja suojattuja erityisesti sisäilman vuotovirtauksia vastaan. Nyrkkisääntönä on esitetty 5:1 suhde sisä- ja ulkopuolisten vesihöyrinvastusten turvallisesta vaatimustasosta, mutta tämän tarkoituksena on kiinnittää huomio vastusten keskinäiseen suhteeseen, mikä on toimivuuden kannalta merkittävä /20/. Toimivuus riippuu mm. vesihöyryn vastusten sijainnista, niiden kosteusriippuvuudesta, kerrosten lämmön- ja kosteudensiirt ominaisuuksista ja lisäksi rakenteiden kosteuskapasiteetista.

Esimerkiksi hirsiseinien tapauksessa, jossa lämmöneristeen ulkopuolinen hirsikerros on hyvin lämpöä eristävä ja jonka hygroskooppinen kosteuden varastoimiskyky on suuri, on suhdeluku lähellä arvoa 1. Nämä tapaukset edellyttävät tyypillisesti toimivuuden erillistä analysointia tapauksittain.

### Eristerappattu seinä

Kantavan rakenteen ulkopuolinen yhtenäinen eristerappaus katkaisee rakenteen kylmäsiltoja tehokkaasti ja terminen massa jää sisäpuolelle tasoittamaan sisäpuolisen kuormituksen lämpötilavaihteluita. Korjausrakentamisessa se on kätevä tapa parantaa vanhojen rakennusten energiatehokkuutta.

Eristerappaus on sinällään helppo todeta kosteusteknisesti hyvin toimivaksi, sen ulkopinta pitää sateen ulkona rakenteesta ja rappaus antaa riittävän vesihöyryn läpäisykyvyn sisäpuolisen kosteuskuormituksen poistumiseksi rakenteesta. Eristerappauksen kokonaistoimivuuteen liittyy kuitenkin mahdollisia riskitekijöitä, jotka on syytä ottaa huomioon.

Matalaenergiarakentaminen heikentää kuivumispotentiaalia rappauskerroksen ylitse hieman, mikä voi tässä tapauksessa olla merkittävämpi tekijä kuin hyvin vesihöyryä läpäisevien tuulensuojamateriaalien yhteydessä, joita käytetään tuulettuvissa rakenteissa. Suurin riski piilee kuitenkin rappauksen ja muiden rakenneosien liitosdetaljeissa, joiden suojaus viistosateelta on suunniteltava ja toteutettava erityisellä huolella. Tuulen aiheuttama paine-ero uloimman rakennekerroksen yli voi siirtää vettä rakenteeseen esimerkiksi heikosti toteutettujen ikkunapellitysten saumoista. Koska vesi pääsee poistumaan rakenteesta vain vesihöyryn diffuusiona rappauksen läpi, voi pienenkin vesimäärän kuivuminen kestää pitkään ja toistuva vesivuoto voi johtaa rakenteen vaurioitumiseen. Tällaisia tapauksia on havaittu esimerkiksi puurunkoisten seinien eristerappauksissa /22, 23/.

Kantavan rakenteen materiaalivalinnat korostuvat eristerappauksen tapauksissa, kantavana rakenteena kivipohjaiset tai teräsrunkoiset ovat tässä tapauksessa paremmin kosteutta kestäviä kuin puurunko. Lisäksi rappauksen vanhentumisen ja lämpö/kosteusliikkeiden aiheuttamat mahdolliset muodonmuutokset voivat heikentää rappauksen vedenpitävyyttä paikallisesti. Tästä ei kuitenkaan ole riittävästi tutkimustietoa. Rappauksissa on myös huomattavia eroja. Esimerkiksi niiden paksuudet voivat vaihdella ohutrappauksen 4 – 7 mm:stä kolmikerrosrappauksen muutamien senttimetrin paksuuteen, mikä voi vaikuttaa rappausten kosteusteknisiin pitkäaikaisominaisuuksiin.

Rapattujen, tuulettamattomien eristerakenteiden kosteusriski ei liity suoraan matalaenergiarakentamiseen, mutta on syytä ottaa huomioon rakenteiden suunnittelussa ja toteutuksessa.

## Yhteenveto

Tämän selvityksen tärkein yhteenveto on, että rakenteiden kosteustekninen toimivuus ei aseta rajoituksia lämmöneristystason parantamiselle 30 – 40 %:lla nykyisiin rakentamismääräyksiin (C3/2007) verrattuna. Eräiden yksittäisten rakennetyyppien valinta ja mitoitus matalaenergiakohteeseen vaativat erityistä asiantuntemusta ja harkintaa.

Liitteen 1 taulukossa esitetään tyypillisten rakenteiden mahdolliset kosteusteknisen toimivuuden riskit siirryttäessä matalaenergiatasolle. Huolellisesti suunniteltuna ja rakennettuna tarkasteltuja rakenteita voidaan käyttää matalaenergiarakentamisessa, kun riskeihin on varauduttu toimivin rakennerratkaisuin. Riskien osalta käytetään tausta ja tavoitteet -kappaleessa esitettyä luokitusta a) – d) rakenteiden toimivuudesta sellaisenaan, niiden edellyttämistä huomioon otettavista tekijöistä ja tarvittavista lisäselvityksistä tai mahdollisesti tarvittavista kehityshankkeista. Taulukossa mainitaan rakenteen tyypilliset, lämmöneristyksen tasosta riippumattomat kosteusteknisen toimivuuden riskitekijät, joihin rakenteiden suunnittelussa ja toteutuksessa tulee kiinnittää erityisesti huomiota.

---

Espoo, 10.12.2008

Juhani Hyvärinen  
Palvelupäällikkö

Tuomo Ojanen  
Erikoistutkija

LIITE 1

Taulukko eri rakenneosien kosteusteknisen toimivuuden luokituksista ja niiden tyypilliset riskit siirryttäessä matalaenergiatasolle

JAKELU

Tilaaaja  
VTT / Kirjaamo

Alkuperäinen  
Alkuperäinen

## Lähdeviitteet

1. Glaser, H. 1959. Graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgänge. *Kalftetechnik* 10: 345-349.
2. Kumaran, M.K. IEA Annex 24 Final Report. Task 3: Material Properties. 1996 Leuven. 135 p
3. Ojanen, T. and Kumaran, K., 1996, Effect of exfiltration on the hygrothermal behaviour of a residential wall assembly, *J. Thermal Insul. and Bldg. Envs.*, 19(1), 215-227.
4. Ojanen, T., 1993, Criteria for the hygrothermal performance of wind barrier structures, *Proceedings of the 3rd Symposium of Building Physics in the Nordic Countries*, (edited by B. Saxhof), Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, 643-652.
5. Ojanen, Tuomo; Kohonen, Reijo. Convection and moisture driven heat transfer. *Int. CIB W67 Symposium on Energy, Moisture and Climate in Building*. Netherlands, Rotterdam, 3 - 6 Sept. 1990. CIB, Int. Council for Building Research Studies & Documentation. Technical Session I. Netherlands (1990), 6 p.
6. Ojanen, Tuomo; Kohonen, Reijo. Ilmavirtausten vaikutus rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. 1989. Tutkimuksia, Valtion teknillinen tutkimuskeskus : 590. VTT, Espoo. 106 s.
7. Kokko, Erkki; Ojanen, Tuomo; Salonvaara, Mikael. Uudet vaipparakenteet: energiansäästö ja kosteustekniikka. VTT Tiedotteita n:o 1869. 1997. Espoo. 90 s.
8. WUFI (Wärme und Feuchte instationär - Transient Heat and Moisture) 4.2 Pro software, The Fraunhofer Institute for Building Physics IBP. <http://www.hoki.ibp.fraunhofer.de/wufi/>
9. Viitanen, H., 1996, Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden structures. Effect of humidity, temperature and exposure time, The Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.
10. Ojanen, Tuomo; Salonvaara, Mikael. Numerical simulation of mould growth in timber frame walls. *Healthy Buildings 2000*. Espoo, FI, 6 - 10 Aug. 2000. Seppänen, O. & Säteri, J. (Eds). Vol. 3: Microbes, Moisture and Building Physics. Finnish Society of Indoor Air Quality and Climate (FiSIAQ). Espoo (2000), pp. 335 - 340
11. Viitanen, Hannu; Ritschkoff, Anne-Christine; Ojanen, Tuomo; Salonvaara, Mikael. Moisture conditions and biodeterioration risk of building materials and structure. *Proceedings of the 2nd International Symposium ILCDES 2003 Integrated Life-time Engineering of Buildings and Civil Infrastructures*, Kuopio, 1-3 Dec. 2003. RIL, VTT, CIB, RILEM, IABSE, ECCE, ASCE. Espoo 2003, pp. 151 - 156
12. Peuhkuri, Ruut; Viitanen, Hannu; Ojanen, Tuomo. Modelling of mould growth in building envelopes. *Proceedings of the IEA ECBCS Annex 41 Closing seminar*, Copenhagen, June 19, 2008.
13. Ojanen, T. Improving the drying efficiency of timber frame walls in cold climates using exterior insulation. *Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VII conference*, Clearwater Beach, USA, 1998. pp. 155 - 164.
14. Ojanen, Tuomo. Thermal and moisture performance assessment of sealed cold roof system with vapour permeable underlay. *International Building Physics Conference IBPC2000*. Eindhoven, NL, 18 - 21 Sept. 2000. Eindhoven University of Technology. Eindhoven (2000), 233 - 240
15. Ojanen, Tuomo. Thermal and moisture performance of sealed cold roof system with vapour permeable underlay. *Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII Integration of Building Envelopes*. Clearwater Beach, US, 2 - 7 Dec. 2001. (proceedings in CD). ASHRAE (2001), 13 p.
16. <http://www.ventotech.com/>
17. Matalaenergiarakenteiden toimivuus, Tampereen teknillinen yliopisto. Tutkimusselostus Nro TRT/1706/2008. 88 s.
18. Kokko, Erkki; Kosonen, Risto; Hyttinen, Hannu; Hakulinen, Petri; Pyykkö, Antti. Sellukuitueristetty matalaenergiapientalo. VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes :1968 VTT, Espoo 1999. 53 s.
19. Ojanen, Tuomo; Simonson, Carey. Convective moisture accumulation in structures with additional inside insulation. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VI*. Florida, USA, 4 - 8 Dec. 1995. ASHRAE; DOE; BETEC; ORNL. Atlanta (1995), 745 - 752

20. Simonson, Carey; Ojanen, Tuomo. Moisture performance of buildings with no plastic vapour retarder in cold climates. *Healthy Buildings 2000*. Espoo, FI, 6 - 10 Aug. 2000. Seppänen, O. & Säteri, J. (Eds). Vol. 3: Microbes, Moisture and Building Physics. Finnish Society of Indoor Air Quality and Climate (FiSIAQ). Espoo (2000), 477 – 782
21. Ojanen, Tuomo. Low energy log walls under cold climate conditions. *Proceedings. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X*. Clearwater Beach, USA, 2 - 7 Dec. 2007. CD. ASHRAE, DOE, ORNL. Atlanta, USA (2007), 9 p.
22. Samuelson, Ingemar; Mjörnell, Kristina; Jansson, Anders. Moisture damage in rendered, undrained, well insulated stud walls. *Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries*. Copenhagen, 16 - 18 June 2008.
23. Rousseau, Jacques & al. *Exterior Insulated Finish Systems (EIFS) Field Performance Evaluation, 1993*. CMHC Technical Series 98-118

### Muu lähdekirjallisuus

- Heimonen, Ismo. Viihtyisyyttä, energiatehokkuutta ja riskienhallintaa oikein mitoitettulla aurinkosuojauksella. *Lasi-rakentaja*. Vol. 11 (2001) No: 3, 18 – 22
- Hemmilä, Kari; Heimonen, Ismo. Suomalaisten ikkunoiden kestävyys. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2005/T2285.pdf>. VTT Tiedotteita - Research Notes : 2285. VTT 2005., Espoo. 59 s. + liitt. 14 s.
- Hukka, A. and Viitanen, H. 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Science and Technology* 33(6)475-485.
- Ojanen, T., Kohonen, R., Kumaran, M., K., Modeling Heat, Air and Moisture Transport through Building Materials and Components. *ASTM Manual Series MNL18, Moisture Control in Buildings*, editor H.R. Trechsel. Philadelphia 1994. pp. 18 - 34.
- Ojanen, Tuomo; Kokko, Erkki. Moisture performance analysis of EPS frost insulation. *Third Symposium on Insulation Materials: Testing and Applications*. Quebec City, CA, 15 - 17 May 1997. American Society for Testing and Materials ASTM. Philadelphia (1997), 442 – 455
- Ojanen, Tuomo. Future building envelopes in northern climates - trends and performance assessment. *Buildings of the Future - Buildings with Heavily Insulated, Adaptable External Structure - Workshop*. Clamart, FR, 28 Oct. 1999. Electricite de France. Clamart (1999), 12 p.
- Ojanen, Tuomo; Salonvaara, Mikael; Simonson, Carey. Integration of simplified drying tests and numerical simulation in moisture performance analysis of the building envelope. *Proceedings of the 6th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries*. Trondheim, 17- 19 June 2002. Bygghorsk; SINTEF; NTNU. Trondheim, 151 - 158
- Simonson, C.J., Olutimayin, S., Salonvaara, M., Ojanen, T. and O'Connor, J., 2004. Potential for hygroscopic building materials to improve indoor comfort and air quality in the Canadian climate, *Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings IX International Conference*, Clearwater Beach, Florida.
- Viitanen, H. 2007. Kosteus-, home ja mikrobit rakennuksissa – moniulotteinen ongelmavyhyti. *Rakennusfysiikka 2007, Seminaarijulkaisu 1*, Tampere, 18.–19.10. 2007.
- Viitanen H., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Toratti, T. and Makkonen, L. 2008. Service life of wooden materials – Mathematical modelling as a tool for evaluating the development of mould and decay. *Final conference proceedings. Bordeaux – France 29-30 September 2008. Sustainability through new technologies for enhanced wood durability. “Socio-economic perspectives of treated wood for the common European market”*. p. 85 – 96.
- Viitanen, Hannu; Ojanen, Tuomo. Improved model to predict mould growth in building materials. *Proceedings. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X*. Clearwater Beach, USA, 2 - 7 Dec. 2007. CD. ASHRAE, DOE, ORNL. Atlanta, USA (2007), 8 p.

**LIITE 1.**

Eri rakenteiden kosteustekninen toimivuus lämmönläpäisykertoimen ollessa matalaenergiatasoa. Toteutettavuus on arvioitu luokkina a –d. Luokka a vastaa sellaisenaan matalaenergiatasoisesti toteutettavissa olevaa tapausta, luokassa b toteutus on mahdollista ilman kosteusriskiä, kun toteutuksessa otetaan huomioon tarvittavat tekijät ja niiden edellyttämät muutokset, luokassa c toteutukseen sisältyy riskejä, joihin voidaan kehittää ratkaisuja erillisissä hankkeissa, ja luokassa d kosteusriski on niin merkittävä, ettei rakenteita ole syytä toteuttaa ehdotettuina matalaenergiatason ratkaisuuina.

Rakenne	Toteutettavuus luokka a – d a ei riskiä, d suuri riski	Huomioita kosteusriskeistä ja toimivuuden varmistamiseen liittyvistä tekijöistä
Tuuletettu eristerankarakenne (puu, termoranka, tmv.)	a	Höyryn/ilmansulun riittävyys Tuulensuojan vesihöyrynläpäisevyys Tuulensuojalevy ulkopuolinen huokoinen eriste
Tuuletettu yläpohjarakenne	a ( b)	Yläpohjan ilmatiiviys ja höyrysulku Riittävä tuuletus koko tuuletusväliin Suljettu aluskatejärjestelmä tai tarpeen mukaan säätävä tuuletus voivat vähentää homeen kasvun riskiä Vinojen kattojen tai muuten ahtaiden tuuletusvälien tuulettamisen riittävyys on varmistettava
Ikkunat	a (b)	Ulkopuolinen hetkellinen kondenssi voi olla mahdollinen Kun U-arvo $\ll 1$ , tarkempi suunnittelu kondenssin varalle Lämpötilakentän muutosten aiheuttamat kestävyysriskit huomioitava Liitosdetaljit ja kylmäsilat huomioon
Maanvarainen alapohja	a	
Ryömintätilainen alapohja	a – b	Riittävä, tarkoituksenmukainen tuuletus koko tilaan Kosteuden nousu maaperästä rajoitettava Maaperän lämmöneristäminen paikallisesti Lämpösäteilykatkot / alapohjan alapinnan suojaaminen eristeellä Tuuletuksen säätö vuodenajan / tuuletusmahdollisuuden mukaan Suosittava huonosti homehtuvia materiaaleja
Sisäpuolinen eristys	b - c	Matalaenergiatason toteutus edellyttää rakenteen eri kerrosten mitoitusta toimivuuden varmistamiseksi Höyryn/ilmansulun toimivuus
Hirsiseinän sisäpuolinen eristys ilman höyrynsulku	a - b	Hirsiseinien U = 0,40 taso voidaan saavuttaa turvallisesti 50 mm sisäpuolisella eristyksellä ilman lisäselvitystä (kun hirsipaksuus riittävä), ilmatiiviyden saavuttaminen varmistettava
	c	Paremmat U-arvot rakennekohtaisen selvityksen avulla Matalaenergiataso on mahdollinen mm. rajoitetun tuuletuksen avulla Ilmatiiviys, sadeveden tunkeutumisen esto varmistettava
Eristeharkko- ja tiili- ja kuorimuuriseinät	a	
Eristerapatut rakenteet	b - c	Aina suurempi kosteusriski kuin tuuletetuissa tai sandwichseinärakenteissa Riski ei liity suoraan matalaenergiatasoiseen eristämiseen Ulkovaipan kokonais- ja pitkäaikaistoimivuuden varmistus Veden pois johtaminen rappauksen takaa Puurunkoisilla rakenteilla riski on muita suurempi
Teräsohulevy- ja betonisandwich- rakenteet	a (b)	Saumojen ja liitosdetaljien sadevedenpitävyys varmistettava Veden johtaminen ulos rakenteesta varmistettava
Käännetyt katot	a	