

Mikael Salonvaara & Jyri Nieminen

Betonirakenteiden tuuletus ja lämmöneristävyys

Betonirakenteiden tuuletus ja lämmöneristävyys

Mikael Salonvaara & Jyri Nieminen
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

ISBN 951-38-6169-4 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-6170-8 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

Copyright © VTT 2003

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Lämpömiehenkuja 3, PL 1804, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 455 2408

VTT Bygg och transport, Värmemansgränden 3, PB 1804, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 455 2408

VTT Building and Transport, Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 1804, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 455 2408

Toimitus Leena Ukoski

Otamedia Oy, Espoo 2003

Salonvaara, Mikael & Nieminen, Jyri. Betonirakenteiden tuuletus ja lämmöneristävyys [Ventilation and thermal resistance of concrete structures]. Espoo 2003. VTT Tiedotteita – Research Notes 2210. 58 s. + liitt. 8 s.

Avainsanat concrete structures, construction, exterior walls, analysis, computations, methods, ventilation, ventilated structures, insulation thickness, wind, surface coatings, climate, thermal insulation

Tiivistelmä

Betonirakenteiden tuulettumista käsittelevässä tutkimuksessa selvitettiin laskennallisten analyysien avulla erilaisten betonirakenteiden toimivuutta. Tutkimusta täydennetään meneillään olevien kenttämittausten avulla. Tuuletettavien rakenteiden ominaisuuksia on verrattu perinteiseen tuulettumattomaan rakenteeseen. Eristyspaksuuden merkitystä tarkasteltiin lämmöneristeen tuulensuojauksen ja erityspaksuuden kasvattamisesta saatavan lämpöteknisen hyödyn kannalta. Tulosten perusteella arvioitiin rakenteiden käytettävyyttä eri ilmastoissa sekä julkisivupinnan ominaisuuksien merkitystä toimivuuden kannalta.

Salonvaara, Mikael & Nieminen, Jyri. Betonirakenteiden tuuletus ja lämmöneristävyyys [Ventilation and thermal resistance of concrete structures]. Espoo 2003. VTT Tiedotteita – Research Notes 2210. 58 p. + app. 8 p.

Keywords concrete structures, construction, exterior walls, analysis, computations, methods, ventilation, ventilated structures, insulation thickness, wind, surface coatings, climate, thermal insulation

Abstract

Performance of concrete exterior wall structures was analysed with computational methods. On-going field measurements will complement the study. The hygrothermal properties of ventilated structures were compared with basic non-ventilated structures. The importance of insulation thickness was analysed in terms of wind protection and thermal benefit of increased insulation level. The applicability of structures and the importance of performance properties of surface coatings for different climatic conditions have been assessed.

Alkusanat

Tässä julkaisussa selvitetään erilaisten betonisten ulkoseinärakenteiden toimintaa. Tutkimuksen tarkoituksena oli tarkentaa rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan liittyviä suunnittelutekijöitä rakenteiden pitkäaikaisen kestävyuden turvaamiseksi.

Hanke toteutettiin yhteistyössä rakennusteollisuuden kanssa. Tutkimuskumppaneina olivat Paroc Oy Ab, Saint-Gobain Isover Oy, Betoniteollisuuden laaduntarkastus BLT ry ja Betonitieto Oy. Lisäksi Parma Betonila Oy ja VB-Betoni Oy avustivat tutkimuksen kenttäkohteiden mittausjärjestelyissä.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
Symboliluettelo.....	9
1. Johdanto	11
2. Betonirakenteiden lämpötekniinen toimivuus	12
2.1 Tuuletusilmavirran vaikutus lämpöhäviöihin.....	13
2.1.1 Tuuletusvälillinen rakenne	14
2.1.2 Tuuletusurallinen rakenne.....	15
2.2 Tuuletuksen vaikutus U-arvoon – teoreettinen tarkastelu ja lämmönjohtavuuden suunnitteluarvot	15
2.3 Tuuletusvälin ilmavirtauksen vaikutus lämpöhäviöihin.....	17
2.4 Tuuletusurallisen ja tuuletusvälillisen rakenteen erot	19
2.5 Betonisandwich-elementtirakenteiden U-arvon laskenta	19
2.5.1 Tuuletusvälillisen BSW-elementtirakenteen U-arvo	20
2.5.2 Tuuletusurallisen betonisandwich-elementtirakenteen U-arvo.....	20
3. Rakenteiden kuivuminen	22
3.1 Betonipinnoilla käytettävien maalien ja pinnoitteiden ominaisuudet	22
3.2 Ilmanvaihdon merkitys kuivumiseen	23
4. Tuuletusurallisen ikkunaseinän ilmavirtaukset ja kuivuminen.....	25
5. Betonisandwich-rakenteen kuivuminen eri ilmastoissa (Espoo, Jyväskylä, Sodankylä)	30
5.1 Kosteuspitoisuusjakaumat rakenteen sisällä eri ajanhetkillä.....	31
5.2 Elementtikuoren paksuuden merkitys rakenteiden kuivumiselle.....	32
6. Ulkopinnan merkitys rakenteen kuivumiseen – maalaamaton, maalattu tai klinkkeripintainen BSW-elementti	35
6.1 Märän eristyksen kuivuminen sekä sisäpinnan vesihöyrynläpäisevyyden merkitys rakenteen kuivumiselle.....	37
7. Nelikerroksisen rakennuksen tuuletuksen toimivuus ja kuivuminen.....	39
7.1 Tuuletusurallisen 12 m korkean rakenteen ilmavirrat.....	40

7.2	Tuuletusurallisen 12 m korkean seinärakenteen kuivuminen	41
7.2.1	Tuuletusuran tai -välin ilmavirran lämpeneminen ja kosteuspitoisuuden muutos	44
7.3	Betoniulkokuoren lämpötilat ja kosteudet ajan funktiona 12 m korkeassa seinärakenteessa	46
8.	Yhteenveto	53
8.1	Rakenteiden kuivuminen	53
8.1.1	Ilmanvaihdon merkitys kuivumiseen	54
8.1.2	Betonirakenteiden kuivumiseen vaikuttavia tekijöitä	54
8.1.3	Kastuneen lämmöneristyksen kuivuminen	56
8.2	Korkean julkisivun tuuletuksen toimivuus	56
8.3	Tuuletusilmavirran vaikutus lämpöhäviöihin	57
8.4	Tuuletettujen betonisandwich-rakenteiden lämmönläpäisykertoimet	57
	Lähdeluettelo	58
	Liite A: Betonisandwich-elementtien U-arvon laskenta	A1
	Laskenta RakMK C4:n ohjeiden mukaan	A4
	Kaksiulotteisella lämmönsiirron laskentaohjelmalla Therm ja standardin SFS-EN ISO 6946 mukaan laskettu U-arvo	A5
	Laskentamallien tulosten vertailu	A7
	Yhteenveto	A8

Symboliluettelo

- u kosteuspitoisuus, [kg/kg], (kg vettä / kg kuivapaino)
- RH suhteellinen kosteus, [-], (0–1 tai 0–100 %)
- sd vesihöyrynläpäisyvastus, [m], vastaa d:n paksuisen ilmakerroksen vesihöyrynvastusta
- μ vesihöyry diffuusion vastuskerroin materiaalille, [-], materiaalin vesihöyry diffuusiokerroin on $(1/\mu) \times$ ilman vesihöyrynläpäisykerroin ($2e^{-10}$ kg/msPa)

1. Johdanto

Ulkovaipan rakenteet voivat kastua työmaalla huolellisesta suojauksesta huolimatta. Rakenteet tulee suunnitella siten, että niiden kuivuminen on mahdollista. Huolellisesti suojatut lämmöneristysrakenteet ovat pääsääntöisesti kuivia ennen asentamista. Esimerkiksi betonisandwich-elementtien villaeristeiden kosteudet ovat tyypillisesti alle 2 % kuivapainosta, mikä tarkoittaa, että betonin valmistuskosteus ei kerry eristysrakenteeseen.

VTT:n tekemissä alustavissa selvityksissä tuuletettujen BSW-elementtien ulkokuoren kosteudet ovat olleet alhaisempia kuin tuulettumattomien. Saatujen tulosten mukaan tuuletustavalla (uritettu lämmöneriste tai yhtenäinen tuuletusväli) ei ole vaikutusta kosteustasoon. Rakenteen tuulettuminen urarakenteen kautta edellyttää hyvää detaljisuunnittelua, tuuletusratkaisun suhteuttamista tuuletettavaan pinta-alaan sekä huolellista toteutusta.

Suomen ilmastossa rakenteiden tai tarvikkeiden kastuminen työmaaolosuhteiden tai vähäistenkin virheiden johdosta on asianmukaisesta suojaamisesta huolimatta mahdollista. Ideaalisten, täysin virheettömien rakenteiden toteuttaminen taas ei ole mahdollista. Rakenteiden kuivumiskyvyn ja sen pitkäaikaisen toimivuuden varmistaminen on siksi tärkeää. Uritetut villarakenteet on todettu tehokkaaksi tavaksi kuivattaa rakentamisen jäljiltä kosteita kattorakenteita /2, 3/. BSW-elementtien alustavissa seurantamittauksissa lämmöneristeen urituksen on todettu alentavan rakenteen ulkokuoren kosteutta tuulettumattomaan rakenteeseen verrattuna.

Lämmöneristysmääräykset /5, 6/ ovat muuttumassa. Tuuletuksen vaikutusta lämmönläpäisyyn ei ole selvitetty.

Tässä julkaisussa selvitetään laskennallisten analyysien avulla erilaisten betonisandwich-rakenteiden toimivuutta. Tuulettavien rakenteiden ominaisuuksia verrataan perinteiseen tuulettumattomaan rakenteeseen. Eristyspaksuuden merkitystä tarkastellaan lämmöneristeen tuulensuojauksen ja erityispaksuuden kasvattamisesta saatavan lämpöteknisen hyödyn kannalta. Tulosten perusteella arvioidaan rakenteiden käytettävyyttä eri ilmastoissa sekä julkisivupinnan ominaisuuksien merkitystä toimivuuden kannalta.

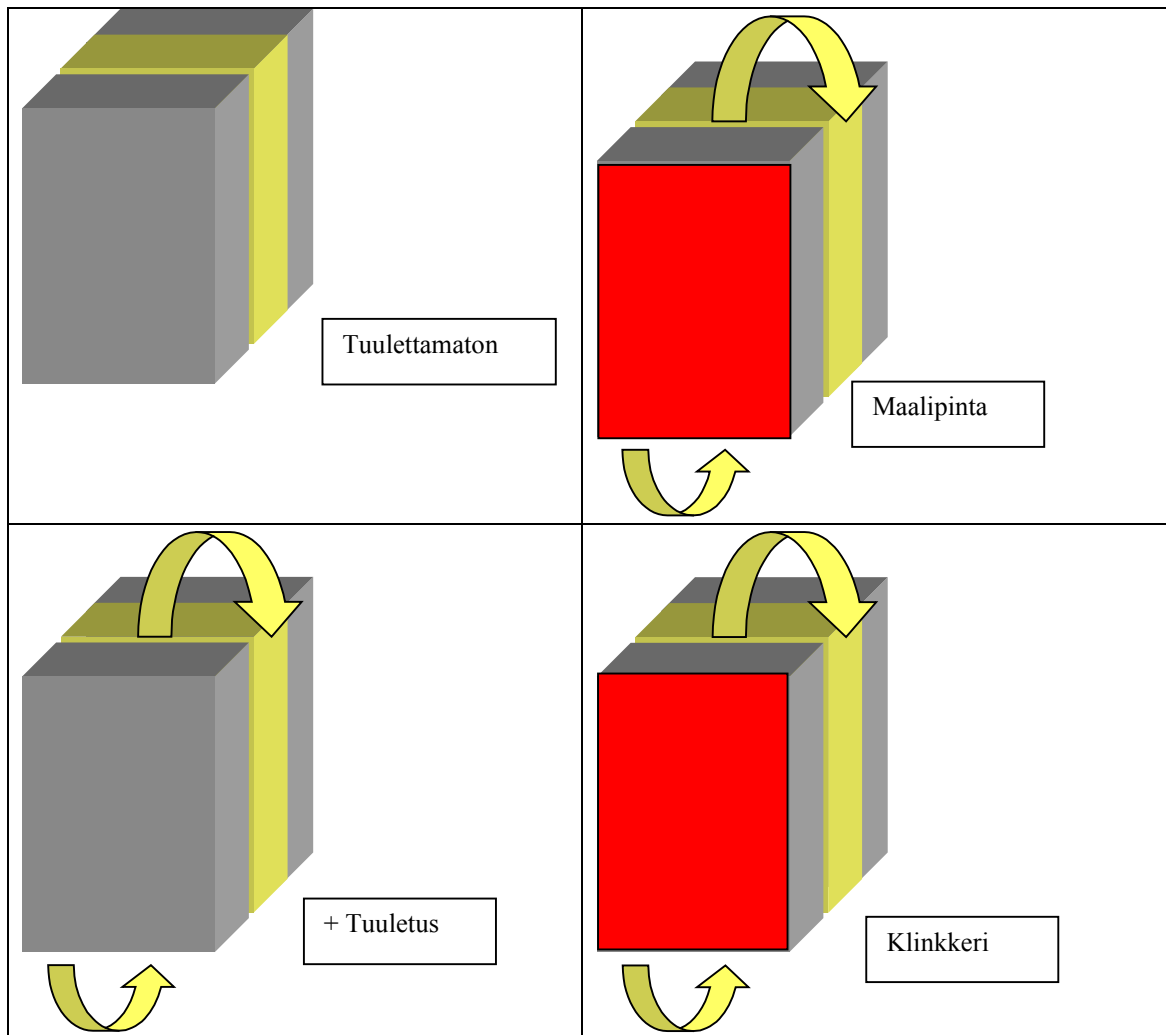
2. Betonirakenteiden lämpötekkinen toimivuus

Betonielementtirakenteiden tuuletuksen vaikutuksia betonisandwich-elementtien lämpöviöihin ja kuivumiseen arvioitiin laskennallisesti. Laskennassa käytetyt rakenteet esitetään taulukossa 1. Laskennallisesti tarkasteltiin kahta eri rakennetyyppiä: tuuletusvälillistä rakennetta ja tuuletusurin varustetulla villalla eristettyjä rakenteita. Laskennalliset tarkastelut toteutettiin VTT:llä kehitetyllä lämmön, ilman ja kosteuden siirtoa mallintavalla moniulotteisella tietokoneohjelmalla LATENITE /4/.

Taulukko 1. Laskennallisissa tarkasteluissa käytetty BSW-rakenne ulkopinnasta sisänpäin lukien.

Ulkopinta	Ulkokuori	Tuuletusväli	Eriste	Sisäkuori
Pesubetoni Maalattu Klinkkeri	a) 60 mm betoni b) 70 mm betoni	a) Tuulettamaton b) 30 mm tuuletusväli c) tuuletusurat 20 x 30	160 mm tai 200 mm mine- raalivilla	a) 100 mm betoni b) 80 mm betoni

Taulukko 2. Rakenteiden periaatekuvat. Rakenteen ulkokuori on kuvan etupuoli.



2.1 Tuuletusilmavirran vaikutus lämpöhäviöihin

Rakenteiden tuulettaminen vaikuttaa rakenneosan lämpöhäviöihin kasvattavasti. Toisaalta rakenteisiin kertyvä tai kuivumaton kosteus saattaa heikentää materiaalien lämmöneristävyyttä. Rakenteita tuulettamalla voidaan kylmässä ilmastossa yleensä varmistaa rakenteiden kosteustekninen toimivuus ja välttää haitallisen korkeat kosteuspitoisuudet.

2.1.1 Tuuletusvälillinen rakenne

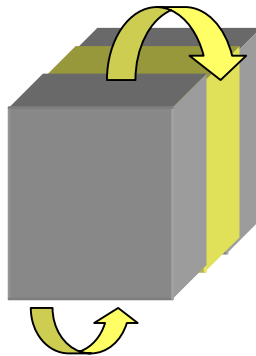
Rakenteiden tuulettamisen vaikutusta rakenteen sisäpinnan läpi meneviin lämpövirtoihin tarkasteltiin laskemalla tuuletusvälillisen BSW-elementin lämpö- ja kosteustekninen käyttäytyminen tunnitaisilla säätiedoilla (Espoo) kolmen vuoden laskentajaksolla tuulettamattomana ja kahdella eri tuuletusilmavirtauksella.

Tuuletusilmavirrat 30 mm tuuletusvälissä olivat

- A: 0 m/s
- B: 0,05 m/s ja
- C: 0,20 m/s.

Laskentajakson pituus oli kolme vuotta Espoon säätiedoilla.

Keskimääräiset lämpöhäviöt 1. ja 3. vuoden aikana olivat eri ilmamäärillä tuulettamattomaan tapaukseen verrattuna kuvan 1 taulukon mukaisia.



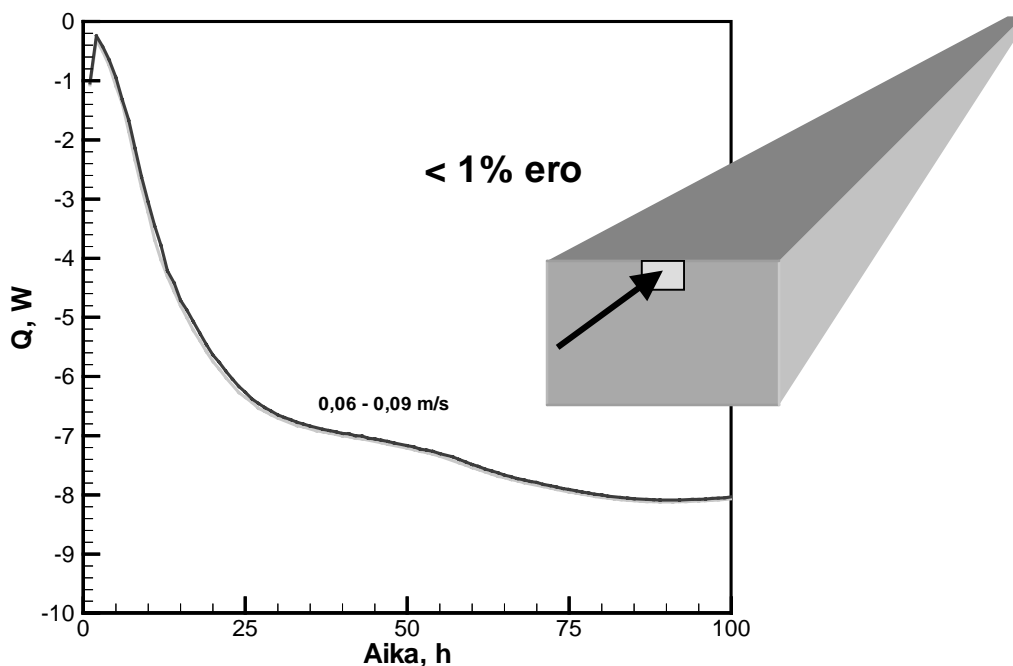
Aika Tapaus	1.vuosi	3.vuosi	1.kesä	3.kesä	1.talvi	3.talvi
B/A	+1.2 %	+1.1 %	+15.7 %	+8.0%	+ 0 %	+ 0.1 %
C/A	+3.3 %	+2.9 %	+21.1 %	+13.2 %	+0.9 %	+ 1.1 %

Kuva 1. Tuuletusvälillisen seinän periaatekuva ja eri vuodenajoilta lasketut keskimääräiset lämpöhäviöt. Tuuletusilmavirtaus lisää lämpöhäviöitä talvikaudella n. 3 %, kun ilmavirtaus on alle 0,2 m/s. Kesäkaudella tuuletusilmavirtaus lisää suhteellisesti laskettuna lämpöhäviöitä enemmän, mikä johtuu ilmavirtauksen jäähdyttävästä vaikutuksesta auringon säteilykuormien poistamisessa. Ensimmäisen vuoden lämpöhäviöissä erityisesti kesäkaudella on havaittavissa rakenteen voimakas kuivuminen ja tästä johtuvat poikkeuksellisen suuret lämpöhäviöt ja ilmavirtauksen vaikutukset niihin.

2.1.2 Tuuletusurallinen rakenne

Rakenteiden tuulettamisen vaikutusta rakenteen sisäpinnan läpi meneviin lämpövirtoihin tarkasteltiin laskemalla tuuletusurallisen BSW-elementin lämpö- ja kosteustekninen käyttäytyminen tuulettamattomana ja yhdellä tuuletusilmavirtauksella.

Tuuletusuran ilmavirtauksen vaikutus rakenteen lämmöneristyksen läpi tapahtuvaan lämpöhäviöön 3 m korkealla seinällä olivat alle 1 %:n luokkaa, kun ilmavirtaukset tuuletusurassa (30 mm x 30 mm, cc 210 mm) olivat $v = 0,06\text{--}0,09$ m/s.



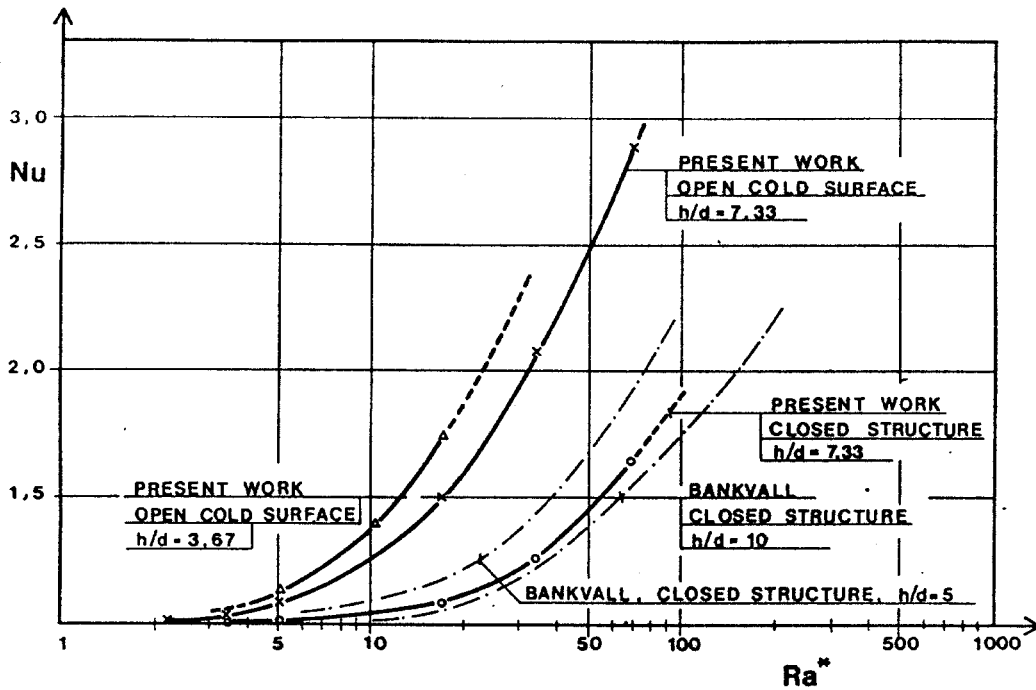
Kuva 2. Tuuletusurallisen eristekerroksen periaatekuva. Laskennassa käytetyt ilmavirtausnopeudet olivat 0,06–0,09 m/s tuuletusurissa (koko 30 mm x 30 mm), jotka olivat 210 mm välein.

2.2 Tuuletuksen vaikutus U-arvoon – teoreettinen tarkastelu ja lämmönjohtavuuden suunnitteluarvot

Lämmöneristeiden lämmönjohtavuuden suunnitteluarvon määrittämisessä otetaan huomioon eristyksen suojaus- ja asennustapa. Jos eriste on kahden ilmatiiviin pinnan välissä, eristeen ilmanläpäisevyydestä lasketaan lämmönjohtavuuteen lisäys, joka on $10 \times$ ilmanläpäisevyys (m^3/msPa); täysin avoimelle pinnalle lisäykseen tuleva kerroin on $30 \times$ ilmanläpäisevyys (yksikössä m^3/msPa). Tiheydeltään $70 \text{ kg}/\text{m}^3$ mineraalivillaeristeelle

ilmanläpäisevyys voi olla esim. $40 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{msPa}$. Tämä antaa lämmönjohtavuuteen li-
sän $0,0012 \text{ W/mK}$ toiselta pinnaltaan täysin avoimelle rakenteelle. Suhteellisesti katsottu-
na tämä vastaa $0,0012/0,034 = 3,5 \%$ lisäystä. Ilmanläpäisevyyden lisäksi lämmönjohta-
vuuden laskennallista arvoa korotetaan työtavasta, epäideaalisuuksista ym. juontavista
seikoista johtuen lisäksi arvoilla $0,001-0,003 \text{ W/mK}$ suojaustavasta riippuen.

Alla on tarkasteltu ilmanläpäisevyyttä ja BSW-rakenteen tuulettumista sen lämmön-
vastusta heikentävien ominaisuuksien osalta. Aiemmissa tutkimuksissa on todettu il-
manläpäisevyyden heikentävän rakenteen U-arvoa kuvan 3 mukaisesti. Toiselta pinnal-
taan avoimessa rakenteessa U-arvo kasvaa ilman konvektiovirtausten johdosta n. 3-
kertaisesti sen, mitä konvektiovirtauksista johtuva lisäys on kahden tiiviin pinnan välis-
sä.



Kuva 3. Nusseltin luku Rayleigh'n luvun funktiona toiselta pinnaltaan avoimelle ja mo-
lemmelta pinnoilta suljetulle rakenteelle /1/.

Rayleigh'n luku voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$Ra^* = g\beta \left(\frac{\rho c_p}{v} \right) \cdot \frac{4K_{v,x}K_{v,y}}{[(K_{q,y}K_{v,s})^{0,5} + (K_{q,x}K_{v,y})^{0,5}]^2} \Delta T d, \quad (1)$$

missä ρ , c_p ja v ovat virtaavan aineen ominaisuuksia, ΔT on lämpötilaero ja d on eris-
teen paksuus. $K_{q,x}$ ja $K_{v,x}$ ovat lämmönjohtavuus (W/mK) ja ilmanläpäisevyys (m^2) vaa-
kasuuntaan (alaindeksillä y pystysuunta).

Tiheälle 70 kg/m^3 mineraalivillalle ilmanläpäisevyydet ovat n. $0,6\text{--}1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ ja eristeelle mitattu lämmönjohtavuus voi olla esim. $0,034 \text{ W/mK}$. Tällöin Rayleigh'n luvuksi saadaan n. 2 (kun $\Delta T = 35$, $d = 0,16 \text{ m}$). Tällä Rayleigh'n luvulla Nusseltin luvuksi tuli si kuvan 3 käyrän mukaisesti erittäin pieni.

Ilmanläpäisevyydestä aiheutuva lisä laskennalliseen lämmönjohtavuuteen on lineaarinen ilmanläpäisevyyden funktio. Kuvasta 3 ja kaavasta 1 tosin nähdään, että Rayleigh'n luku on likipitään lineaarinen ilmanläpäisevyyden suhteen mutta Nusseltin luku (ja näin myös tehollinen lämmönjohtavuus) on Rayleigh'n luvun suhteen epälineaarinen. Nykyisin käytössä oleva ilmanläpäisevyydestä seuraava lämmönjohtavuuden lisäys konvektiovaikutusten huomioon ottamiseksi on tehty mitä ilmeisimmin kevyiden, ilmaa hyvin läpäisevien eristeiden perusteella. Voidaan arvioida, että lineaarinen korjauskäyrä lämmönjohtavuuteen yliarvioi ilmanläpäisevyyden merkitystä tiheillä eristyksillä, joilla ilmanläpäisevyys on kevyitä eristeitä alhaisempi ja tehollista lämmönjohtavuutta kasvattavat ilmavirrat ovat pienempiä.

2.3 Tuuletusvälin ilmavirtauksen vaikutus lämpöhäviöihin

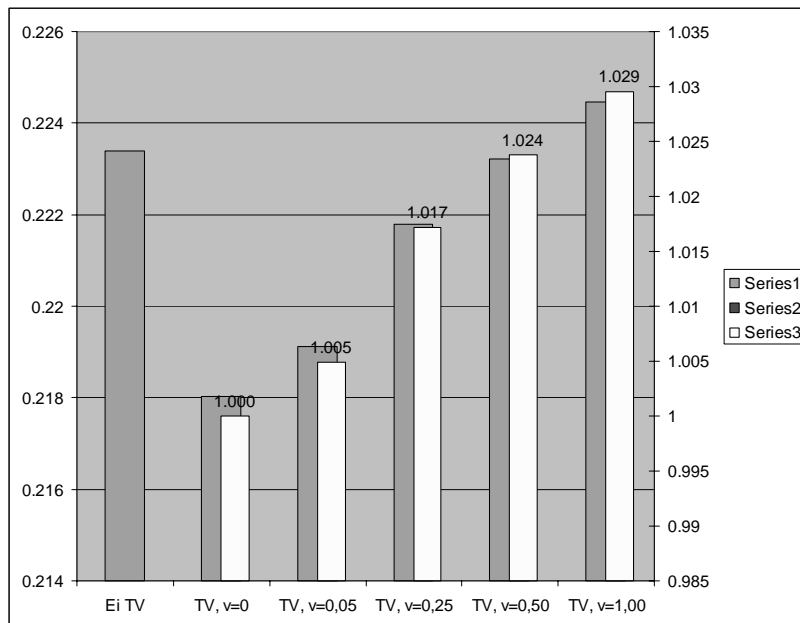
Lämmön siirtyminen konvektiolle alttiina olevassa eristekerroksessa laskettiin ohjelmalla LATENITE /4/ -rakenteelle, jonka kerrokset olivat ulkoapäin lukien

- 70 mm betonia
- 30 mm tuuletusväli (on/ei)
- 160 mm mineraalivillaeristys (70 kg/m^3)
- 80 mm betonia.

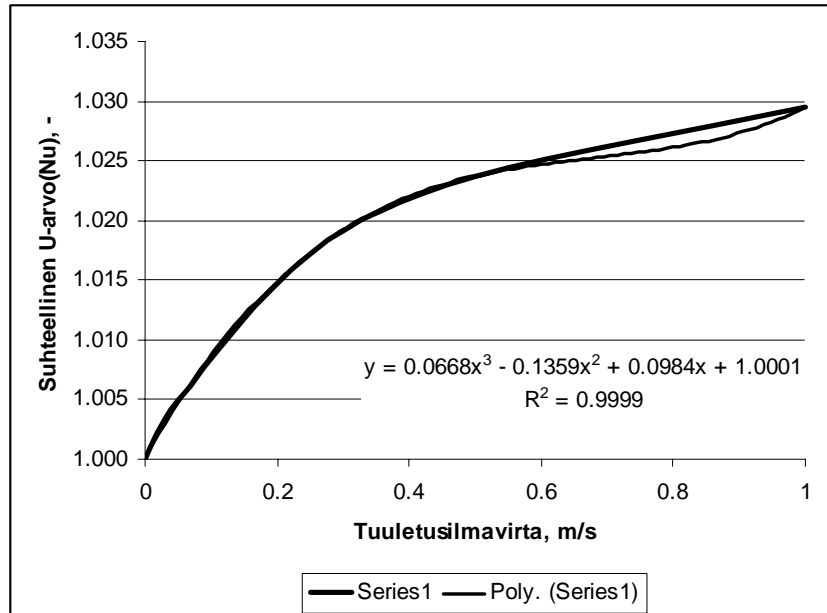
Lasketut tapaukset olivat ilmavirroiltaan taulukon 2 mukaiset.

Taulukko 2. Laskennallisesti analysoidut tapaukset tuuletusvälin U-arvovaikutusten selvityksessä.

Tapaus
Ei tuuletusväliä (EI TV), ei tuuletusvirtausta ($v = 0$)
Tuuletusväli (TV), ei tuuletusvirtausta ($v = 0$)
TV, $v = 0,05 \text{ m/s}$
TV, $v = 0,25 \text{ m/s}$
TV, $v = 0,5 \text{ m/s}$
TV, $v = 1,0 \text{ m/s}$



Kuva 4. U -arvot (W/m^2K , vasen sarake Series1) ja suhteellinen U -arvon lisäys (oikea sarake, Series3) tuuletusilmavirran funktiona.



Kuva 5. Nusseltin luku tuuletusvälillisen rakenteen U -arvolaskelmien perusteella. Alkuvaiheessa pienillä ilmavirroilla vaikutus on voimakkaampi johtuen rakenteen ulkokuoren 'irrottamisesta' koko rakenteen U -arvosta (ulkokuoren eristävyys merkitys vähenee koko rakenteen eristävydestä). Ilmavirtojen lisääntyessä lämpöhäviöiden kasvu johtuu konvektiovaikutuksista eristekerroksessa.

Tuuletusvälin (30 mm) lisääminen rakenteeseen parantaa rakenteen U-arvoa, mikäli rakenteessa ei ole ilman läpivirtausta (tuulettumista), missä ilman virtausnopeus on suurempi kuin 0,5 m/s. Vasta tätä suuremmilla virtaamilla ilmavälin U-arvoa parantava vaikutus kumoutuu ilmavirtausten aiheuttaman tehollisen lämmönjohtavuuden heikkenemisen kautta.

2.4 Tuuletusurallisen ja tuuletusvälillisen rakenteen erot

Tuuletusuralliseen rakenteeseen ei tule lämmönvastusta lisäävää ilmaväliä. Tuuletusura on hieman eristeen sisällä tuuletusväliä lämpimämmässä kohdassa, jolloin ilman lämpeneminen on hieman suurempaa kuin tuuletusvälillisessä rakenteessa. Tuuletusurallisen rakenteen lämpöhäviöt laskettiin ilmavirtauksella 0 m/s ja 0,2 m/s 30 mm x 30 mm:n urallisessa tapauksessa. 30 x 30 mm:n uran (cc 210 mm) ilmavirtaus muunnettuna tuuletusvälilliseen (30 mm) ilmavirtaukseen antaa 1/7 ilmavirtausnopeuden tuuletusvälissä, silloin kun sekä tuuletusvälillisessä että tuuletusurallisessa rakenteessa ilman massavirta aikayksikköä ja seinäpinta-alaa kohden on sama. Tuuletusurallisessa tapauksessa lämpöhäviöt kasvoivat 1 % ilmavirtauksella 0,2 m/s / tuuletusura, kun tuuletusvälillisissä rakenteissa ko. virtaamalla (0,2 m/s x 1/7 = 0,0285 m/s) lämpöhäviöiden lisäys ilmavirtauksettomaan tapaukseen olisi n. 0,3 % (interpoloituna kuvasta 11) ja virtaamalla 0,35 m/s tuuletusuraa kohden (vastaa tuuletusvälin virtaamaa 0,05 m/s) lämpöhäviöiden lisäys oli 1,6 %, kun se tuuletusvälillisessä rakenteessa oli 0,5 %. Tuuletusurallisessa rakenteessa sama tuuletusilman massavirta kasvattaa lämpöhäviöitä n. kolme kertaa tuuletusvälilliseen verrattuna. Eli tuuletusurallisessa tapauksessa sama ilman massavirta aiheuttaa hieman tuuletusvälillistä rakennetta suuremman lämpöhäviöiden kasvun. Tuuletusurallisessa rakenteessa lämpöhäviöiden lähtötaso vastaa tuuletusvälitöntä tapausta, kun taas tuuletusvälillisessä lähtötaso on U-arvoltaan alhaisempi (ilmavälin lämmönvastus). Tuuletusurallisissa rakenteissa ilmavirtojen kokonaismäärä pinta-alaa kohden on kuitenkin yleisesti ottaen vähäisempi kuin tuuletusvälillisessä rakenteessa, jolloin lopullinen vaikutus U-arvoihin on vähäinen.

Tuuletusvälin merkitys rakenteen lämmönvastukseen riippuu myös tuuletusvälin ulkopuolisen kerroksen lämmönvastuksesta. Mikäli ulkoverhouksena toimiva kerros muodostaa lämmönvastukseltaan merkittävän osan rakenteen koko lämmönvastuksesta, tulee tuuletusilmavirtauksen vaikutus lämpöhäviöihin merkittävämmäksi.

2.5 Betonisandwich-elementtirakenteiden U-arvon laskenta

Betonisandwich-elementtirakenteiden kuivumiskyvyn varmistamiseksi on rakenteisiin järjestetty joko tuuletusväli tai tuuletusurallinen eristekerros. Näiden U-arvojen laskenta

poikkeaa hieman toisistaan ja tähän on seuraavassa esitetty menettelytapa. Lisätietoja U-arvojen laskentaan on esitetty liitteessä A.

2.5.1 Tuuletusvälillisen BSW-elementtirakenteen U-arvo

Tuuletusvälillisessä rakenteessa tyypilliset rakennekerrokset ja esimerkkilaskennassa käytetyt kerrospaksuudet ovat ulkoa sisällepäin lukien

- betoniulkokuori (70 mm)
- tuuletusväli (30 mm)
- mineraalivillaeristys (160 mm)
- betonisisäkuori (80 mm).

Betonisandwichelementissä lämmöneristyspaksuus 160 mm edellyttää eristeen nimellispaksuutta noin 165 mm. Hyvin tuulettetussa rakenteessa ei tuuletusvälin ulkopuolisia rakennekerroksia saa ottaa huomioon U-arvon laskennassa. Hyvin tuulettettuna rakenteena pidetään tuuletusväliä, jonka ulkoilmaan olevien aukkojen määrä seinän leveyttä kohden ylittää $15 \text{ cm}^2/\text{m}$ ja ilma pääsee virtaamaan rakenteen laidalta toiselle. Mikäli tuuletusvälissä ilmavirran nopeus kuitenkin jää alle 1 m/s, voidaan tuuletusväliin rajoittuvan pinnan lämmönsiirron vastuksena käyttää samaa arvoa kuin sisäilmaa vasten olevalle pinnalle.

Mineraalivillaeristyksen lämmönjohtavuus on useille rakenteeseen tyyppihyväksytyille eristeille hyvin tuulettuvaan tuuletusväliin rajoittuneena $0,041 \text{ W/mK}$. Lievästi tuuletuissa rakenteissa (aukkojen määrä $5\text{--}15 \text{ cm}^2/\text{m}$) eristeessä ei tarvita tuulensuojakalvoa.

U-arvoksi saadaan edelläesitetylle rakenteelle $U = 1/R + \sum \Delta U_{\text{ansaat}} = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$, missä $R = R_u + R_{bu} + R_{mv} + R_{bs} + R_i$; $R_u = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$, $R_{bu} = 0,07 \text{ m} / 1,7 \text{ W/mK}$, $R_{mv} = 0,16 \text{ m} / 0,041 \text{ W/mK}$ ja $R_i = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$. $\sum \Delta U_{\text{ansaat}}$ on ansaiden ja muiden pistemäisten läpivientien aiheuttama lisäys U-arvoon. Ansaita (ruostumaton teräs $\phi 5 \text{ mm}$) on esimerkiksi tapauksessa keskimäärin $7,778 \text{ kpl/m}^2$. Yksittäisen ansaan aiheuttama lisäys konduktanssiin on $0,002 \text{ W/K}$, jolloin kokonaislisäykseksi neliometriä kohden tulee $0,0156 \text{ W/m}^2\text{K}$.

2.5.2 Tuuletusurallisen betonisandwich-elementtirakenteen U-arvo

Tuuletusurallisessa rakenteessa betonielementtien välissä oleva eristys on tiiviisti betonipintoja vasten. Eristyskerroksessa on ulointa betonielementtiä vasten olevalla pinnalla tasaisin välein yhtenäisiä uria, jotka ovat yhteydessä ulkoilmaan erillisten tuuletusauk-

kojen tai tuuletuskoteloiden kautta. Tuuletusurat, niiden koko ja keskinäinen väli voivat vaihdella valmistajasta riippuen. Alla on esitetty tuuletusurallisen betonisandwich-elementtirakenteen U-arvon laskenta, kun rakenteessa on käytetty kahdella eri tavoin uritettua villaa.

Tuuletusurallinen BSW-elementtirakenne on esimerkissämme avoin ulkoilmaan tuuletuskoteloiden kautta. Yhden tavanomaisesti käytetyn tuuletuskotelon aukkopinta-ala on $4,8 \text{ cm}^2$. Lievästi tuulettuvassa rakenteessa aukkoja saa olla enintään $15 \text{ cm}^2/\text{m}$. Tuuletuskoteloita on tavallisesti esimerkiksi 1,5 m välein kerrosväleissä, jolloin aukkopinta-ala jää raja-arvon alle.

Tuuletusurallisessa BSW-elementissä on lämpövirran suuntaan tasosuunnassa eriarvoisia materiaaleja tuuletusuran kohdalla. Tuuletusurassa lämpö etenee johtumalla, ilman konvektiolla ja säteilyllä. Lievästi tuulettuvassa rakenteessa ilmvälin vastukseksi (esimerkissä 20 mm tai 33 mm) voidaan ottaa puolet tuulettamattoman ilmvälin vastuksesta, joka 20 mm ilmvälille on $0,17 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$, eli vastukseksi saadaan $0,085 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$. Ilmvälin vastus kasvaa tuulettamattomassa korkeimmillaan arvoon $0,18 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$, kun ilmvälin paksuus on 50 mm tai suurempi. Rakennusmääräyskokoelman osassa C4 annetuissa ohjeissa käsitellään ainoastaan rakenteen ns. alalikiarvon laskenta. Tämä menettely ottaa voimakkaammin huomioon rakenteiden kylmäsillat. Tarkempi tulos saavutetaan laskemalla sekä ala- että ylälikiarvo lämmönvastukselle ja ottamalla näistä keskiarvo. Tämä menettely on esitetty mm. SFS 6946 -standardissa.

Ansaita on tuuletusurallisessa rakenteessa vähemmän kuin tuuletusvälillisessä BSW-rakenteessa ja tässä esimerkissämme niitä on $5,556 \text{ kpl}/\text{m}^2$. Ansaiden aiheuttama lisäys U-arvoon on tuuletusurallisessa rakenteessa $0,0111 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$.

Taulukossa 3 on kahdella eristyspaksuudella eristetyn betonisandwich-elementin U-arvot. Lämmöneristeen lämmönjohtavuutena on käytetty arvoa $0,037 \text{ W}/\text{mK}$.

Taulukko 3. Tuuletusurallisen betonisandwich-elementtirakenteen U-arvo kahdella eri eristyspaksuudella eristettynä. Rakennepaksuudet kuten tuuletusvälillisessä rakenteessa: 70mm/160 tai 200 mm/80mm (betoni, eriste, betoni).

Urien leveys x syvyys x jako ja eristyspaksuus, mm	U-arvo, $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
25 x 33 x 150, eristyspaksuus 160mm	0,25
25 x 33 x 150, eristyspaksuus 200 mm	0,20

3. Rakenteiden kuivuminen

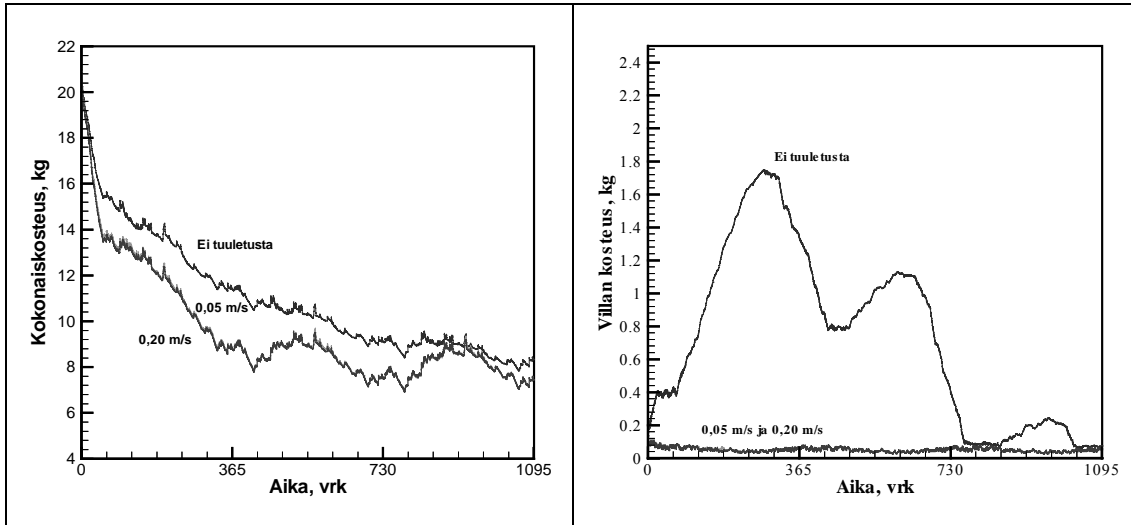
Betonisandwich-rakenteiden kuivuminen voi tapahtua rakenteen ulkopinnan kautta (pääasiassa uloin betonielementti), eristetilasta tuuletusilmavirran kautta tai rakenteen sisäpinnalta diffuusiolla. Betonin vesihöyrynläpäisykyky on huomattavasti alhaisempi kuin rakenteen muiden materiaalien, jolloin betonielementtien kuivuminen riippuu merkittävässä määrin elementtien paksuudesta ja kuivumiskykyisistä pinnoista (onko tuuletettu tai ei tuuletettu). Maalipinnat saattavat hidastaa kuivumista vain, mikäli niiden vesihöyrynläpäisykerroin vastaa useata millimetriä betonia. Maalien kuivumista edistävä ominaisuus on siinä, että ne rajoittavat (tai jopa poistavat) viistosateen aiheuttamaa rakenteen kostumista, jolloin tarvittava kuivatettava kosteusmäärä on alhaisempi maalatussa rakenteessa kuin maalaamattomassa.

3.1 Betonipinnoilla käytettävien maalien ja pinnoitteiden ominaisuudet

VTT:llä mitatut maalien kosteudensiirron läpäisevyydet on tehty maalaamalla kipsilevyn päälle. Syntyvän pinnan ominaisuuksiin vaikuttaa maalattava pohjamateriaali ja maalin tunkeutuvuus materiaaliin. Maalien läpäisevyyksiä ei ole VTT:llä mitattu betonipinnalla, joten tiettyjen maalien läpäisevyyksiä kysyttiin valmistajalta (Tikkurila).

Tikkurilan maalineuvonnan mukaan betonipinnoilla käytettävien maalien ja pinnoitteiden vesihöyrynvastusta kuvaava sd-arvo (μd) vaihtelee 0,14–1,5. Nämä vastaavat vesihöyrynläpäisevyytenä arvoja $1,3\text{--}14 \times 10^{-10} \text{ kg/m}^2\text{sPa}$ ($\text{sd}=0,14 \text{ m}$ antaa läpäisevämmän eli suuremman vesihöyrynläpäisevyyden). Seuraavassa on joidenkin maalityyppien sd-arvoja (suluissa sd-arvoa vastaava pinnan vesihöyrynläpäisy)

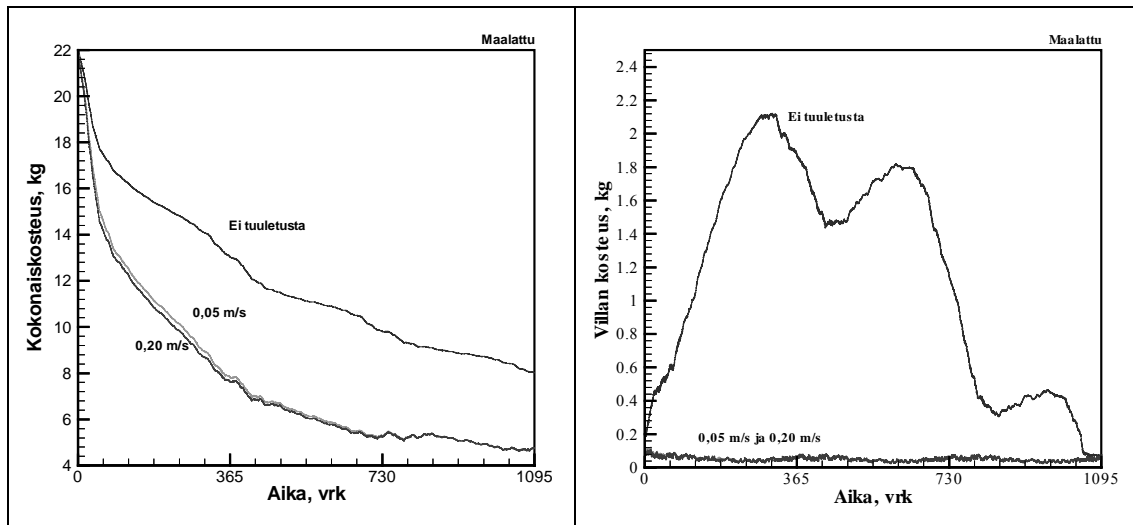
- Kivisil, Holvi, Finnseco	n. 0,14	($14 \times 10^{-10} \text{ kg/m}^2\text{sPa}$)
- Kivitex, Yki	n. 0,5	($4 \times 10^{-10} \text{ kg/m}^2\text{sPa}$)
- Kenitex	n. 1,2	($1,7 \times 10^{-10} \text{ kg/m}^2\text{sPa}$).



Kuva 6. Tuuletusvälin ilmanvaihdon merkitys maalaamattoman rakenteen kokonaiskosteuden (vasemmalla) ja eristetilan (oikealla) kuivumiseen. Laskenta Espoon säätiedostolla. Rakenteen alkukosteus 98 %-rh. Laskennan alku 1. heinäkuuta. Laskennassa käytetyt ilmavirrat 0, 0,05 ja 0,20 m/s 30 mm paksussa tuuletusvälissä. Pienikin ilmavirta on riittävä poistamaan eristetilaan betonista diffuusiolla tulevan kosteuden. Kahdella eri ilmavirtaamalla olevat eristetilan kosteuskäyrät ovat likipitään päällekkäin kuvan alareunassa. Virtauksettomassa tapauksessa eristetilaan kerääntyy talvikausilla sisäpuolisesta betonikerroksesta kosteutta ja kosteuden poistuminen on hidasta, koska ainoa kuivumisreitti on diffuusiolla betonikerrosten läpi.

3.2 Ilmanvaihdon merkitys kuivumiseen

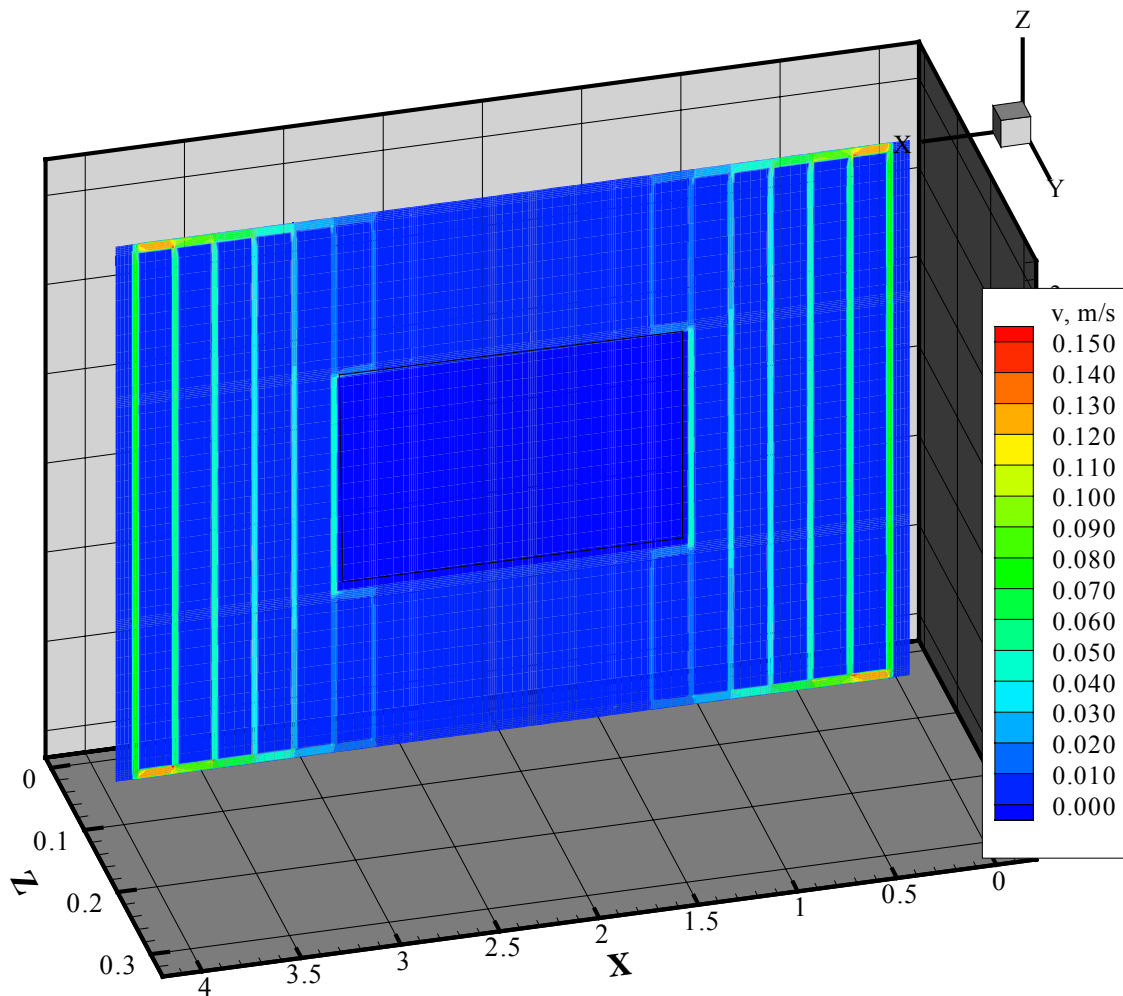
Tuulettavan ilmavirran massavirran suuruus ja ilmavirran kyky sitoa kosteutta tuuletusurasta tai -välistä määrittää tuuletusilmavirran vaikutuksen rakenteen kuivumiseen. Mikäli kuivuminen tapahtuu eristekerroksesta, on ilmavirralla parempi kyky kyllästyä maksimikosteuteen kuin, jos kuivuminen tapahtuu syvemmältä betonikerroksesta (tällöin diffuusio betonista hallitsee kosteusvirtaa).



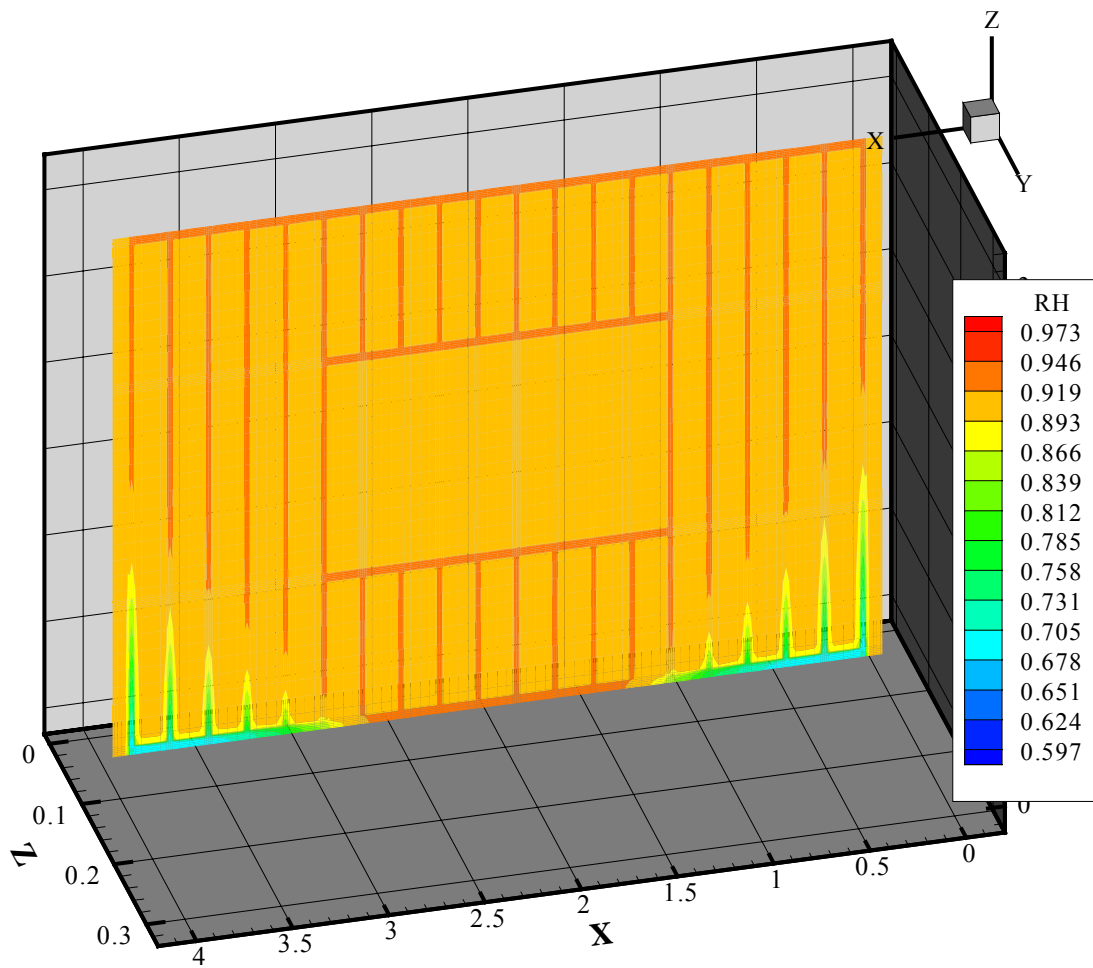
Kuva 7. Vasemmalla ulkopinnaltaan maalatun rakenteen kokonaiskosteus tuuletusilmavirran ja ajan funktiona. Rakenteen kuivuminen on tehokkaampaa ulkopintaa tiivistävästä maalipinnasta huolimatta kuin maalaamattomassa rakenteessa, koska maalipinnasta johtuen viistosateen kostuttava vaikutus puuttuu. Laskennan alku 1. heinäkuuta. Oikealla eristetilan kosteus eri ilmavirroilla. Eristetila kostuu tuulettamattomassa tapauksessa sisemmän betonielementin kuivumisesta ulospäin lämpötilagradientin alaisena.

4. Tuuletusurallisen ikkunaseinän ilmavirtaukset ja kuivuminen

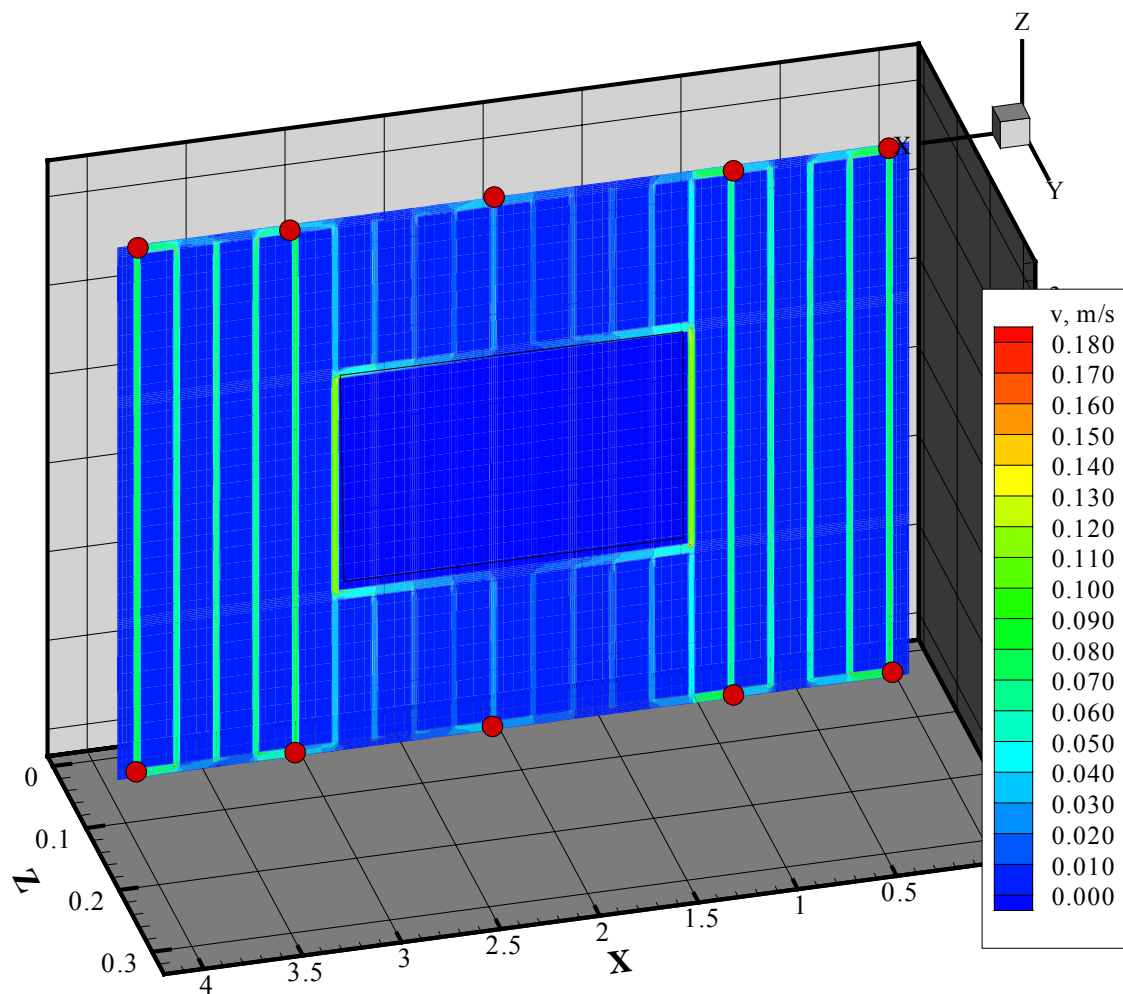
Ilmavirran jakautumista tuuletusurilla varustetussa ikkunallisessa rakenteessa analysoidiin laskennallisesti tapauksissa, joissa a) tulo- ja poistoilmaputket sijaitsivat ainoastaan rakenteen nurkissa (yht. 4 kpl), b) tulo- ja poistoilmaputkia oli 1 m:n välein ylä- ja alareunassa (yht. 5 kpl / reuna) tai c) tulo- ja poistoilmaputkia oli 1 m:n välein ylä- ja alareunassa (yht. 5 kpl / reuna) sekä yksi putki ikkunan ylä- ja alapuolella.



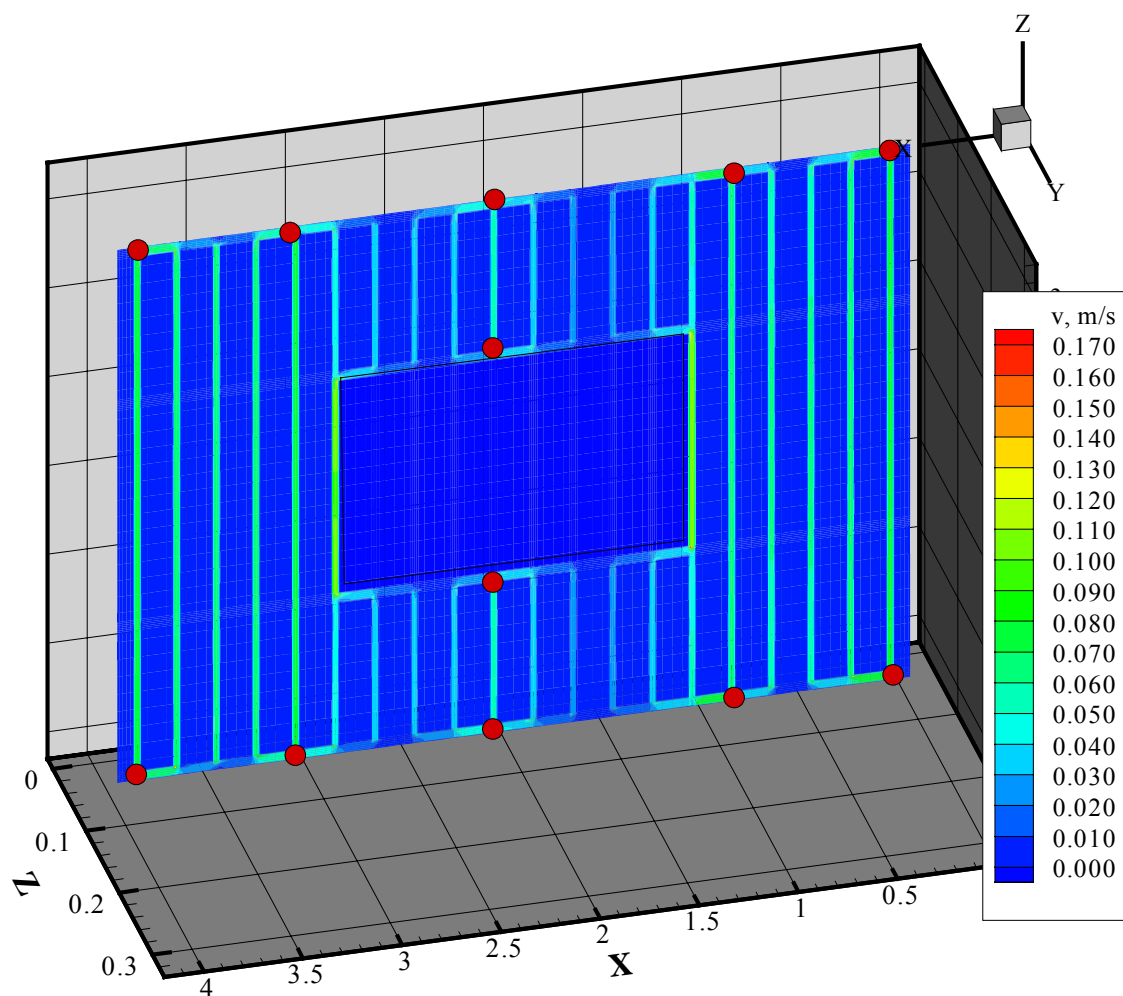
Kuva 8a. Ilmavirtausnopeuden tasa-arvokäyrät ikkunallisessa rakenteessa, kun tulo- ja poistoputket ovat rakenteen nurkissa.



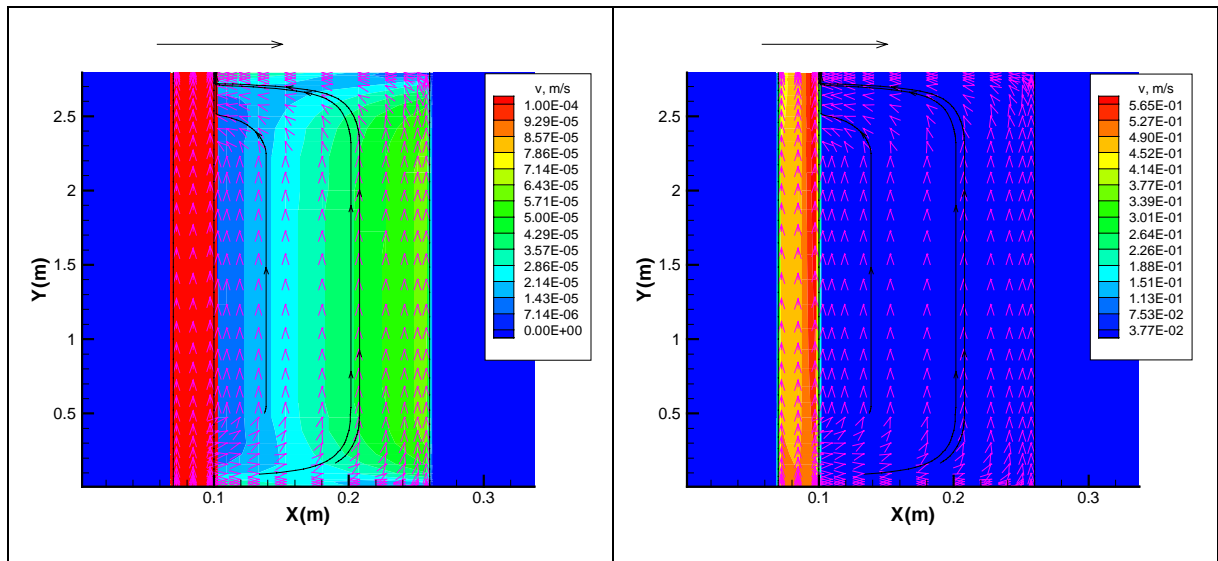
Kuva 8a2. Ilmavirran kuivattava vaikutus rakenteen eri osissa, kun ilmavirtausputket ovat pelkästään rakenteen ala- ja ylänurkissa. Kuvassa esitetään suhteellisen kosteuden tasa-arvokäyrät tuuletusurien syvyydeltä rakenteesta. Ilmavirran epätasaisen jakautumisen johdosta on selvästi havaittavissa rakenteen heikko kuivuminen ikkunan ympäristöstä.



Kuva 8b. Ilmavirtausnopeuden tasa-arvokäyrät ikkunallisessa rakenteessa, kun tulo- ja poistoputket ovat rakenteen ala- ja yläreunassa 1 m:n välein. Ikkunan ympärillä on edelleen heikon ilmavirtauksen alueet. Ikkunan ylä- ja alapuoli eivät tuuletetu riittävästi.



Kuva 8c. Ilmavirtausnopeuden tasa-arvokäyrät ikkunallisessa rakenteessa, kun tulo- ja poistoputket ovat rakenteen ala- ja yläreunassa 1 m:n välein ja lisäksi yksi putki ikkunan ylä- ja alapuolella. Ilmavirtauksen jakautuminen on tasaisempaa ikkunan ympärillä kuin tapauksissa a) ja b).



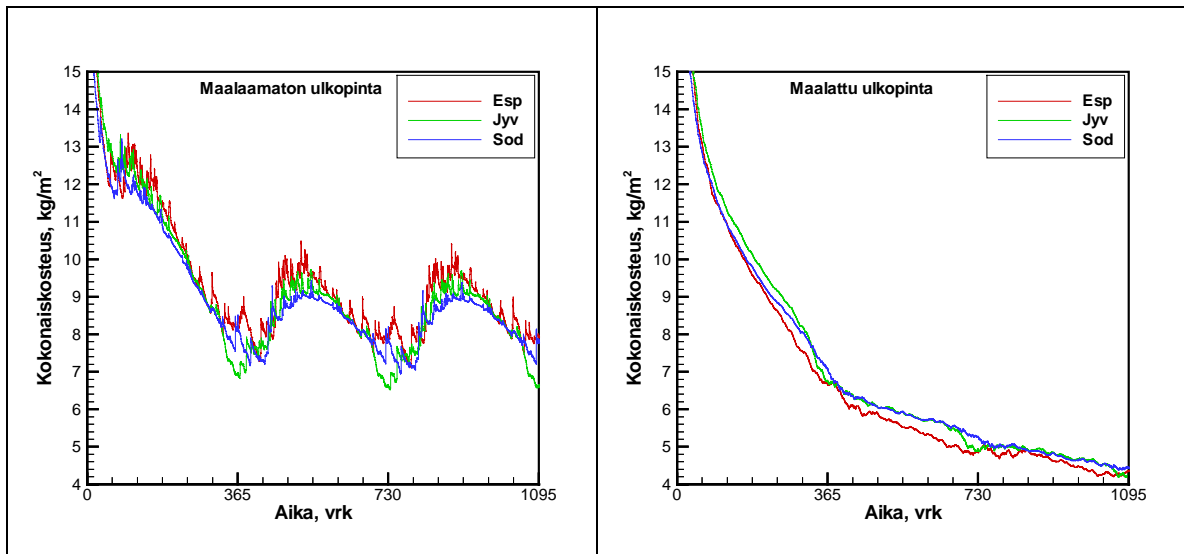
Kuva 9. Esimerkki ilmavirroista tuuletetussa BSW-rakenteessa. Tuuletusilmavirran nopeus tuuletusvälissä on (keskimäärin) 0,5 m/s.

5. Betonisandwich-rakenteen kuivuminen eri ilmastoissa (Espoo, Jyväskylä, Sodankylä)

Rakenteiden kuivumista analysoitiin eri ilmastovyöhykkeillä. Kuivumisnopeudessa ei havaittu merkittävää poikkeamaa. Rannikkoseuduilla kuivuminen on hitaampaa, mikä johtunee korkeammasta ilmankosteudesta ja vuotuisista viistosademääristä.

Rakenteet olivat ulkopinnasta sisäpintaan päin:

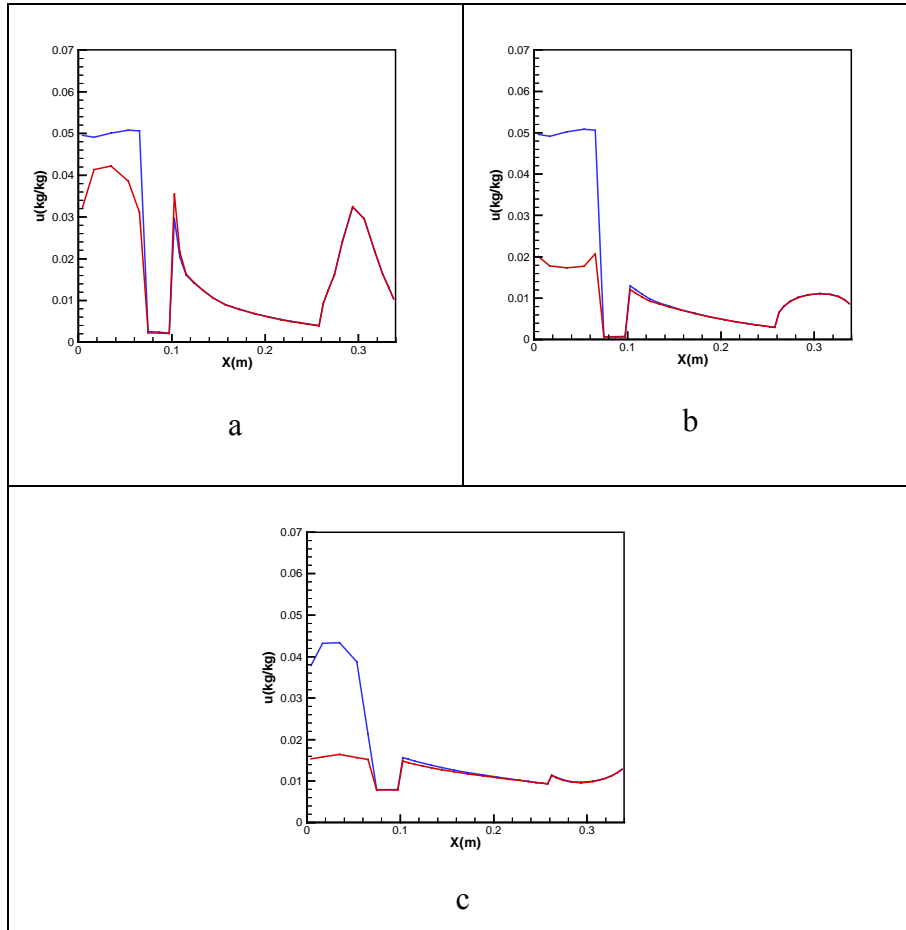
- 70 mm betonia (maalaamaton)
- 30 mm tuuletusväli (2,8 m korkea, tuuletusnopeus 0,05 m/s = ilmanvaihtuvuus tuuletusvälissä n. 66 1/h)
- 160 tai 200 mm mineraalivillaeristys
- 80 tai 150 mm betonia (hyvin kosteutta läpäisevä maalipinta).



Kuva 10. Vasemmalla ulkopinnaltaan maalaamattoman BSW-rakenteen kokonaiskosteus 3 vuoden kuluttua alkutilanteesta 98 %-rh. Ilmastot Espoo, Jyväskylä ja Sodankylä. (70/30/160/80 – kerrospaksuudet). Laskennan alkuhetki 1. heinäkuuta. Oikealla ulkopinnaltaan maalatun (ei viistosateen imeytymistä, maalin vesihöyrynläpäisevyys 300 ng/m²sPa, sd=0,66 m) BSW-rakenteen kokonaiskosteus kolmen vuoden kuluttua alkutilanteesta 98 %-rh.

5.1 Kosteuspitoisuusjakaumat rakenteen sisällä eri ajanhetkillä

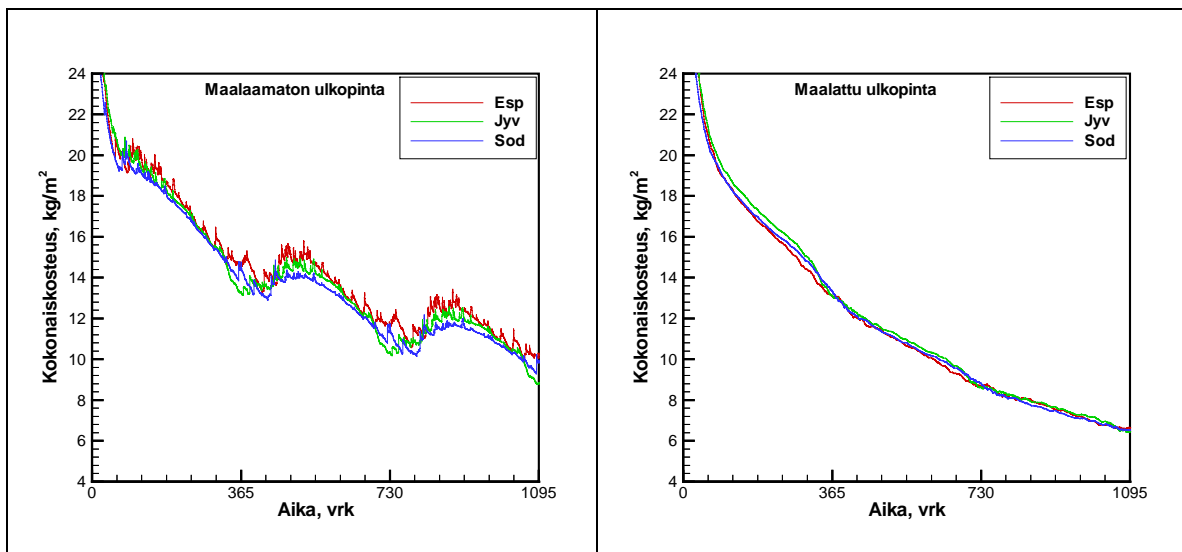
Rakenteen kosteuspitoisuuden jakaumat eri ajanhetkillä esitetään kuvassa 11.



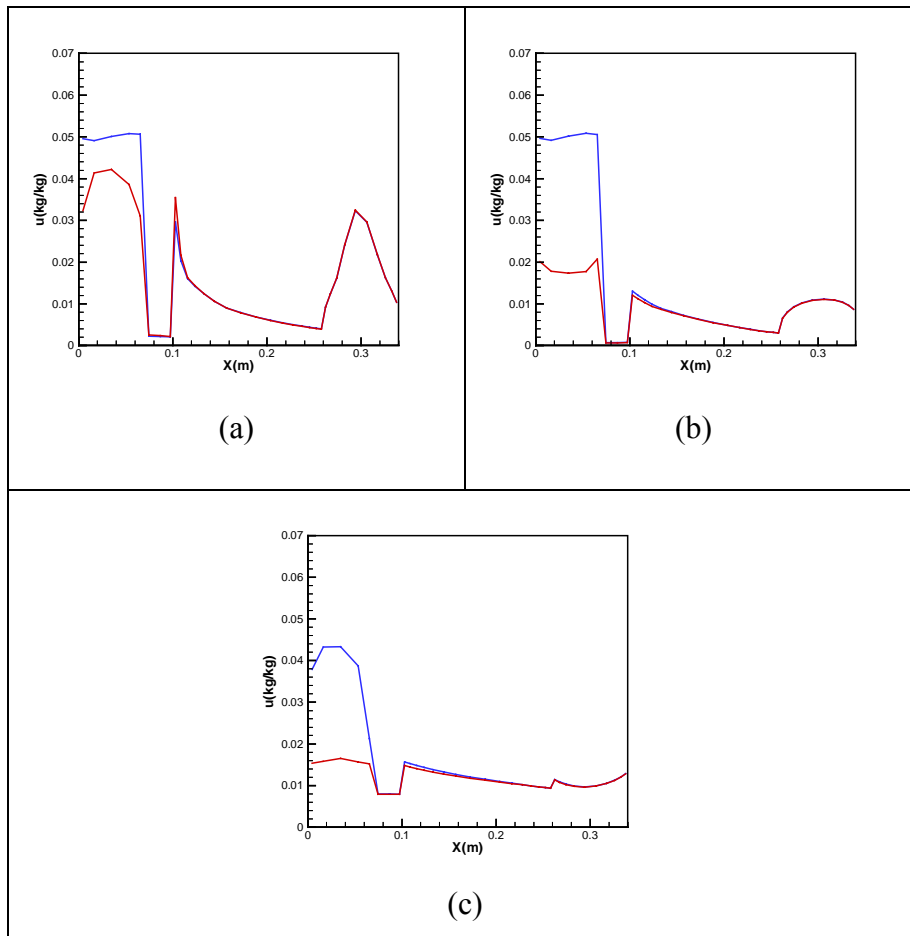
Kuva 11. Kosteuspitoisuusjakaumat eri ajanhetkinä tuuletetulle bsw-rakenteelle. Sininen käyrä on maalaamattoman rakenteen jakauma ja punainen vastaavasti maalatulle rakenteelle. Ulkopinta: $x=0$. (a) Kosteuspitoisuusjakauma 26 viikon kuluttua (keskitalvi) laskennan alkamisesta. (70/30/160/80 – kerrospaksuudet). (b) Kosteuspitoisuusjakauma 130 viikon kuluttua (keskitalvi) laskennan alkamisesta. (c) Kosteuspitoisuusjakauma 156 viikon (3 v) kuluttua (keskikesä) laskennan alkamisesta.

5.2 Elementtikuoren paksuuden merkitys rakenteiden kuivumiselle

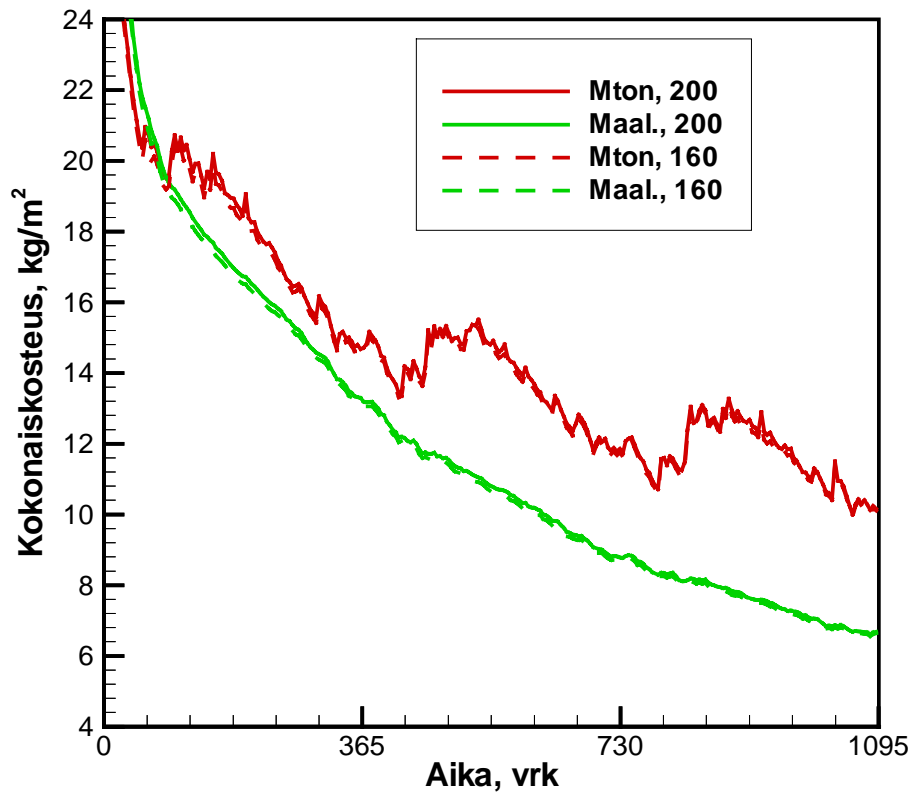
Rakenteiden kuivuminen laskettiin paksummalle 150 mm:n sisäpuoliselle betonikerrokselle (Sää: Espoo, Jyväskylä, Sodankylä). Lisäksi tälle rakenteelle tarkasteltiin eristepaksuuden kasvattamisen merkitystä kuivumiseen Espoon sääolosuhteissa (mineraalivilla 160 mm → 200 mm).



Kuva 12. Vasemmalla ulkopinnaltaan maalaamattoman BSW-rakenteen kokonaiskosteus kolmen vuoden kuluttua alkutilanteesta 98 %-rh. Ilmastot Espoo, Jyväskylä ja Sodankylä. (70/30/160/150 – kerrospaksuudet). Laskennan alkuhetki 1. heinäkuuta. Oikealla ulkopinnaltaan maalatun (ei viistosateen imeytymistä, maalin vesihöyrynläpäisyys $300 \text{ ng/m}^2 \text{ sPa}$) BSW-rakenteen kokonaiskosteus kolmen vuoden kuluttua alkutilanteesta 98 %-rh.



Kuva 13. Tuuletetun maalatun bsw-elementin kosteuspitoisuusjakaumat eri ajanhetkinä. Ulkopinta: $x = 0$. (a) Kosteuspitoisuusjakauma 26 viikon kuluttua (keskitalvi) laskennan alkamisesta. Sininen käyrä on maalaamattoman rakenteen jakauma ja punainen vastaavasti maalatulle rakenteelle. (70/30/160/150 – kerrospaksuudet). (b) Kosteuspitoisuusjakauma 130 viikon kuluttua (keskitalvi) laskennan alkamisesta. (c) Kosteuspitoisuusjakauma 156 viikon (kolmen vuoden) kuluttua (keskikesä) laskennan alkamisesta.



Kuva 14. Eristepaksuuden merkitys rakenteen kuivumiselle: maalaamaton (Mton) ja maalattu (Maal.) betonipinta 160 tai 200 mm:n eristekerroksella. Laskennan alkuhetki 1. heinäkuuta.

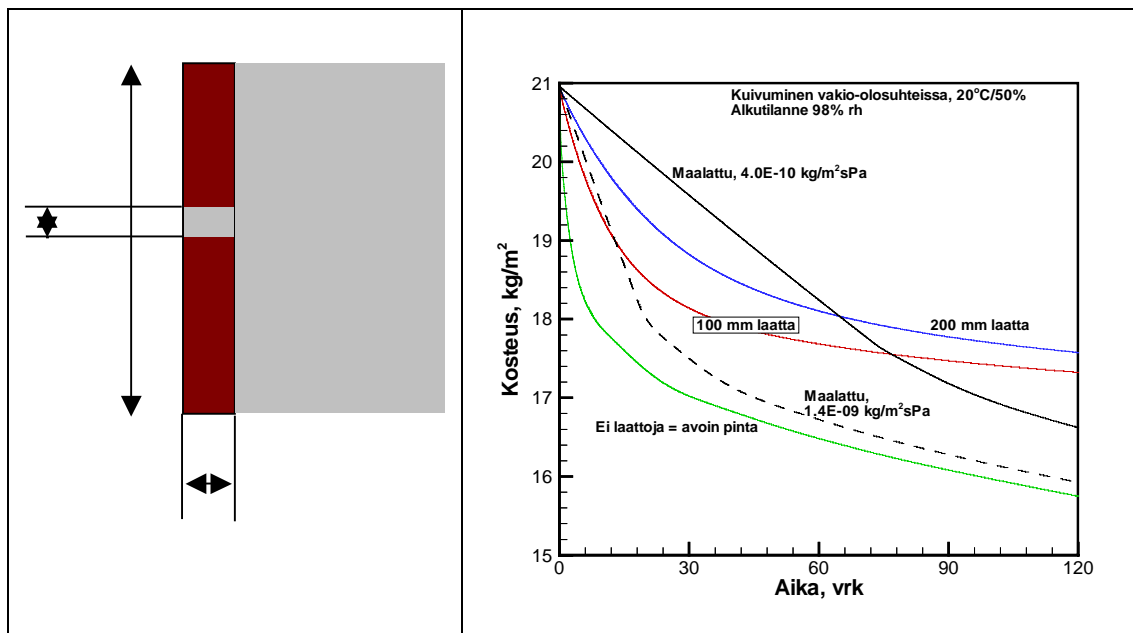
6. Ulkopinnan merkitys rakenteen kuivumiseen – maalaamaton, maalattu tai klinkkeripintainen BSW-elementti

Maalaamaton ulkopinta voi ottaa kapillaarisesti vastaan viistosateesta tulevaa kosteutta, mikä lisää rakenteen kosteuskuormitusta. Toisaalta maalaamaton pinta kuivuu kuivilla keleillä hieman nopeammin. Maalipinta ei kuitenkaan ole merkittävä tekijä rakenteen kuivumiselle, koska betonin itsensä aiheuttama diffuusiovastus on varsin huomattava. Lämpäisevä maali vastaa n. 1–2 mm betonin paksuutta ja huonommin läpäisevä betoni-maali n. 10–15 mm betonin vesihöyrynläpäisevyyttä. Maalipinnan suojaava vaikutus viistosateelta on merkittävämpi tekijä, kuin sen aiheuttama hidastus kuivumiselle. Erot maalatun ja maalaamattoman rakenteen kuivumisnopeudessa ilmenevät lähinnä kuivumisen alkuaikoina, jolloin rakenteen uloin pinta kuivuu. Kun kuivuminen tapahtuu syvemmältä rakenteesta, alkaa betonin diffuusio-ominaisuus hallita tilannetta.

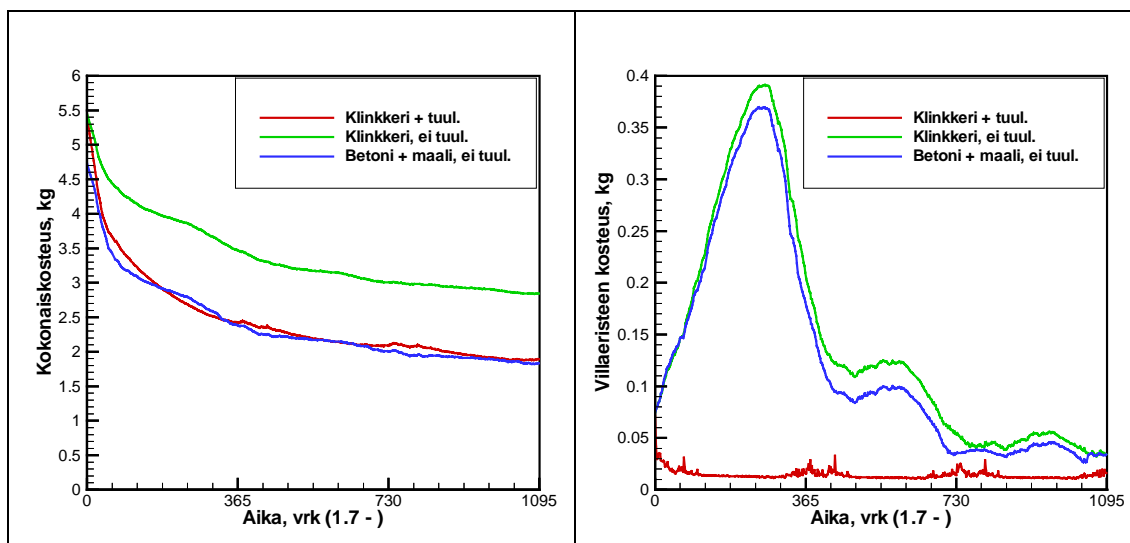
Klinkkerilaattojen vesihöyrynvastusominaisuus μ on saksalaisen DIN-normin viitearvojen mukaan n. 50–100, kun se vastaavassa luettelossa on betonille 70–150. Tämä tarkoittaa sitä, että klinkkerilaatta voi olla vesihöyrynläpäisevyydeltään jopa hieman betonia parempi. Toisaalta joillekin klinkkerilaatoille on joissain viitteissä annettu vesihöyrynvastukselle arvoja 300–400, mutta tämä voi mahdollisesti johtua myös laatan pinnasta (esim. lasitus tai vastaava tiiviimpi pinta). Klinkkerit on valmistettu korkeassa lämpötilassa, mistä on yleensä seurauksena alentunut kapillaarinen kosteudenjohtavuus. Klinkkeri imee itseensä heikosti nestemäistä vettä, mutta edellä olevien vesihöyrynvastusten perusteella se pystyy kuitenkin läpäisemään kosteutta vesihöyrynä eli sallii rakenteen kuivumisen. Kuivumiskyky voi heikentyä suhteessa betoniin siinä tapauksessa, että käytetään klinkkerityyppiä, jossa on tiivis ulkopinta.

Klinkkeripinnan käyttäytyminen asettuu näiden kahden rakenteen välimaastoon – toisaalta laattojen välit kykenevät vastaanottamaan viistosadetta, mutta vastaavasti pinnan keskimääräinen vesihöyrynläpäisykyky on rajoittunut laatan ja välisaumojen välisessä suhteessa. Jos saumojen osuus kokonaispinta-alasta on esim. 10 %, voidaan karkeasti olettaa pinnan vesihöyrynläpäisevyyden olevan 1/10 maalaamattomasta pinnasta. Tämä vastaa koko pinnalle tasaisesti jaettuna läpäisevyyttä, joka on vielä maalipinnan läpäisevyyttä suurempi, mikäli laattojen saumat ovat maalaamattomat. Verrattuna maalattuun pintaan klinkkeripinta pystyy imemään jonkin verran kosteutta sisäänsä saumojen kautta. Maalaamattoman, maalatun ja klinkkeripinnan kosteuspitoisuudet ajan funktiona, kun kuivuminen tapahtuu vakio-olosuhteissa, esitetään kuvassa 15. Klinkkeripintaisen elementin kuivuminen on jota kuinkin samaa luokkaa kuivumisen alkuvaiheessa betonin pintakerrosten kuivuessa. Kuivumisen jatkuessa kuivuvan kosteuden tulee tunkeutua syvemmältä betonikuoresta kuivumisen sallivaan kapeaan saumaan, jolloin diffuusioon

tarvittava matka kasvaa ja kuivuminen hidastuu verrattuna tasaisesti maalattuun (tai pinnaltaan maalaamattomaan) rakenteeseen. Muutos kuivumisnopeudessa tapahtuu silloin, kun betonin kosteuspitoisuus laskee tasolle, jolla kapillaarinen kosteudenjohtuminen heikkenee merkittävästi. Huukoissa materiaaleissa kapillaarinen kosteudenjohtuminen tapahtuu yleensä hygroskooppisen tasapainokosteuden ylittävillä kosteuksilla (>98 % rh). Eri betonilaaduille on esitetty kapillaarisia kosteudenjohtavuuksia tätä alhaisemmilla kosteuksilla. Tässä laskelmassa oletettiin kapillaarisen kosteuden alueeksi >95 % rh.



Kuva 15. Klinkkeripintaisen betonielementin rakennekuva. Klinkkerien välisen sauman kautta kosteutta voi päästä rakenteeseen viistosateen vaikutuksesta. Mikäli laatan pinta on vettä valuttava ja laatta itsessään ei ime viistosadetta, saa laatan sauma moninkertaisen viistosadekuormituksen. Oikealla klinkkeripintaisen betonisandwich-elementin kuivumisnopeustarkastelu vakio-olosuhteissa 4 kuukauden aikana. Käyrien kohdalla on mainittu ulkopinnan maalin läpäisevyysarvot ja laattakoko.



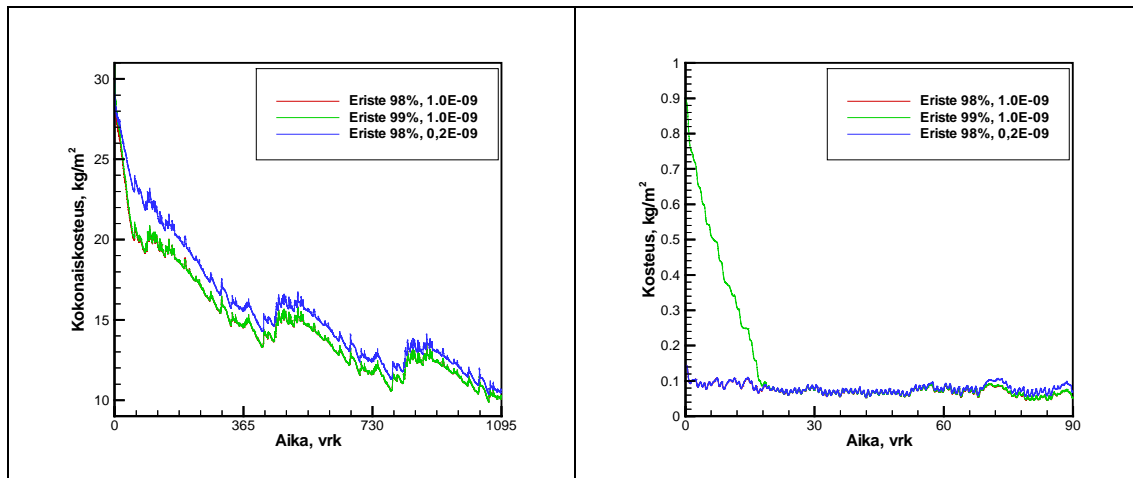
Kuva 16. Klinkkeripintaisen ja maalatun betonipinnan kuivuminen Espoon sääolosuhteissa. 20 cm x 20 cm suuruisen laattapinnan kuivuminen tuuletettuna ($v = 0,2$ m/s 30 mm tuuletusraossa) tai tuulettamattomana verrattuna maalatun (Kivisil) tuulettamattoman seinän kuivumiseen. Vasemmalla rakenteen kokonaiskosteus (0,2 m korkea rakenteen osa) ja oikealla eristetilän kosteuspitoisuus. Tuuletuksella voidaan selvästi vaikuttaa eristetilän kosteuteen: kokonaiskosteus maalatussa ja tuulettamattomassa rakenteessa on likipitään sama kuin tuuletetussa klinkkerirakenteessa, mutta eristetila on näistä kahdesta kuivempi tuuletetussa klinkkerirakenteessa.

6.1 Märän eristyksen kuivuminen sekä sisäpinnan vesihöyrynläpäisevyyden merkitys rakenteen kuivumiselle

Betonin kuivuminen on hidasta, mikä johtuu betonin matalasta diffuusiokertoimesta. Eristetilän kastumisen jälkeistä kuivumista tarkasteltiin asettamalla eristetilään betonia suurempi kosteus.

Kaksi erillistä lisätapausta:

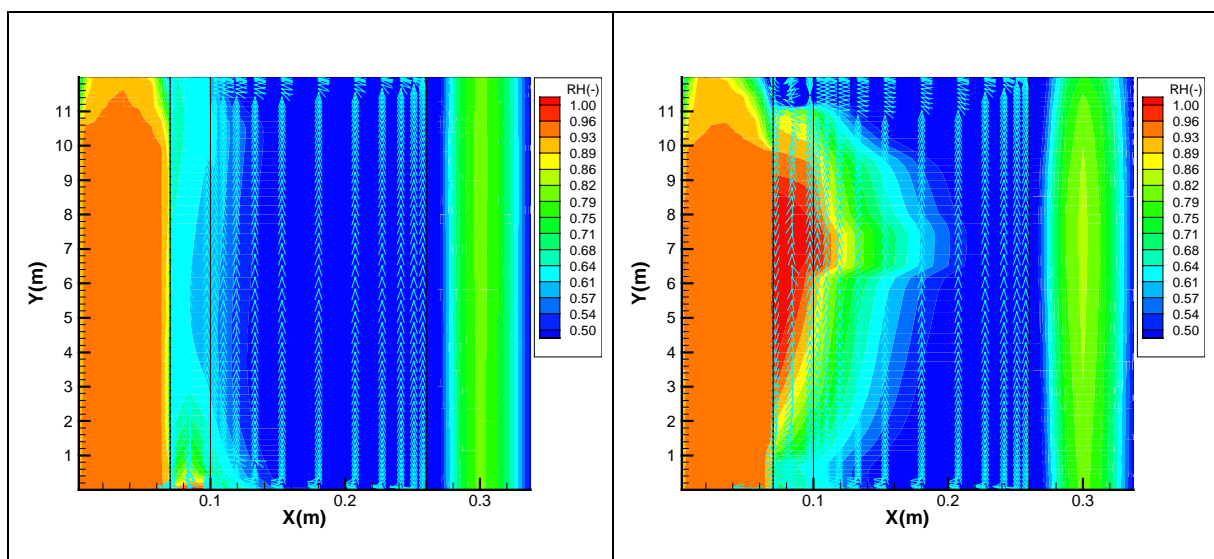
- Rakenteen alkukosteus oli muutoin 98 %-rh, mutta eristekerroksen alkukosteus oli n. 99 %, mikä vastasi n. $+1$ kg/m² kosteuslisää rakennepinta-alaa kohden verrattuna alkutilanteeseen 98 %-rh, sisäpinnan vesihöyrynläpäisykerroin 1.0E-09 kg/m²sPa.
- Rakenteen alkukosteus oli 98 %-rh, sisäpinnan vesihöyrynläpäisykerroin 0,2E-09 kg/m²sPa.



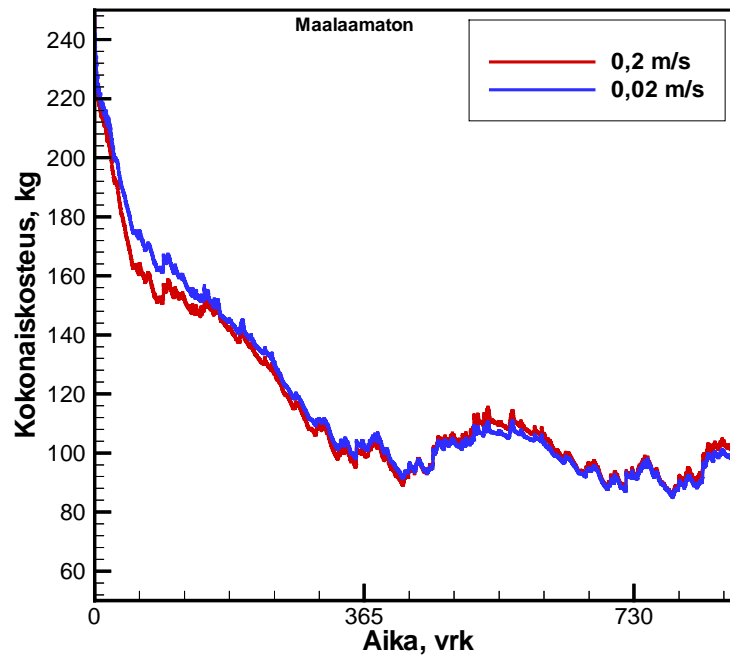
Kuva 17. Vasemmalla kokonaiskosteus eristetilan kastumistilanteen jälkeen. Laskennan alkuehki 1. heinäkuuta. Oikealla eristetilan kosteus 3 ensimmäisen kuukauden aikana. Eristetilasta poistuu kosteutta n. 1 kg/m^2 n. 3 viikon kuluessa, jonka jälkeen eristetilan eri kosteuksista kuivumaan lähteneet rakenteet jatkavat kuivumistaan samassa tahdissa. Rakenteen kuivuminen sisäpinnalta näkyy hidastuneena kuivumisena kokonaiskosteuksessa, kun sisäpinnan vesihöyrynläpäisykerroin on $1/5$ perustapauksesta ($0,2E-09 \text{ kg/m}^2\text{sPa}$ vs. $1,0E-09 \text{ kg/m}^2\text{sPa}$).

7. Nelikerroksisen rakennuksen tuuletuksen toimivuus ja kuivuminen

Monikerroksisissa rakennuksissa betonielementtiseinän tuuletuksen toimivuus riippuu tuuletusvälin tai -uran ulkoilmaan yhteydessä olevien aukkojen sijainnista ja yksittäisen tuuletusvälin pituudesta. Kuvassa 18 esitetään laskennallisesti arvioidut suhteelliset kosteudet 4-kerroksisessa seinässä, kun seinän tuuletus on yksinomaan ala- ja yläosassa olevien tuuletusaukkojen varassa.



Kuva 18. Vasemmalla tuuletusvälin ilmavirtaus 0,2 m/s, oikealla 0,02 m/s. Oikea puoli vastaa tuuletusvirtaamaltaan paremmin suuruusluokkana putkien kautta tuuletettua julkisivua. Ajankohta 40 viikkoa laskennan alusta (Laskennan alku heinäkuun 1.). Tuuletusväli on auki vain seinän ala- ja yläosasta.



Kuva 19. 4-kerroksisen seinän kokonaiskosteus ajan funktiona kahdella eri ilmavirralla 0,2 m/s ja 0,02 m/s. 0,2 m/s 30 mm tuuletusraossa vastaa $1,8 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ seinäpinta-alaa kohden (0,02 m/s = $0,18 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$). Laskennan alkuhetki 1. heinäkuuta.

7.1 Tuuletusurallisen 12 m korkean rakenteen ilmavirrat

Tarkastellaan tuuletusurallista rakennetta, jossa on tuuletusurat ovat 20 cm:n välein ja vaakaurat joka kerrosvälissä. Vaakauriin tulee ilma tuuletusputkien kautta. Tuuletusputkia on 1,5 m:n välein.

Oletetaan, että tuuletusputkesta kulkee ilmavirta nopeudella 0,5 m/s. Putken sisähalkaisija on 20 mm. Poikkipinta-ala putkelle on $0,000314 \text{ m}^2$. Tämä virtausala jakautuu 1,5 m:n alueelle. Tuuletusuria on tällä seinäleveydellä n. 7 kpl, ja jokaisen uran poikkipinta-ala on $20 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} = 0,0006 \text{ m}^2$. Tällöin putkesta tulevan ilman virtausnopeus muuttuu urassa keskimäärin nopeudeksi 0,037 m/s (n. 1/13). Kanavistossa olevat virtausvastukset muodostuvat enimmäkseen osin kertavastuksista sisään- ja ulosvirtauksissa ja mutkissa. Tuuletusputken kohdalla oleva vaakaura jakaa virtauksen suhteellisen tasaisesti rakenteen leveydelle. Toisaalta tällaisessä tilanteessa on mahdollista myös se, että vaakauran kautta kulkee oikosulkuvirtaus putkesta putkeen vaakatasossa. Oletetaan lisäksi, että tuuletusilmavirran suunta on kaikissa tuuletusurissa rakenteessa ylöspäin. Tällöin ilmavirran nopeus tuuletusurassa kasvaa rakenteessa ylöspäin mentäessä ja rakenteen ylimmässä kerroksessa ilmavirran nopeus on $4 \times 0,037 \text{ m/s} \approx 0,15 \text{ m/s}$. Tämä

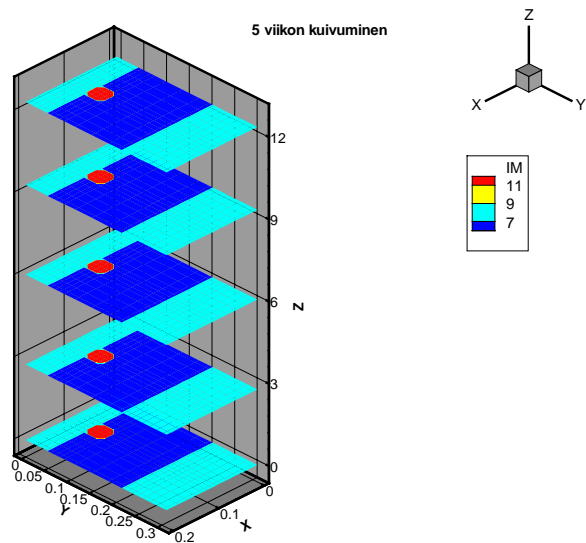
vastaa suuruudeltaan lähes sitä ilmavirtaa, mikä virtasi edellisessä esimerkissä koko seinän matkalla. Ylimpään kerrokseen virtaava ilma on sekoitus alemmista kerroksista tullutta kostunutta ilmaa, johon on sekoittunut kuivaa ulkoilmaa.

7.2 Tuuleturallisen 12 m korkean seinärakenteen kuivuminen

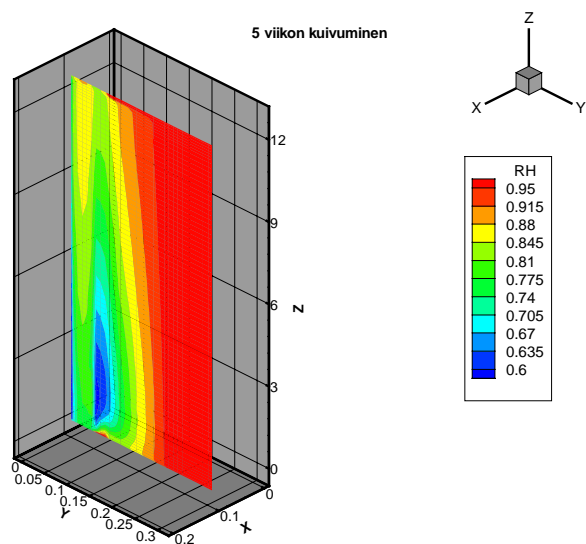
12 m korkean tuuleturallisen rakenteen kuivumista tarkasteltiin ilmavirralla 0,2 m/s tuuleturassa. Laskennan alkuhetki oli elokuun 1. Ulkoilman olosuhteina oli Espoon sää tiedosto vuodelta 1995.

Tarkasteltaessa suhteellista kosteutta tuuletururan kohdalta otetussa poikkileikkauksessa (kuvat 20–23) voidaan todeta, että kuivuminen on tehokasta alimman kerroskorkeuden kohdalla mutta kuivumistehokkuus heikkenee tästä ylöspäin tuulettavan ilman kostuessa tuuletururan varrella. Ilma tuuleturassa lämpenee tehokkaasti saavuttaen jo lyhyellä n. 1 m:n matkalla ympäröivän eristetilan ja betonin pinnan lämpötilan (kuva 24).

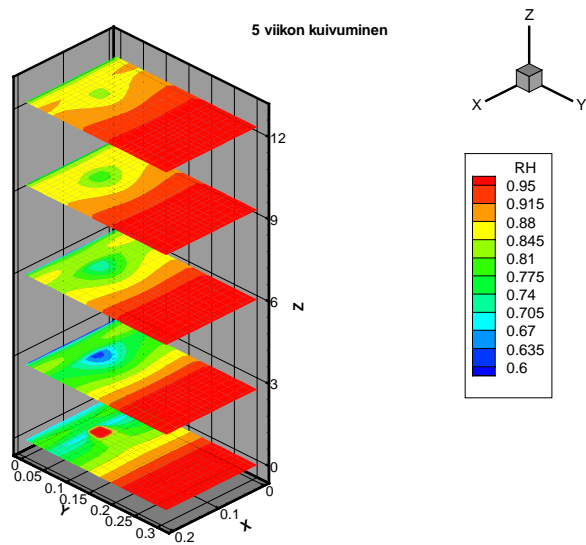
Kuvasta 21 nähdään, kuinka suhteellinen kosteus on seinärakenteen yläosassa uloim-massa betonikerroksessa edelleen n. 95 %, kun aivan alin osa on kuivunut jo 80–85 %:iin.



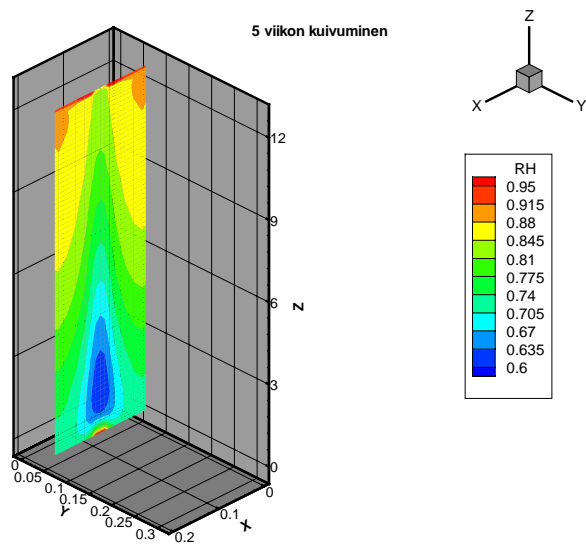
Kuva 20. Tuuletusurallinen 12 m korkea seinä, jonka tuuletusraot ovat auki vain seinän ala- ja yläosasta. Materiaalikerrokset: vaaleansininen = betoni, sininen = villaeriste, punainen = ilma. Tuuletusurien väli 210 mm, ura 20 mm x 30 mm. Tuuletusvirtaus 0,2 m/s tuuletusurassa. Rakenteen sisäpinta on kuvan X-akselilla ($y = 0,34$) ja ulkopinta $y=0$. Laskennan alkuhetki elokuun 1.



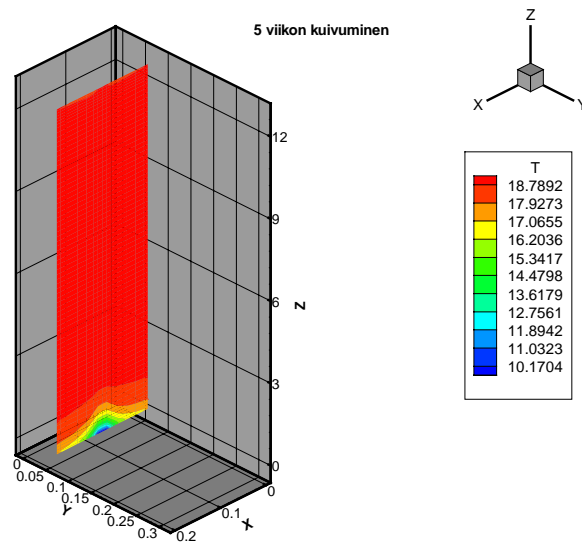
Kuva 21. Suhteellinen kosteus 5 viikon kuivumisen jälkeen seinän poikkileikkauksessa tuuletusuran kohdalta.



Kuva 22. Rakenteen suhteelliset kosteudet 5 viikon kuluttua eri kerroskorkeuksilla 3 m:n välein.



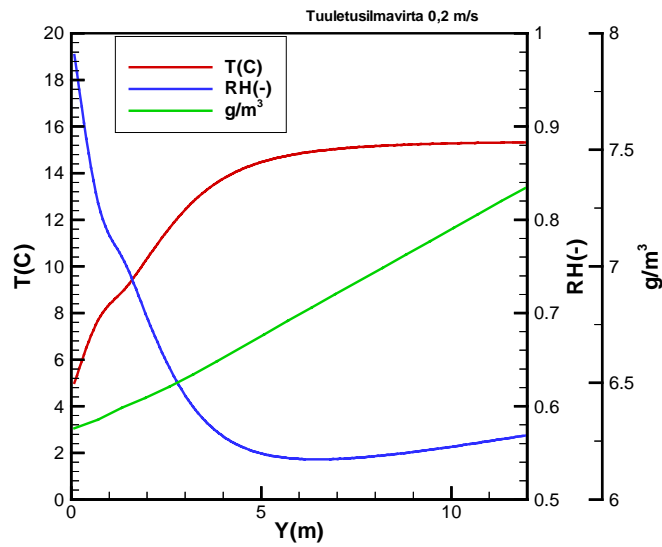
Kuva 23. Rakenteen suhteelliset kosteudet 5 viikon kuluttua tuuletusuran leveyssuuntaisessa poikkileikkauksessa.



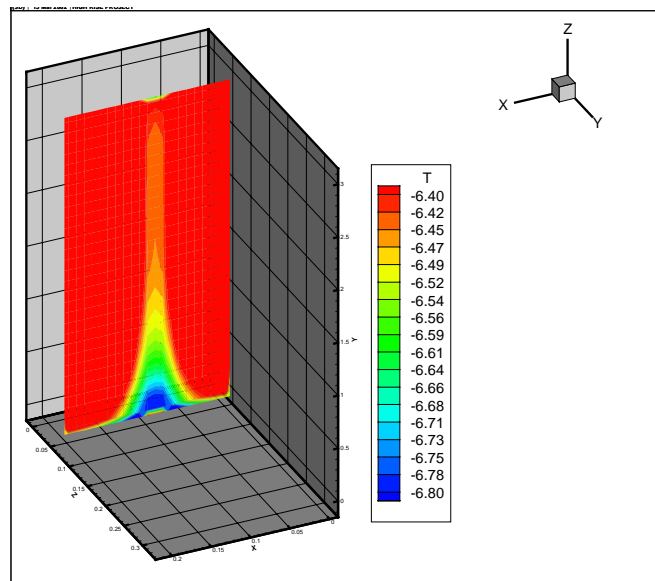
Kuva 24. Rakenteen lämpötilat tuuletusuran leveysuuntaisessa poikkileikkauksessa 5 viikon kuluttua laskennan alkamisesta.

7.2.1 Tuuletusuran tai -välin ilmavirran lämpeneminen ja kosteuspitoisuuden muutos

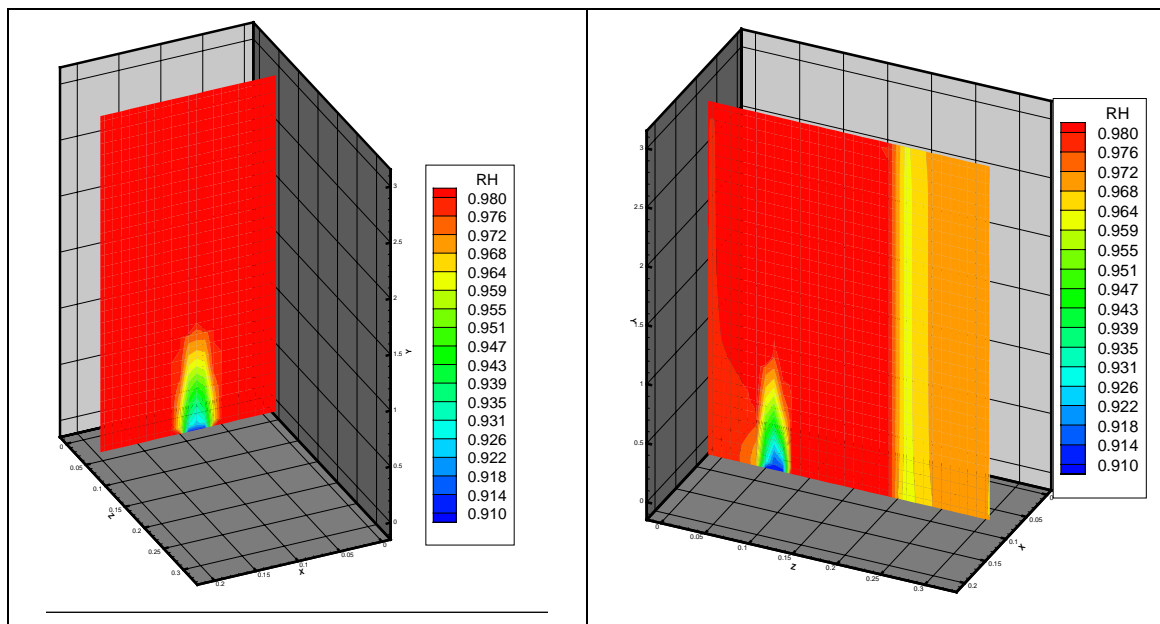
Tuuletusilmavirran lämpeneminen ja kostuminen betonisandwich-elementin tuuletusraossa tai -välissä riippuvat hetkellisistä ulkoilman (tuuletusilma) lämpötiloista, aurin-
gon säteilytehosta ja näiden useiden tuntien takaisesta historiasta, koska massiivisen
betoniulkokuoren lämpötilavaihtelut ovat hitaita.



Kuva 25. Tuuletusilmavirran lämpeneminen ja kostuminen tuuletusvälissä (12 m korkea rakenne). Tilanne lokakuun alussa. Tuuletusvirtaama 0,2 m/s 30 mm:n tuuletusvälissä.



Kuva 26. Tuuletusurassa virtaavan ilman lämpötila. Tasa-arvokäyrä tuuletusuran kohdalla otetussa leikkauksessa. Ilman lämpeneminen rakenteen lämpötilaan on havaittavissa. Lämpeneminen tapahtuu hitaammin kuin kostuminen rakenteen kostuteen (ks. seuraava kuva).

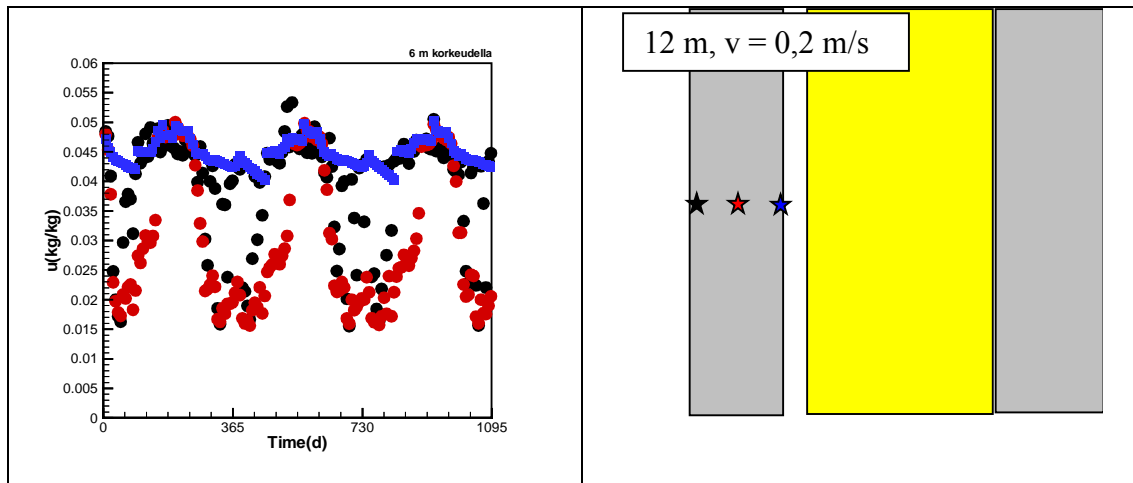


Kuva 27. Suhteellisen kosteuden tasa-arvokäyrät kahdesta eri suunnasta otetussa leikkauksessa rakenteen tuuletusuran kohdalta (vasemmalla eristeen leveys suunnassa, oikealla rakenteen syvyys suunnassa). Tuuletusurassa on havaittavissa virtaavan ilman kyllästyminen rakenteen kosteuteen.

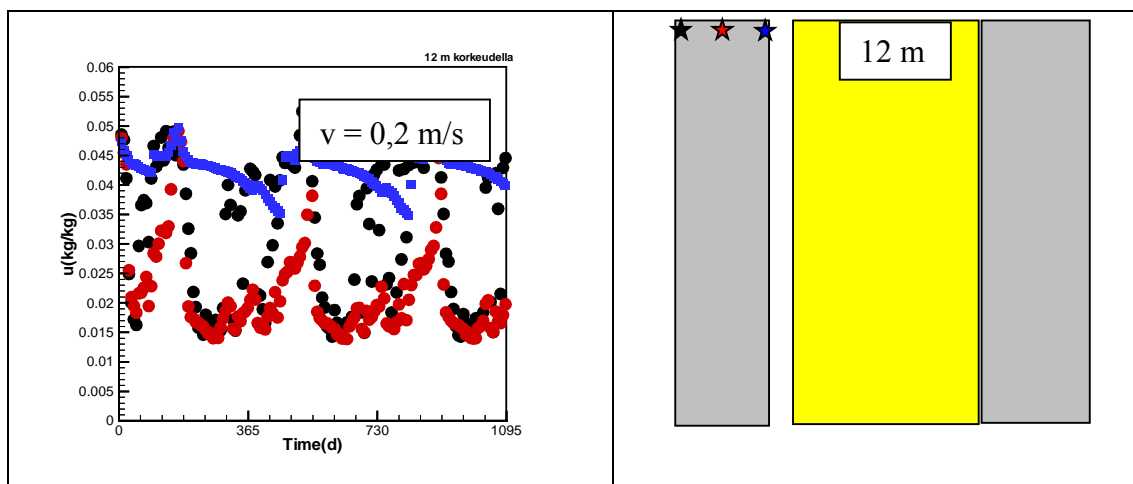
7.3 Betoniulkokuoren lämpötilat ja kosteudet ajan funktiona 12 m korkeassa seinärakenteessa

Seuraavassa analysoidaan neljän kerroksen korkuista seinärakennetta ja sen tuulettamisen vaikutuksia rakenteen uloimman ja sisimmän betonikuoren kosteuksiin. Laskenta tehtiin kahdella eri tuuletusvirtaamalla (0,2 m/s ja 0,02 m/s). Korkean seinärakenteen tarkastelulla voidaan saada selville pisin matka, jonka tuuletusilma saa enintään kulkea seinärakenteessa, jotta kuivuminen on paikallisesti rakenteessa vielä mahdollista.

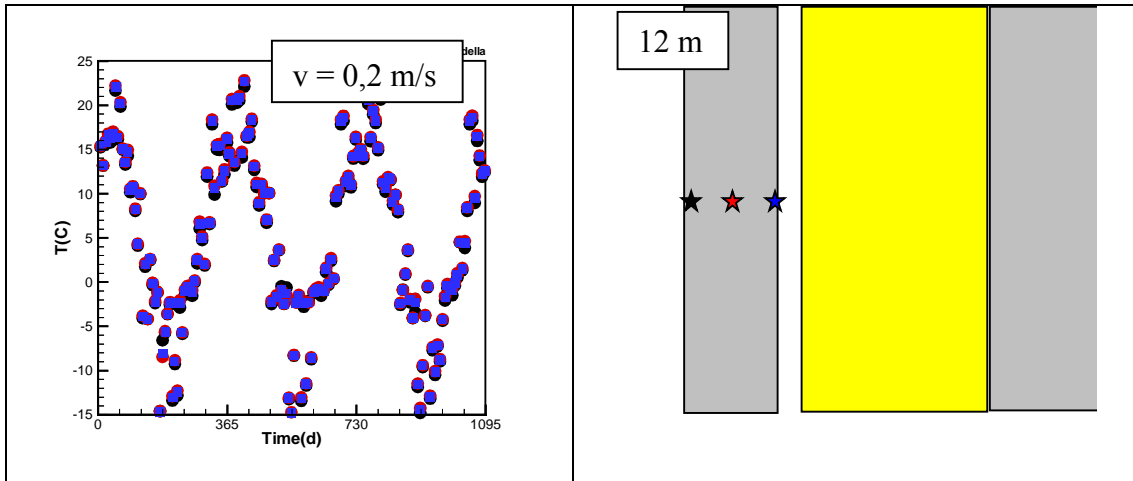
Rakenne oli ulkoapäin lukien: 70 mm betonia, 30 mm tuuletusväli, 160 mm mineraalivilla, 80 mm betoni. Rakenne oli maalaamaton.



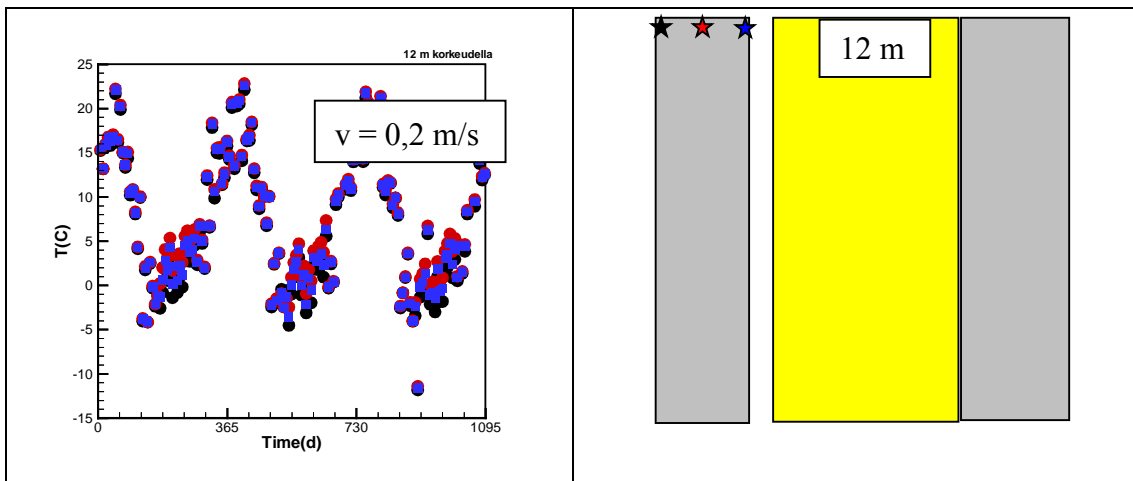
Kuva 28. Ulomman betonikuoren kosteus eri syvyyksillä ajan funktiona 6 m:n korkeudella. Laskennan alkuhetki 1. heinäkuuta. Musta = ulkopinta, Punainen = keskikohta, Sininen = sisäpuoli.



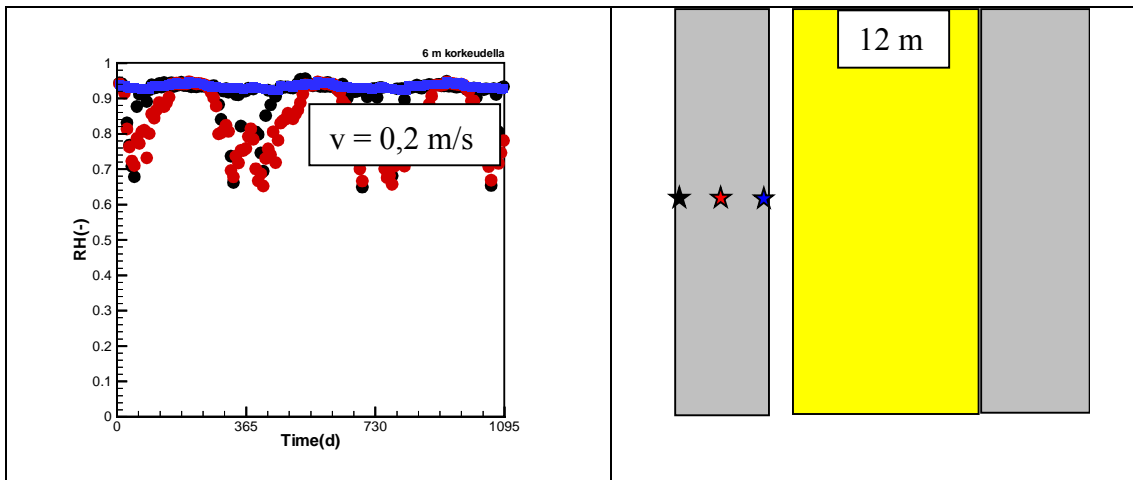
Kuva 29. Ulomman betonikuoren kosteus eri syvyyksillä ajan funktiona 12 m:n korkeudella. Laskennan alkuhetki 1. heinäkuuta. Musta = ulkopinta, Punainen = keskikohta, Sininen = sisäpuoli.



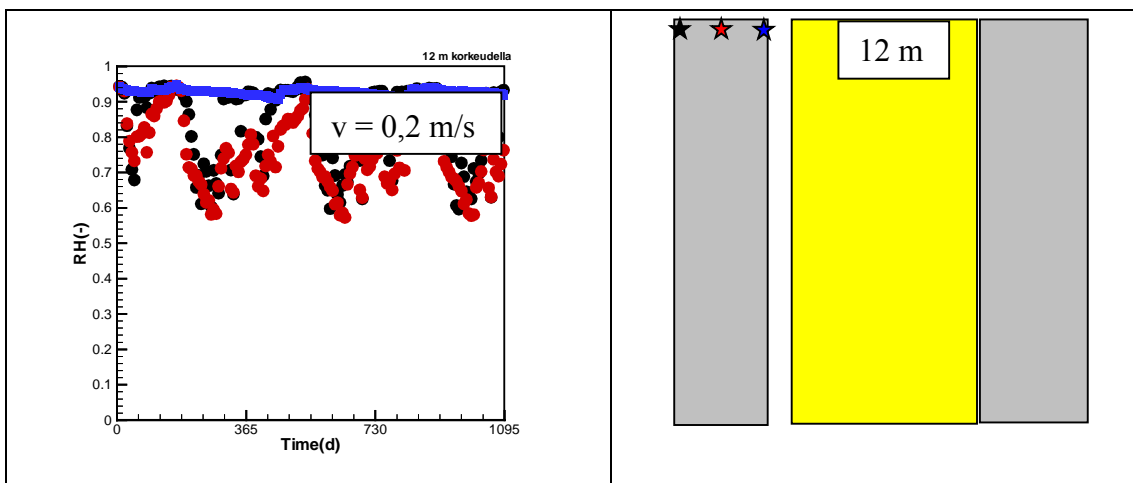
Kuva 30. Ulomman betonikuoren lämpötila eri syvyyksillä ajan funktiona. Laskennan alkuhetki 1. heinäkuuta. Musta = ulkopinta, Punainen = keskikohta, Sininen = sisäpuoli.



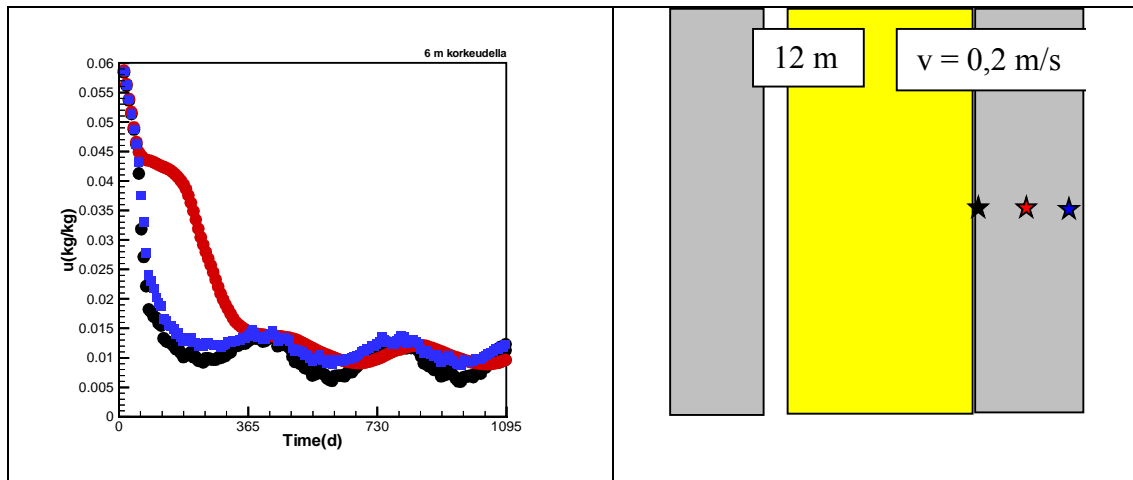
Kuva 31. Ulomman betonikuoren lämpötila eri syvyyksillä ajan funktiona. Laskennan alkuhetki 1. heinäkuuta. Musta = ulkopinta, Punainen = keskikohta, Sininen = sisäpuoli.



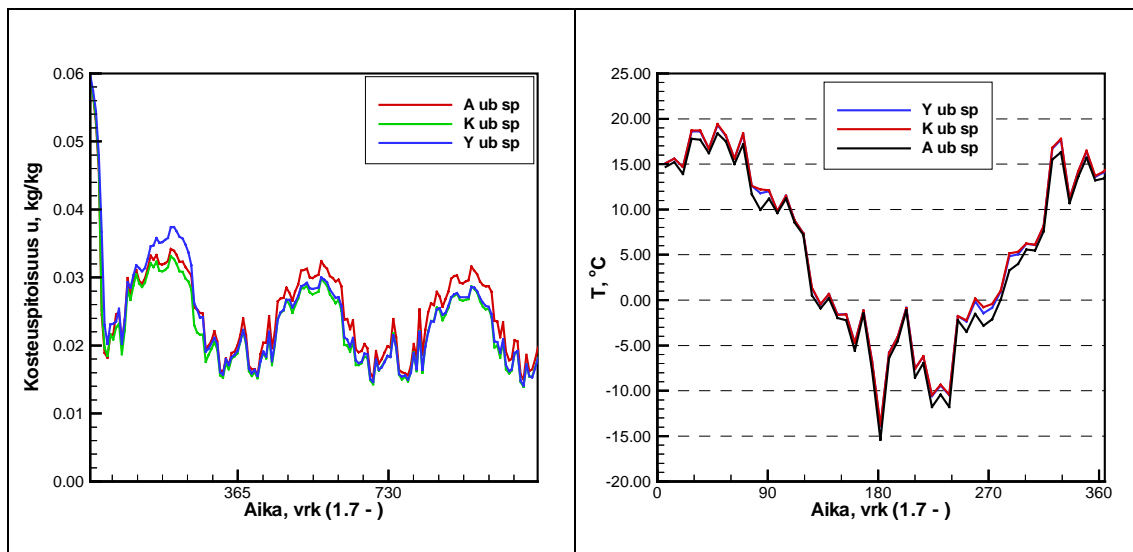
Kuva 32. Ulomman betonikuoren suhteellinen kosteus eri syvyyksillä ajan funktiona 6 m:n korkeudella. Laskennan alkuhetki 1. heinäkuuta. Musta = ulkopinta, Punainen = keskikohta, Sininen = sisäpuoli.



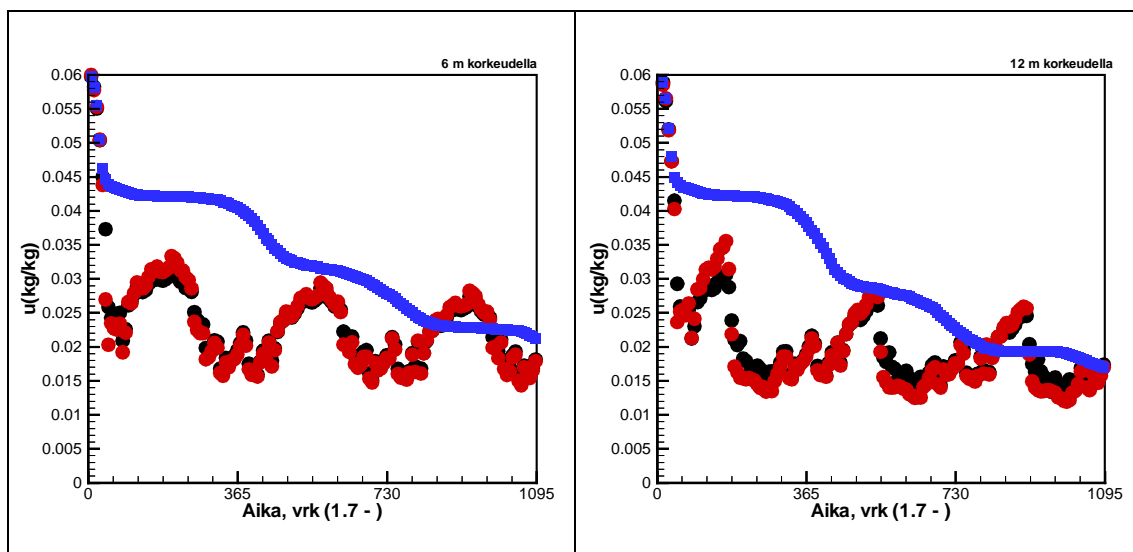
Kuva 33. Ulomman betonikuoren suhteellinen kosteus eri syvyyksillä ajan funktiona 12 m:n korkeudella. Laskennan alkuhetki 1. heinäkuuta. Musta = ulkopinta, Punainen = keskikohta, Sininen = sisäpuoli.



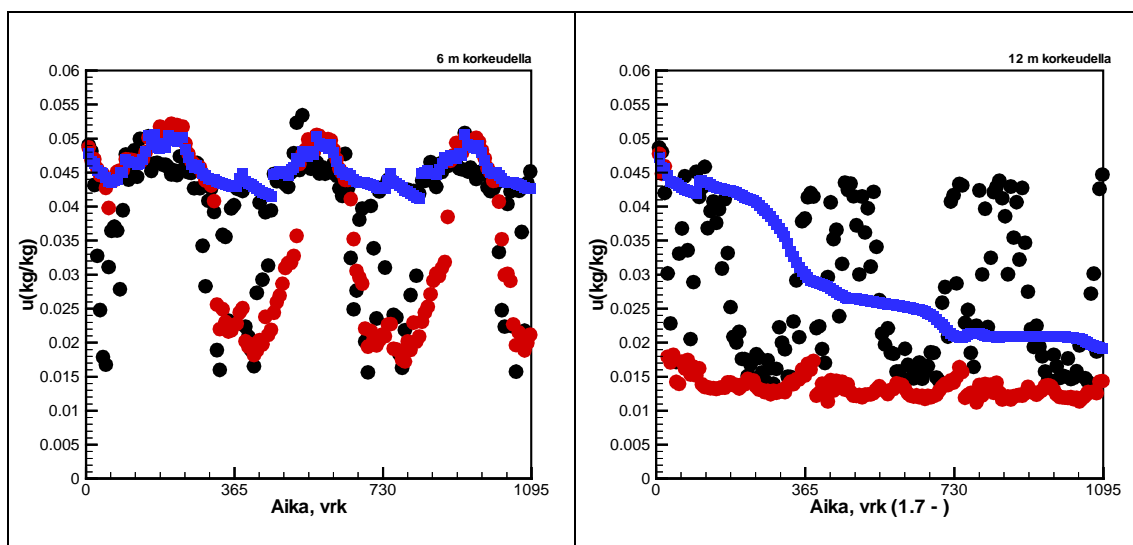
Kuva 34. Sisemmän betonikuoren ulkopinnan (musta), keskisyvyyden (punainen) ja sisäpinnan (sininen) kosteuspuitoisuudet ajan funktiona. Laskennan alkuhetki 1. heinäkuuta.



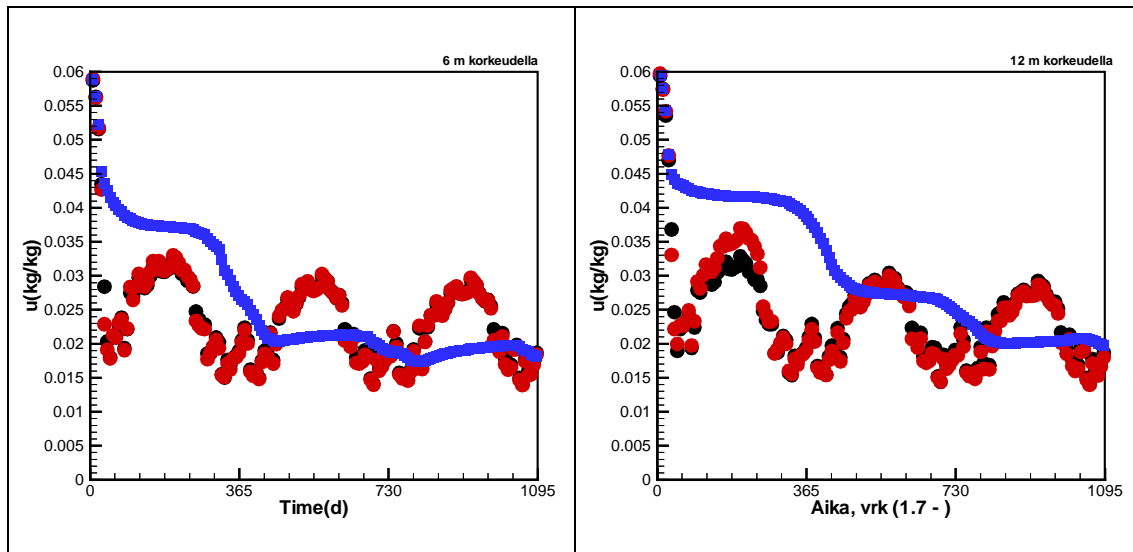
Kuva 35. Maalattun 12 m korkean vain ala- ja yläosastaan tuuletetun elementin kosteuspuitoisuudet (vasemmalla) ja lämpötilat (oikealla) ajan funktiona korkeuksilla 0, 6 ja 1 m ulomman betonielementin sisäpintakerroksessa. Ensimmäisen vuoden kuivumisen aikana yläosa on muita kosteampi, mutta jatkossa alaosa on kostein johtuen tuuletuksen tuloilma-aukkoa viilentävästä vaikutuksesta. Tuuletusilman suunta oli aina alhaalta ylöspäin ($v = 0,2 \text{ m/s}$, tuuletusväli 30 mm).



Kuva 36. Ulomman betonikuoren ulkopinnan (musta), keskisyvyyden (punainen) ja sisäpinnan (sininen) kosteuspitoisuudet ajan funktiona maalatulle 12 m korkealle seinälle. Vasemmalla kosteus seinäkorkeudella 6 m ja oikealla 12 m:ssä. Laskennan alkuhetki 1. heinäkuuta. Tuuletus vain alhaalta ja ylhäältä, $v = 0,2 \text{ m/s}$, tuuletusväli 30 mm.



Kuva 37. Ulomman betonikuoren ulkopinnan (musta), keskisyvyyden (punainen) ja sisäpinnan (sininen) kosteuspitoisuudet ajan funktiona maalatulle 12 m korkealle seinälle. Vasemmalla kosteus seinäkorkeudella 6 m ja oikealla 12 m:ssä. Laskennan alkuhetki 1. heinäkuuta. Tuuletus tapahtuu vain alhaalta ja ylhäältä, $v = 0,02 \text{ m/s}$, tuuletusväli 30 mm. Heikon tuuletusilmavirran johdosta laskennassa tapahtuu tuuletusvälissä ilmavirran pyörteilyä, minkä johdosta rakenteen yläosassa tapahtuu paikallisesti tuulettumista ulkoilman ja tuuletusvälin välillä. Tämä parantaa rakenteen yläosan kosteuden kuivumista. Tuuletusilmavirta $0,02 \text{ m/s}$ on riittämätön rakenteen tehokkaaseen kuivumiseen, ja suuria paikallisia eroja esiintyy rakenteen eri korkeuksilla.



Kuva 38. Rakenteen tuulettuminen joka kerrosvälistä siten, että ilmavirran suunta on aina ylöspäin ja seinän yläosasta poistuva ilmavirta on 0,2 m/s 30 mm:n tuuletusvälistä. Vasemmalla ulomman betonikerroksen ulkopinnan (musta), keskiyvytyden (punainen) ja sisäpinnan (sininen) kosteuspuitoisuudet kerroskorkeudella 6 m ja oikealla seinän yläosassa 12 m:n korkeudella. Seinän kuivuminen on hieman tehokkaampaa tuulettaessa joka kerrosvälistä kuin pelkästään alhaalta ja ylhäältä (vertaa kuva 34).

8. Yhteenveto

Rakennusten kosteusongelmat johtuvat suureksi osaksi rakennuksen suunnittelu- ja toteutusprosessin huonosta hallinnasta. Vaikka periaatteelliset tekniset ratkaisut kosteusongelmien välttämiseksi olisivatkin tiedossa, toistuvia ongelmia syntyy erityisesti detailratkaisujen toimivuudessa.

Ulkovaipan rakenteet voivat kastua työmaalla huolellisesta suojauksesta huolimatta. Rakenteet tulee suunnitella siten, että niiden kuivuminen on mahdollista. Huolellisesti suojatut lämmöneristysrakenteet ovat pääsääntöisesti kuivia ennen asentamista. Esimerkiksi betonisandwich-elementtien villaeristeiden kosteudet ovat tavallisesti alle 2 % kuivapainosta. Betonin valmistuskosteus ei kuivuessaan kerry eristysrakenteeseen.

Betonirakenteiden tuulettumista käsittelevässä tutkimuksessa selvitettiin laskennallisten analyysien avulla erilaisten betonirakenteiden toimivuutta. Tutkimusta täydennetään meneillään olevien kenttämittausten avulla. Tuuletettavien rakenteiden ominaisuuksia verrattiin perinteiseen tuulettumattomaan rakenteeseen. Eristyspaksuuden merkitystä tarkasteltiin lämmöneristeen tuulensuojauksen ja erityispaksuuden kasvattamisesta saatavan lämpöteknisen hyödyn kannalta. Tulosten perusteella arvioitiin rakenteiden käytettävyyttä eri ilmastoissa sekä julkisivupinnan ominaisuuksien merkitystä toimivuuden kannalta.

Suomen ilmastossa rakenteiden tai tarvikkeiden kastuminen työmaaolosuhteiden tai vähäistenkin virheiden johdosta on asianmukaisesta suojaamisesta huolimatta mahdollista. Ideaalisten, täysin virheettömien rakenteiden toteuttaminen taas ei ole mahdollista. Rakenteiden kuivumiskyvyn ja sen pitkäaikaisen toimivuuden varmistaminen ovat siksi tärkeitä. Uritetut villarakenteet ovat tehokas tapa kuivattaa rakentamisen jäljiltä kosteita kattorakenteita. Betonirakenteiden uritetuista lämmöneristeistä tehdyissä alustavissa tuulettuvuusmittauksissa ilmapirran nopeudet urissa olivat yleensä alle 0,1 m/s.

Tuuletettujen betonielementtien ulkokuoren kosteudet ovat olleet alhaisempia kuin tuulettumattomien. Alustavissa mittauksissa saatujen tulosten mukaan tuuletustavalla (uritettu lämmöneriste tai yhtenäinen tuuletusväli) ei ole vaikutusta kosteustasoon. Rakenteen tuulettuminen urarakenteen kautta edellyttää hyvää detailisuunnittelua, tuuletusratkaisun suhteuttamista tuuletettavaan pinta-alaan sekä huolellista toteutusta.

8.1 Rakenteiden kuivuminen

Betonirakenteiden erilaisten tuuletusratkaisujen toimivuuden kannalta on oleellista, että kostunut rakenne kuivuu. Tuuletus ei kuitenkaan saa merkittävästi heikentää rakenteen

lämpötekniistä toimivuutta. Tarkasteluissa tutkittiin sekä tuulettumattomia että urien ja tuuletusvälin avulla tuuletettuja elementtirakenteita.

Rakenteiden kuivuminen voi tapahtua rakenteen ulkopinnan kautta (pääasiassa uloin betonielementti), eristetilasta tuuletusilmavirran kautta tai rakenteen sisäpinnalta diffuusiolla. Betonin vesihöyrynläpäisykyky on huomattavasti pienempi kuin rakenteen muiden materiaalien. Betonielementtien kuivuminen riippuu merkittävästi elementtien ulkokuoren paksuudesta ja kuivumiskykyisistä pinnoista (tuuletettu tai ei tuuletettu). Maalipinnat saattavat hidastaa kuivumista vain, mikäli niiden vesihöyrynläpäisykerroin vastaa useata millimetriä betonia. Maalit edistävät kuivumista, koska ne rajoittavat tai jopa poistavat viistosateen aiheuttamaa rakenteen kostumista. Kuivatettava kosteus määrä on siten alhaisempi maalatussa rakenteessa kuin maalaamattomassa.

8.1.1 Ilmanvaihdon merkitys kuivumiseen

Tuulettavan ilmavirran massavirran suuruus ja ilmavirran kyky sitoa kosteutta tuuletusurasta tai -välistä määrittävät tuuletusilmavirran vaikutuksen rakenteen kuivumiseen. Mikäli kuivuminen tapahtuu eristekerroksesta, on ilmavirralla parempi kyky kyllästyä maksimikosteuteen. Kun kuivuminen tapahtuu syvemmillä betonikerroksesta, kosteusvirtaa hallitsee vesihöyryn diffuusio betonista.

Rakenteen tuulettavalla on suuri merkitys kuivumiseen. Uravillalla varustetun ikkunaelementin tehokas kuivuminen voidaan varmistaa vain, jos tuuletusaukkoja on elementin ylä- ja alareunassa riittävästi. Ikkunan ympäristön kuivuminen edellyttää myös ikkunan ala- ja yläreunan tuuletusaukkoja. Detaljiratkaisuilla on huolehdittava ikkunan ympäristön tuulettamisesta. Pelkät elementin kulmiin sijoitetut tuuletusaukot (tuuletusputket) eivät takaa koko elementin tuulettamista.

8.1.2 Betonirakenteiden kuivumiseen vaikuttavia tekijöitä

Rakennuksen sijainnilla Suomessa, lämmöneristyskerroksen paksuudella tai rakenteen sisäkuoren paksuudella ei ole suurta vaikutusta pinnoittamattoman tai maalatun rakenteen kuivumiseen. Rannikkoseuduilla kuivuminen on jonkin verran hitaampaa, mikä johtuu suuremmasta ulkoilman kosteudesta ja viistosademäärästä. Klinkkerilaattapintaisen rakenteen tehokas kuivuminen edellyttää aina rakenteen tuulettamista.

Maalaamaton ulkopinta voi ottaa kapillaarisesti vastaan viistosateesta tulevaa kosteutta, mikä lisää rakenteen kosteuskuormitusta. Toisaalta maalaamaton pinta kuivuu kuivalla säällä hieman nopeammin. Maalipinta ei kuitenkaan ole merkittävä tekijä rakenteen

kuivumiselle, koska betonin itsensä aiheuttama diffuusiovastus on varsin huomattava. Lämpäisevä maali vastaa n. 1–2 mm betonin paksuutta ja huomattavasti lämpäisevä betonimaali n. 10–15 mm betonin vesihöyrynlämpäisevyyttä. Maalipinnan suojaava vaikutus viistosateelta on merkittävämpi tekijä, kuin sen aiheuttama hidastus kuivumiselle. Erot maalatun ja maalaamattoman rakenteen kuivumisnopeudessa ilmenevät lähinnä kuivumisen alkuaikoina, jolloin rakenteen uloin pinta kuivuu. Kun kuivuminen tapahtuu syvemmältä rakenteesta, kosteuden diffuusio betonissa hallitsee kuivumista.

Klinkkerilaattojen vesihöyrynvastusominaisuus m on saksalaisen DIN-normin viitearvojen mukaan n. 50–100, kun se vastaavassa luettelossa on betonille 70–150. Tämä tarkoittaa sitä, että klinkkerilaatta voi olla vesihöyrynlämpäisevyydeltään jopa hieman betonin parempi. Toisaalta joidenkin klinkkerilaattojen vesihöyrynvastukselle on myös annettu arvoja 300–400. Laatan ulkopinnan kova lasitus tai vastaava pinta lisäävät laatan vesihöyrynvastusta. Klinkkerit on valmistettu korkeassa lämpötilassa, mistä on yleensä seurauksena alentunut kapillaarinen kosteudenjohtavuus. Klinkkeri imee itseensä heikosti nestemäistä vettä, mutta edellä olevien vesihöyrynvastusten perusteella se pystyy kuitenkin läpäisemään kosteutta vesihöyrynä eli sallii rakenteen kuivumisen. Valitun klinkkerityypin ominaisuudet vaikuttavat kuivumiskykyyn.

Klinkkeripinnan käyttäytyminen asettuu maalaamattoman ja tiiviin klinkkerilaatan välimaastoon. Laattojen välit kykenevät vastaanottamaan viistosadetta, mutta vastaavasti pinnan keskimääräinen vesihöyrynlämpäisykyky on rajoittunut laatan ja välisaumojen välisessä suhteessa. Jos saumojen osuus kokonaispinta-alasta on esim. 10 %, voidaan karkeasti olettaa pinnan vesihöyrynlämpäisevyyden olevan 1/10 maalaamattomasta pinnasta. Tämä vastaa koko pinnalle tasaisesti jaettuna lämpäisevyyttä, joka on vielä maalipinnan lämpäisevyyttä suurempi, mikäli laattojen saumat ovat maalaamattomat. Verrattuna maalattuun pintaan klinkkeripinta pystyy imemään jonkin verran kosteutta sisäänsä saumojen kautta.

Klinkkeripintaisen elementin kuivuminen vastaa betonin pintakerrosten kuivuessa aluksi maalatun rakenteen kuivumista. Kuivumisen jatkuessa kuivuvan kosteuden tulee tunkeutua syvemmältä betonikuoresta kuivumisen sallivaan kapeaan saumaan, jolloin kuivuminen hidastuu verrattuna tasaisesti maalattuun (tai pinnaltaan maalaamattomaan) rakenteeseen. Muutos kuivumisnopeudessa tapahtuu silloin, kun betonin kosteuspitoisuus laskee tasolle, jolla kapillaarinen kosteudenjohtuminen heikkenee merkittävästi. Huokoisissa materiaaleissa kapillaarista kosteudenjohtumista tapahtuu yleensä hygroskooppisen tasapainokosteuden ylittävillä kosteuksilla (>98 % rh). Eri betonilaaduille on esitetty kapillaarisia kosteudenjohtavuuksia tätä alhaisemmilla kosteuksilla. Tässä laskelmassa oletettiin kapillaarisen kosteuden alueeksi 95 % suhteellisen kosteuden ylittävä kosteusalue.

8.1.3 Kastuneen lämmöneristyksen kuivuminen

Rakenteen kosteustila, lämpötila ja aika vaikuttavat kosteusvaurioiden syntyyn. Home- ja mikrobivaurioihin vaikuttavat lisäksi kasvualusta ja saatavilla olevat ravinteet. Mitä kauemmin lämmöneristeet ovat kosteita lämpimissä oloissa, sitä suurempi on home- ja mikrobivaurioiden riski. Rakenteiden toimivuuden kannalta on yleensä aina tärkeää saada lämmöneristys kuivumaan nopeasti. Betonin kuivuminen on hidasta betonin pienestä diffuusiokertoimesta johtuen. Villaeristeiden vesihöyrynläpäisevyys on moninkertaista verrattuna kosteuden siirtymiseen betonissa.

Lämmöneristys kuivuu tuuletetussa rakenteessa tehokkaasti, sillä kosteuden siirtyminen villaeristeen kuiturakenteesta tuuletusuraan tai tuuletusväliin on nopeaa. Kun eristys on kostea, tuuletusilma voi silloin kuljettaa kosteutta kyllästysvajeensa verran ulos rakenteesta. Kuivumista tapahtuu keväästä syksyyn, mutta kuivuminen on tehokkainta kesällä. Kun rakenteen tuuletus on varmistettu hyvin suunniteltujen detaljirakenteiden avulla, kuivumisnopeuden suuruusluokka on noin 1 kg kosteutta rakenteen neliometriä kohden kolmessa viikossa. Siten vähäinen kuljetusten ja työmaan aikainen kastuminen kuivuu kohtuullisessa ajassa eikä kosteus johda mikrobivaurioihin.

8.2 Korkean julkisivun tuuletuksen toimivuus

Nelikerroksisen seinärakenteen tuuletustarkastelujen perusteella seinän tuulettuminen on mahdollista toteuttaa siten, että tuulettuminen tapahtuu pelkästään seinän ala- ja yläosasta. Tällöin toteutuvien ilmavirtojen tuuletusvälissä tulee olla vähintään 0,1–0,2 m/s koko seinäpinnalla, jotta tuulettuminen ja rakenteen kuivuminen olisi tasaista. Tätä ei todennäköisesti saavuteta pelkästään tuuletusputkiin perustuvalla tuuletuksella.

Rakenteen kuivuminen on tasaisempaa samalla kokonaisilmanvaihtuvuudella, jos korkea seinä on avoin joka kerrosvälistä. Tuuletusilma kyllästyy ja lämpenee tuuletusvälin lämpötilaan jo parin metrin matkalla, kun tuuletusilmavirta on noin 0,2 m/s. Silloin rakenteen kuivuminen on epätasaista ja rakenne kuivuu heikommin rakenteen keskiosissa ja ilmavirran poistumisaukon lähetyvillä verrattuna tuloilma-aukon ympäristöön. Rakenteen tuulettuminen johtaa U-arvon heikkenemiseen, mikäli ilmavirran nopeus kasvaa yli 0,5 m/s. Samalla saattaa esiintyä lämpötekniiseltä kannalta paikallisia haittavaikutuksia tuloilma-aukon lähetyvillä.

8.3 Tuuletusilmavirran vaikutus lämpöhäviöihin

Rakenteiden tuulettaminen tulee mitoittaa siten tarvetta vastaavaksi. Koska betonin kuivumista säätelee kosteuden siirtyminen betonin sisäosista betonin pintaan, ei tuuletuksen lisäämisellä saavuteta nopeampaa kuivumista. Kastunut lämmöneriste kuivuu tehokkaasti myös pienillä tuuletusilmamäärillä. Sen sijaan rakenteen hallitsematon tuulettaminen voi johtaa lämpöteknisen toiminnan huonontumiseen ja tarpeettomasti kasvaviin lämpöhäviöihin.

Saatujen tulosten perusteella kostean rakenteen kuivumisen turvaava tuuletus ei heikennä rakenteiden lämpöteknistä toimivuutta merkittävästi. Tuuletusilmavirtaus lisää tuuletusraollisen rakenteen lämpöhäviöitä talvikaudella noin 3 % verrattuna tuulettumattomaan tuuletusraolliseen rakenteeseen, kun ilmavirtaus on alle 0,2 m/s. Kesäkaudella tuuletusilmavirtaus lisää suhteellisesti laskettuna lämpöhäviöitä enemmän, mikä johtuu ilmavirtauksen auringon säteilykuormia jäähdyttävästä vaikutuksesta. Kun tuuletusvälin ilmavirran nopeus on alle 0,5 m/s, toimii tuuletusväli myös rakenteen lisäeristeenä. Tuuletuksen vaikutusta rakenteen lämmönläpäisykertoimeen selvitetään vielä kuluvan projektin aikana.

Tuuletusuran ilmavirtauksen vaikutus rakenteen lämmöneristyksen läpi tapahtuvaan lämpöhäviöön 3 m korkealla seinällä on alle 1 %, kun ilmavirtaukset tuuletusurassa (30 mm x 20 mm, c = 210 mm) ovat alle 0,1 m/s.

Rakenteen alkukosteuden kuivumisen kannalta ja erityisesti myös rakenteen pitkäaikaistoimivuuden varmistamiseksi on ikkunoiden ja muiden vastaavien tuuletusurien yhtenäisyyden katkaisevien rakenneosien läheisyydessä syytä varmistua ilman vaihtuvuudesta asentamalla lisäputkitus tai tuuletusaukot katkaisevien rakenneosien ympärille.

8.4 Tuuletettujen betonisandwich-rakenteiden lämmönläpäisykertoimet

Hyvin tuuletetuissa tuuletusvälillä varustetuissa betonielementtirakenteissa käytettävän mineraalivillan suunnitteluun käytettävä lämmönjohtavuus on suurempi kuin tuuletusurallisille villaeristeille lievästi tuuletetuissa elementtirakenteissa. Tuuletusurat kuitenkin heikentävät eristekerroksen tehollista lämmönvastusta siinä määrin, että sekä tuuletusvälillisessä rakenteessa että tuuletusurallisessa rakenteessa tarvittava eristyksen kokonaispaksuus on sama 160 mm, jotta uusien 1.10.2003 voimaan astuvien määräysten vaatima U-arvon taso 0,25 W/m²K toteutuisi. Pieniä eroja lopullisessa U-arvossa voi esiintyä riippuen urien koosta ja keskinäisestä etäisyydestä.

Lähdeluettelo

1. Kohonen, R., Kokko, E., Ojanen, T. & Virtanen, M. Thermal effects of air flows in building structures. Espoo 1985. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimuksia 367. 81 s. ISBN 951-38-2412-8.
2. Nieminen, J. & Kouhia, I. Hyvin eristetyn loivan katon toimivuus ja vaatimukset. Espoo 1999. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 1979. 38 s. + liitt. 3 s. ISBN 951-38-5473-6.
3. Nieminen, J. Hyvin eristettyjen julkisivurakenteiden toimivuus. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 1705. 36 s. ISBN 951-38-4860-4.
4. ASTM Manual 40, "Moisture Analysis and Condensation Control in Building Envelopes." Appendix 1 – Computer models: LATENITE (Salonvaara M. and Karagiozis A.). Hertzog, H. (ed.). American Society for Testing and Materials ASTM. USA 2001.
5. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Osa C3 Lämmöneristys, määräykset. Ympäristöministeriö. (Voimaan 1.10.2003.)
6. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Osa C4 Lämmöneristys, ohjeet. Ympäristöministeriö. (Voimaan 1.10.2003.)

Liite A: Betonisandwich-elementtien U-arvon laskenta

Ehdotettu menettely eristettyjen tuuleturallisten betonisandwich-elementtien U-arvon laskemiseksi on seuraava:

- suunnittelulämmönjohtavuutena käytetään kahden tiiviin pinnan väliin tiiviisti asennettua eristettä
- tuuletururan vaikutus lasketaan lievästi tuulettuna alla esitettyjen kaavojen mukaan.

Uusi 1.10.2003 voimaan tuleva C4 määrittää U-arvon laskennasta seuraavaa.

Lämmönläpäisykerroin (U) lasketaan kaavalla (1).

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

R_T rakennusosan kokonaislämmönvastus ympäristöstä ympäristöön.

Kun rakennusosan ainekerrokset ovat tasapaksuja ja tasa-aineisia ja lämpö siirtyy ainekerroksiin nähden kohtisuoraan, lasketaan rakennusosan kokonaislämmönvastus R_T kaavalla (2).

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_m + R_g + R_b + R_{q1} + R_{q2} + \dots + R_{qn} + R_{se} \quad (2)$$

jossa

$$R_1 = d_1 / \lambda_1 ,$$

$$R_2 = d_2 / \lambda_2 \dots R_m = d_m / \lambda_m$$

d_1, d_2, \dots, d_m ainekerroksen 1, 2, ... m paksuus, m

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ ainekerroksen 1, 2, ... m lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo, esim. normaalin lämmönjohtavuus

R_g rakennusosassa olevan ilmakerroksen lämmönvastus

R_b maan lämmönvastus

$R_{q1}, R_{q2}, \dots, R_{qn}$ ohuen ainekerroksen 1, 2, ... n lämmönvastus

$R_{si} + R_{se}$ sisä- ja ulkopuolisen pintavastuksen summa.

Mikäli tasa-aineisen ainekerroksen paksuus vaihtelee rakenteen tason suunnassa, voidaan paksuutena käyttää keskimääräistä arvoa, jos paikallinen vähimmäispaksuus ei alita sitä enempää kuin 20 %.

Kun rakennusosa on epätasa-aineinen niin, että siinä on pintojen suuntaisia ainekerroksia, joissa on rinnakkain lämmönvastukseltaan erilaisia osa-alueita, lasketaan epätasa-aineisen ainekerroksen j lämmönvastus R_j kaavalla (3).

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

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

$R_{aj}, R_{bj}, \dots, R_{nj}$ epätasa-aineisessa kerroksessa j olevan tasa-aineisen osa-alueen a, b, \dots, n lämmönvastus, jossa $R_{aj} = d_j / \lambda_{aj}$, $R_{jb} = d_j / \lambda_{bj}$, ... $R_{jn} = d_j / \lambda_{nj}$

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ ainekerroksen 1, 2, ... n lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvo, esim. normaalin lämmönjohtavuus.

Jos epätasa-aineisessa ainekerroksessa vierekkäisten aineiden lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvot poikkeavat toisistaan enemmän kuin viisikertaisesti, ei kaava (3) sovellu käyttöön. Tällöin suuremman lämmönjohtavuuden aine ja osa-alue käsitellään kylmäsiltana kohdan 2.3 mukaan.

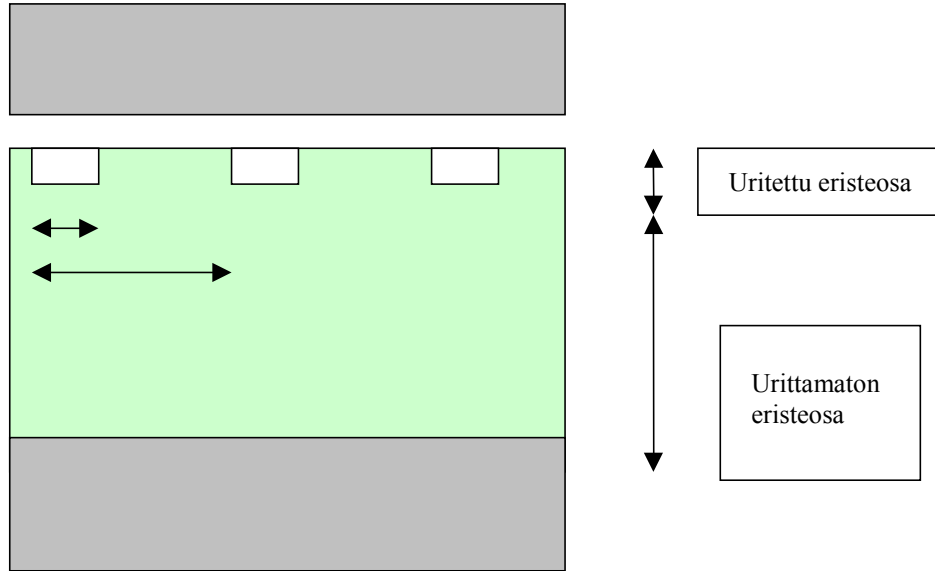
Epätasa-aineisia kerroksia sisältävän rakennusosan kokonaislämmönvastus R_T lasketaan kaavalla (4) ja lämmönläpäisykerroin U kaavalla (1).

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

R_1, R_2, \dots, R_n epätasa-aineisen ainekerroksen 1, 2, ... n lämmönvastus laskettuna kaavalla (3)

ΣR tasa-aineisten ainekerrosten, ilmakerroksen, ohuiden ainekerrosten ja maan lämmönvastusten summa

$R_{si} + R_{se}$ sisä- ja ulkopuolisen pintavastuksen summa.



Kuva 39. Tuuletusurallisen BSW-elementin periaatekuva.

Tuuletusurallisen BSW-elementin U-arvo laskettiin sekä C4:n ohjeiden mukaan että numeerisella laskentaohjelmalla Therm, kun uran syvyys on 20 mm ja leveys 30 mm (urien väli 200 mm).

Seuraavassa on käsitelty rakenteen laskenta ja siihen tarvittavien parametrien valinta.

BSW-elementissä on lämpövirran suuntaan tasosuunnassa eriarvoisia materiaaleja tuuletusuran kohdalla. Tuuletusurassa lämpö etenee johtamalla, ilman konvektiolla ja säteilyllä. Lievästi tuulettuvassa rakenteessa ilmvälin vastukseksi (20 mm) voidaan ottaa puolet tuulettamattoman ilmvälin vastuksesta, joka on $0,17 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ eli vastukseksi saadaan $0,085 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$.

Laskenta RakMK C4:n ohjeiden mukaan

Laskentakaavan 4 mukaan U-arvo lasketaan seuraavasti:

$$R_T = R_{si} + R_{sisäkuori} + R_{urittamaton\ eristeosa} + R_{uritettu\ eristeosa} + R_{ulkokuori} + R_{se}$$

Uritettu eristeosa lasketaan kaavalla 3, jolloin saadaan:

$$1/R_{uritettu\ eristeosa} = (1 - L/CC)/(S/\lambda) + (L/CC)/R_{ilmaväli}$$

$$R_{uritettu\ eristeosa}(\lambda=0,041) = 1/(0,85/0,4878 + 0,15/0,085) = 0,285\ m^2K/W$$

$$R_{uritettu\ eristeosa}(\lambda=0,037) = 1/(0,85/0,5405 + 0,15/0,085) = 0,300\ m^2K/W$$

missä L = 30mm uran leveys ja CC = 200 mm urien keskinäinen etäisyys.

Tällöin koko rakenteen U-arvoksi saadaan:

$$U = 1/R = 1 / (0,13 + 0,08/1,7 + 0,14/0,041 + 0,285 + 0,07/1,7 + 0,04) = 0,2527\ W/m^2K$$

$$U = 1/R = 1 / (0,13 + 0,08/1,7 + 0,14/0,037 + 0,300 + 0,07/1,7 + 0,04) = 0,2303\ W/m^2K$$

kun lämmönjohtavuutena on käytetty arvoa 0,041 tai 0,037 W/mK.

Kaksiulotteisella lämmönsiirron laskentaohjelmalla Therm ja standardin SFS-EN ISO 6946 mukaan laskettu U-arvo

Lämmöneristeen lämmönjohtavuutena käytettiin näissä vertailulaskelmissa 0,041 W/mK.

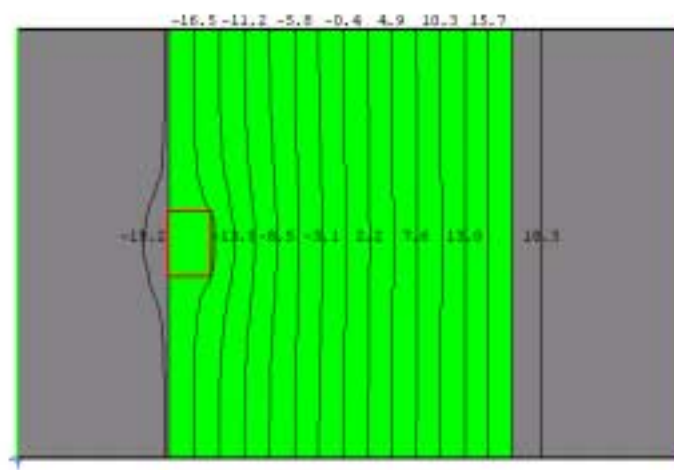
Laskentaohjelmalla Therm lämmönjohtavuuksiksi saatiin seuraavat arvot:

- Tuuletusuraton ja tuulettamaton umpinainen betonisandwich-elementti: 0,2403 W/m²K
- Tuuletusurallinen, mutta tuulettamaton betonisandwich-elementti: 0,2432 W/m²K (+1,2 %)
- Tuuletusurallinen 'lievästi' tuuletettu bsw-elementti: 0,2458 W/m²K (+2 %).

Standardin SFS-EN ISO 6946 mukaan laskettujen ala- ja yläikiarvojen mukaan saadaan

- tuulettamattomalle tapaukselle 0,2450 W/m²K (+1,8 % urattomaan)
- 'lievästi' tuulettetussa tapauksessa 0,2490 W/m²K (+3,3 % urattomaan, tuulettamattomaan).

Standardin mukaan lievästi tuulettetussa tapauksessa tuuletusväliin johtavien aukkojen koon tulee olla 500–1500 mm² seinän leveyttä kohden. Betonisandwich-elementtien tuuletusaukot jäävät usein jopa alle 500 mm² seinäleveyttä kohden, jolloin voitaisiin puhua tuulettamattomasta tapauksesta.



Kuva 40. Tuuletusurallisen betonisandwich-seinärakenteen lämpötilajakaumat (+20 °C / -20 °C).

Tuuletusuran ilmavirtauksen vaikutus rakenteen lämmöneristyksen läpi tapahtuviin lämpöhäviöihin 3 m korkealla seinällä oli alle 1 %, kun ilmavirtaukset tuuletusurassa (30 mm x 30 mm, cc 210 mm) olivat $v = 0,06\text{--}0,09$ m/s.

Lämmöneristeiden lämmönjohtavuuden suunnitteluarvon määrittämisessä otetaan huomioon eristyksen suojaus- ja asennustapa. Nykyisin käytössä oleva menettely: jos eriste on kahden ilmatiiviin pinnan välissä, eristeen ilmanläpäisevyydestä tulee lämmönjohtavuuteen lisäys, joka on 10 x ilmanläpäisevyys, täysin avoimelle pinnalle vastaava kerroin on 30 x ilmanläpäisevyys (yksikössä m^3/msPa). $70 \text{ kg}/\text{m}^3$ tiheälle mineraalivillieristeelle ilmanläpäisevyys voi olla esim. $40 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{msPa}$. Tämä antaa lämmönjohtavuuteen lisän $0,0012 \text{ W}/\text{mK}$ toiselta pinnaltaan täysin avoimelle rakenteelle. Suhteellisesti katsottuna tämä vastaa $0,0012/0,034 = 3,5$ % lisäystä. Ilmanläpäisevyyden lisäksi lämmönjohtavuuden laskennallista arvoa korotetaan työtavasta, epäideaalisuuksista ym. juontavista seikoista johtuen lisäksi arvoilla $0,001\text{--}0,003 \text{ W}/\text{mK}$ suojaustavasta riippuen. $0,001$ lisäys suhteutettuna esimerkiksi lähtöarvoon $0,0355$ merkitsee $2,8$ % lisäystä.

Tuloksiin on vielä lisättävä ansaiden aiheuttama pistemäinen lisä:

- Pistemäinen lisäkonduktanssi, $0,0020 \text{ W}/\text{K}$ (Metallisiteet, RST $\phi 5$)
- Ansaiden määrä $5,556 \text{ kpl}/\text{m}^2$
- $(k300/k600) = 1/(0,3 \times 0,6)$
- Vaikutus U-arvoon (dU) $0,01111 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$.

C4:n mukaan laskettuihin arvoihin tulisi näin ansaista aiheutuvat lisäykset:

- Lopullinen U-arvo $U = 0,2527 + 0,0111 \text{ W}/\text{m}^2\text{K} = 0,2638 \approx 0,26 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$
- Lopullinen U-arvo $U = 0,2303 + 0,0111 \text{ W}/\text{m}^2\text{K} = 0,2414 \approx 0,24 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$.

Laskentamallien tulosten vertailu

Lämmönsiirron tarkemmilla laskentamalleilla (kaksiulotteinen numeerinen malli Therm, lievästi tuuletettu ilmaväli, ilmavälin efektiivinen lämmönjohtavuus 0,16 W/mK) tulokseksi saadaan 0,246 W/m²K lämmönjohtavuudella 0,041 W/mK. Ilmavälin käsittely tuulettamattomana antaisi tulokseksi RakMK C4:n kaavojen mukaan U-arvon 0,247 W/m²K (ilman metallisiteitä). Tuuletusura kasvattaa C4:n mukaan U-arvoa lievästi tuuletettuna n. 5 %. Voidaan arvioida, että C4-menettely yliarvioi tuuletusuran merkitystä. Kaavalla (4) laskettu R-arvo on kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo, minkä vuoksi yliarviointi on ymmärrettävää. Tuuletusuran merkitys on kuitenkin kummassakin tapauksessa varsin vähäinen. Merkityksellisempi seikka on suunnitteluun käytettävän lämmönjohtavuuden valinta.

Tuuletusurallisen rakenteen asennus- ja suojaustapa vastaa parhaiten tapausta, jossa eriste on tiiviisti kahden tiiviin pinnan välissä. Tuuletusura saattaa mahdollistaa konvektiovirtauksia eristeessä. Mikäli ilmavirtausten vaikutuksia ei oteta huomioon lämmönjohtavuudessa, antaa määräys mahdollisuuden osoittaa vaikutus U-arvon laskennassa. Laskennallisesti on osoitettu, että nämä konvektiovaikutukset ovat hyvin lieviä (<1 %), mikäli edellä esitetty asennustapa toteutuu (tiivit pinnat). Reunaehtona konvektiovaikutusten vähäisyydelle voidaan pitää eristemateriaalin ilmanläpäisevyyttä. Alle 1 % vaikutus oli laskettu ilmanläpäisevyydelle $40 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{msPa}$. Tuuletusuran tuulettumisen vaikutus on jo otettu huomioon ilmavälin vastuksessa (puolitus 0,17:stä 0,085:een).

Yhteenveto

Yhteenvetona menettelystä U-arvon laskemiseksi ehdotetaan seuraavaa:

- Suunnittelulämmönjohtavuutena käytetään kahden tiiviin pinnan väliin asettuvaa eristettä (mikä johtaa lämmönjohtavuuteen 0,037 nykyisin käytetyillä tuotteilla).
- Tuuletusuran vaikutus lasketaan lievästi tuuletettuna. Tuuletuksen toimivuuden varmistamiseksi elementtisuunnittelussa tulee pyrkiä lievästi tuuletettuun rakenteseen, jossa tuuletusaukkojen koko on 5–15 cm²/m.
- Ylä- ja alalikiarvon käyttö U-arvon laskennassa antaa tarkemman tuloksen ja on suositeltava menetelmä.

Laskenta voidaan yksinkertaistaa uritettujen rakenteiden kohdalla käsittelemällä uritettu villa tehollisen lämmönjohtavuuden avulla, jolla urien vaikutus on lisätty yhtenäisen urattoman villakerroksen lämmönjohtavuuteen. Tyypilliset betonisandwichelementeissä käytetyt urakoot ovat 30 mm x 20 mm ja 25 mm x 33 mm (leveys x syvyys). Uritetuilla rakenteilla saavutetaan U-arvot 0,25 W/m²K ja 0,20 W/m²K, kun näitä vastaavat lämmöneristyspaksuudet ovat 160 mm ja 200 mm. Jotta 160 mm lämmöneristyspaksuus saavutetaan, on eristeen nimellispaksuuden oltava noin 165 mm.

Tekijä(t) Salonvaara, Mikael & Nieminen, Jyri			
Nimeke Betonirakenteiden tuuletus ja lämmöneristävyys			
Tiivistelmä Betonirakenteiden tuulettumista käsittelevässä tutkimuksessa selvitettiin laskennallisten analyysien avulla erilaisten betonirakenteiden toimivuutta. Tutkimusta täydennetään meneillään olevien kenttämittausten avulla. Tuuletettavien rakenteiden ominaisuuksia on verrattu perinteiseen tuulettumattomaan rakenteeseen. Eristyspaksuuden merkitystä tarkasteltiin lämmöneristeen tuulen-suojauksen ja erityspaksuuden kasvattamisesta saatavan lämpöteknisen hyödyn kannalta. Tulosten perusteella arvioitiin rakenteiden käytettävyyttä eri ilmastoissa sekä julkisivupinnan ominaisuuksien merkitystä toimivuuden kannalta.			
Avainsanat concrete structures, construction, exterior walls, analysis, computations, methods, ventilation, ventilated structures, insulation thickness, wind, surface coatings, climate, thermal insulation			
Toimintayksikkö VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Lämpömiehenkuja 3, PL 1804, 02044 VTT			
ISBN 951-38-6169-4 (nid.) 951-38-6170-8 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)			Projektinumero
Julkaisu-aika Syyskuu 2003	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 58 s. + liitt. 8 s.	Hinta B
Projektin nimi BSW		Toimeksiantaja(t) Paroc Oy Ab, Saint-Gobain Isover Oy, BLT ry, Betonitieto Oy	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	

Author(s) Mikael Salonvaara & Jyri Nieminen			
Title Ventilation and thermal resistance of concrete structures			
Abstract Performance of concrete exterior wall structures was analysed with computational methods. Ongoing field measurements will complement the study. The hygrothermal properties of ventilated structures were compared with basic non-ventilated structures. The importance of insulation thickness was analysed in terms of wind protection and thermal benefit of increased insulation level. The applicability of structures and the importance of performance properties of surface coatings for different climatic conditions have been assessed.			
Keywords concrete structures, construction, exterior walls, analysis, computations, methods, ventilation, ventilated structures, insulation thickness, wind, surface coatings, climate, thermal insulation			
Activity unit VTT Building and Transport, Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 1804, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-6169-4 (soft back ed.) 951-38-6170-8 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)			Project number
Date September 2003	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 58 p. + app. 8 p.	Price B
Name of project BSW		Commissioned by Paroc Oy Ab, Saint-Gobain Isover Oy, BLT ry, Betonitieto Oy,	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back edition) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	

VTT TIEDOTTEITA – RESEARCH NOTES

VTT RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIikka – VTT BYGG OCH TRANSPORT – VTT BUILDING AND TRANSPORT

- 2159 Tillander, Kati, Lindblom, Towe & Keski-Rahkonen, Olavi. Taloudelliset vahingot rakennuspalloissa. 2002. 107 s. + liitt. 5 s.
- 2161 Koivu, Tapio. Kiinteistö- ja rakennusalan tuotemallien ja yhteensopivuuden tulevaisuus. Vaihtoehtoisia skenaarioita ja teknologiapolkuja. 2002. 53 s. + liitt. 11 s.
- 2166 Kääriäinen, Hannu, Tulla, Kauko & Vähäsöyrinki, Erkki. Öljysäiliöiden suojarakenteiden kunto ja kunnonhallinta. CISTERI-projekti. 2002. 33 s. + liitt. 22 s.
- 2167 Tapio, Juha, Häkkänen, Helinä, Pajunen, Kirsi, Kaitanen, Susanna & Mäkinen, Tapani. Sakkolain-säädännön uudistamisen vaikutukset ylinopeusrangaistuksiin, ajonopeuksiin ja liikenneturvallisuuteen. 2002. 36 s. + liitt. 7 s.
- 2168 Ojanen, Tuomo & Salonvaara, Mikael. Kuivumiskykyiset ja sateenpitävät rakenteet. 2002. 66 s. + liitt. 3 s.
- 2170 Mikkola, Kati & Riihimäki, Markku. Omakotitalorakentajien valmius ympäristöystävällisiin rakentamistapoihin. 2002. 53 s. + liitt. 2 s.
- 2177 Mäkelä, Kari, Laurikko, Juhani & Kanner, Heikki. Suomen tieliikenteen pakokaasupäästöt. LIISA 2001.1 -laskentajärjestelmä. 2002. 63 s. + liitt. 42 s.
- 2179 Heikkinen, Jorma, Heinonen, Jarkko, Vuolle, Mika, Laine, Tuomas & Liljeström, Kimmo. Toimistorakennusten hybridi-ilmanvaihto. 2002. 113 s.
- 2181 Paloposki, Tuomas, Myllymäki, Jukka & Weckman, Henry. Luotettavuusteknisten menetelmien soveltaminen urheiluhallin poistumisturvallisuuden laskentaan. 2002. 53 s. + liitt. 13 s.
- 2185 Nummelin, Johanna. Recent trends in European real estate research. 2003. 41 p.
- 2075 Häkkänen, Helinä, Britschgi, Virpi, Sirkiä, Ari & Kanner, Heikki. Nuorten aikomus hankkia ajokortti. Toinen, uudistettu painos, 2003. 74 s. + liitt. 6 s.
- 2191 Lahdenperä, Pertti & Koppinen, Tiina. Kannustavat maksuperusteet rakennushankkeessa. Osa 1. Kansainvälinen kartoitus. 2003. 140 s.
- 2194 Kurkela, Juha, Kivinen, Tapani, Westman, Veli-Matti & Kevarinmäki, Ari. Suurten maatalosrakennusten puurunkoratkaisut. Esivalmistetut rakennejärjestelmät. 2003. 116 s. + liitt. 39 s.
- 2195 Koota, Jaana. Market review and study of success characteristics in construction companies. Case: United States. 2003. 41 p. + app. 6 p.
- 2197 Koskela, Lauri & Koskenvesa, Anssi. Last Planner -tuotannonohjaus rakennustyömaalla. 2003. 82 s. + liitt. 20 s.
- 2198 Ilomäki, Sanna-Kaisa. Kehitysryhmätyöskentely organisaation oppimisen välineenä. Tapaustutkimus tietojärjestelmän käytönaikaisesta kehittämisestä. 2003. 76 s. + liitt. 7 s.
- 2200 Andstén, Tauno, Keski-Rahkonen, Olavi & Myllymäki, Jukka. Bursting potential of portable fire extinguishers at elevated temperatures. 2003. 36 p. + app. 8 p.
- 2202 Hietaniemi, Jukka, Hakkarainen, Tuula, Huhta, Jaakko, Jumppanen, Ulla-Maija, Kouhia, Ilpo, Vaari, Jukka & Weckman, Henry. Ontelotilojen paloturvallisuus. Ontelopalojen leviämisen katkaiseminen. 2003. 168 s. + liitt. 52 s.
- 2206 Sarja, Asko, Laine, Juhani, Pulakka, Sakari & Saari, Mikko. INDUCON-rakennuskonsepti. 2003. 66 s. + liitt. 35 s.
- 2210 Salonvaara, Mikael & Nieminen, Jyrki. Betonirakenteiden tuuletus ja lämmöneristävyys. 2003. 58 s. + liitt. 8 s.
- 2211 Koivu, Tapio, Laine, Tuomo, Iivonen, Veijo & Gonzales, Dan. Options for the Finnish FM/AEC software packages for market entry in the U.S. 2003. 88 p.

Betonirakenteiden tuulettumista käsittelevässä tutkimuksessa selvitettiin laskennallisten analyysien avulla erilaisten betonirakenteiden toimivuutta. Tutkimusta täydennetään meneillään olevien kenttämittausten avulla. Tuuletettavien rakenteiden ominaisuuksia on verrattu perinteiseen tuulettumattomaan rakenteeseen. Eristyspaksuuden merkitystä tarkasteltiin lämmöneristeen tuulensuojauksen ja erityspaksuuden kasvattamisesta saatavan lämpöteknisen hyödyn kannalta. Tulosten perusteella arvioitiin rakenteiden käytettävyyttä eri ilmastoissa sekä julkisivupinnan ominaisuuksien merkitystä toimivuuden kannalta.

Tätä julkaisua myy
VTT TIETOPALVELU
PL 2000
02044 VTT
Puh. (09) 456 4404
Faksi (09) 456 4374

Denna publikation säljs av
VTT INFORMATIONSTJÄNST
PB 2000
02044 VTT
Tel. (09) 456 4404
Fax (09) 456 4374

This publication is available from
VTT INFORMATION SERVICE
P.O.Box 2000
FIN-02044 VTT, Finland
Phone internat. + 358 9 456 4404
Fax + 358 9 456 4374
