



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

PETTERI HUTTUNEN
**TUULETETUN TERÄSPROFIILIRUNKOISEN
SUURJULKISIVUELEMENTIN RAKENNUSFYSIKAALINEN
TOIMINTA**

Diplomityö

Tarkastaja: professori Juha Vinha
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tuotantotalouden ja rakentamisen
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
9. lokakuuta 2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

HUTTUNEN, PETTERI: Tuuletetun teräsprofiilirunkoisen suurjulkisivuelementin rakennusfysikaalinen toiminta

Diplomityö, 84 sivua, 26 liitesivua

Lokakuu 2014

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Juha Vinha

Avainsanat: rakennusfysiikka, lämpö, kosteus, julkisivun tuuletus, luonnollinen konvektio, WUFI, COMSOL

Energiatehokkaan ja lämpöoloiltaan laadukkaan rakennuksen vaipan on oltava riittävän hyvin lämmöneristetty. Lämmöneristekerroksen paksuuden kasvaessa vaipparakenteen ulko-osat kuitenkin viilenevät, jolloin samalla suhteellinen kosteus nousee. Ilmiö on otettava huomioon suunniteltaessa entistä eristävämpiä rakenteita, jotta nouseva suhteellinen kosteus ei aiheuta homehtumis- tai kondensoitumisriskiä. Käytännössä rakenteiden kosteusteknistä toimintaa voidaan hallita estämällä kosteusvuodot rakenteisiin, käyttämällä hyvin kosteutta kestäviä ja lämpöä eristäviä materiaaleja rakenteiden ulkosissa sekä varmistamalla rakenteiden mahdollisuudet kuivua tarvittaessa.

Tässä työssä tutkittiin laskennallisesti erään korjaus- ja uudisrakentamiseen tarkoitettua suurjulkisivuelementin rakennusfysikaalista toimintaa laskennallisin keinoin. Keskeinen osa suurjulkisivuelementin kosteusteknisessä toimivuudessa on uudenaikaisella tuuletusurituksella, jossa tuuletusilma lämpiää ja pystyy siten luonnollisen konvektion avulla poistamaan merkittävästi kosteutta rakenteen lämmöneristekerroksesta. Luonnollisen konvektion aiheuttamia virtauksia tutkittiin stationääritilassa eri ulkoilman lämpötiloilla COMSOL Multiphysics -laskentaohjelmalla. Ohjelman ratkaisemien virtaus- ja lämpötilakenttien perusteella tehtiin käsinlaskelmia tuuletuksen kosteudenpoistovaikutuksesta. Virtausteknistä tietoa käytettiin myös lähtötietoina WUFI 1D -laskelmille, joissa rakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa arvioitiin muuttuvissa ulkoilman olosuhteissa.

Tutkimustuloksina saatiin joukko rakennetyyppejä, joiden voidaan olettaa olevan kosteuden aiheuttamien vaurioiden kannalta riskittömiä Suomen ilmastossa. Tutkimustulosten luotettavuuden kannalta laskelmissa sovelletut fysikaaliset yksinkertaistukset otettiin huomioon käyttämällä ankaria testiolosuhteita ja toimintakriteereillä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

HUTTUNEN, PETTERI: Building physical performance of a steel-framed large-panel façade with ventilation

Master of Science Thesis, 84 pages, 26 Appendix pages

October 2014

Major: Structural design

Examiner: professor Juha Vinha

Keywords: building physics, heat, moisture, facade ventilation, natural convection, WUFI, COMSOL

Ensuring energy efficiency and thermal comfort in buildings requires adequate thermal insulation in envelope. However, increasing the thickness of insulation layer will also cool the outer regions in envelope and thus the levels of relative humidity will rise. This phenomenon needs to be taken into account while designing highly insulated structures in order to avoid the risk of mould growth or vapour condensation. In practice, moisture safety of highly insulated envelope structures can be ensured by preventing moisture leakages, using moisture resistant and thermally insulating materials in the outer sections of the structure and ensuring the drying possibility.

In this work, building physical performance of a large-panel facade was studied by computational methods. The studied large-panel can be used in both renovation and new building. Essential part in the hygrothermal performance of the large-panel is the novel ventilation system, where the inflowing exterior air warms and by natural convection transports remarkably moisture out of the structure. Airflows due to natural convection were studied by COMSOL Multiphysics software. Velocity and temperature fields solved by the software were used in hand-calculations of exiting moisture along the outflow of air. Results of the CFD-computations were also used as initial data of WUFI 1D simulations that were used to assess the hygrothermal performance of large-panel in transient outdoor conditions.

As a research result was obtained an array of envelope structure designs that can be assumed to be risk-free of moisture damages in Finnish climate. Relative to the reliability of research results, the physical simplifications applied in the study methods were taken into account by using harsh test conditions and performance criteria.

ALKUSANAT

Tämä on diplomi-insinöörin tutkintoon kuuluva opinnäytetyö, joka on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitokselle. Työ on osa tuotekehitysprojektia, jonka tilaajana on toiminut virolainen rakennusliike As Rake. Tuotekehitystyö rakennusfysikaalisten tarkastelujen osalta on tehty vuosina 2011–2012 ja tämä opinnäytetyö on kirjoitettu pääasiassa vuoden 2013 aikana.

Kiitän professori Juha Vinhaa työn tarkastamisesta sekä ohjauksesta työn aikana. Kiitän myös työn tilaajaa Ants Katkosildia joustavasta yhteistyöstä projektin aikana. Lisäksi kiitän perhettäni ja ystäviäni heidän antamastaan tuesta ja kannustuksesta koko opintojeni aikana.

Tampereella 16.09.2014

Petteri Huttunen

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	iii
Abstract.....	iv
Alkusanat	v
Termit ja niiden määritelmät	vii
Merkinnät.....	x
1 Johdanto	1
2 Teoria.....	3
2.1 Lämpö	4
2.1.1 Lämpöenergia ja ominaislämpökapasiteetti.....	4
2.1.2 Lämmön siirtyminen	9
2.2 Kosteus.....	15
2.2.1 Vesihöyry	15
2.2.2 Kosteuspitoisuus	18
2.2.3 Kosteuden siirtyminen.....	19
2.2.4 Energian ja massan säilyminen yhdistetyssä lämmön ja kosteuden siirtymisessä.....	21
2.3 Virtaus.....	24
2.3.1 Massan säilyminen virtauksessa.....	25
2.3.2 Liikemäärän säilyminen virtauksessa.....	28
2.3.3 Energian säilyminen ei-isotermisissä virtauksissa.....	41
2.4 Numeerisista menetelmistä.....	45
3 Suurelementin rakenne.....	49
4 Virtaustekniset tarkastelut	51
4.1 Fysikaaliset yksinkertaistukset	54
4.1.1 Virtauskentän mallintaminen.....	54
4.1.2 Kosteuden konvektion käsinlaskenta.....	58
4.1.3 Tuuletusratkaisut	61
5 Lämpö- ja kosteustekniset tarkastelut.....	63
5.1 Tutkitut rakenteet	63
5.2 Materiaaliominaisuudet	64
5.3 Reunaehdot ja testiolosuhteet	64
5.4 Toimintakriteerit.....	68
5.4.1 Parannettu homemalli.....	68
6 Tulokset	73
6.1 Kosteuden poistuminen tuuletusurituksen kautta.....	73
6.2 Dynaamiset lämpö- ja kosteustekniset tarkastelut	76
7 Tulosten tarkastelu ja yhteenveto	80
Lähteet	82
Liitteet.....	84

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Diffuusio	Aineen sisäisestä molekyylien välisestä vuorovaikutuksesta aiheutuva ilmiö, jossa jonkin aineen (esimerkiksi vesihöyryn) pitoisuuserot väliaineessa tai materiaalissa pyrkivät itsestään tasoittumaan aineensiirron seurauksena.
Dynaaminen	Muuttuva ajan suhteen.
Elementtimenetelmä	Matemaattinen menetelmä, jolla voidaan numeerisesti määrittää likiarvoratkaisuja osittaisdifferentiaaliyhtälöille tai -yhtälöryhmille diskretisoimalla jatkuva geometria äärelliseen määrään elementtejä (<i>finite element method</i>), joiden solmupisteet muodostavat äärellisen joukon aritmeettisesti ratkaistavia muuttujia.
Homeindeksi	Parannetun homemallin mukainen dynaamisista lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittaus- tai laskentatuloksista laskettava luku, joka kuvaa laskentamallin ennustamaa homeen kasvun määrää tarkastellussa materiaalien rajapinnassa [-].
Höyrystyslämpö	Höyryn ja nesteen välisessä faasimuutoksessa vapautuva tai sitoutuva energia [kJ/kg].
Johtuminen	Aineen sisäisestä molekyylien välisestä vuorovaikutuksesta aiheutuva lämmönsiirtymisilmiö, jossa aineen lämpöenergiatiheyden gradientit pyrkivät itsestään tasoittumaan. Matemaattisesti tarkasteltuna analoginen ilmiö diffuusion kanssa.
Kapillaarisuus	Kapillaarihuokoisia sisältävän materiaalin taipumus siirtää nestettä suuremmasta nestepitoisuudesta pienempään. Kapillaari-ilmiö aiheutuu nestemolekyylien ja huokosseinämi- en välisistä vetovoimista (adheesio ja koheesio), joiden net- tovaikutus riittävän kapeissa huokosissa aiheuttaa kapillaari- imun, jonka seurauksena neste pyrkii siirtymään.
Konvektio	Lämmön tai aineen siirtyminen kuljettumalla virtaavassa väliaineessa.
Kyllästysosapaine	Suurin mahdollinen vesihöyryn osapaine ilmassa, jolloin lämpötilan laskiessa tai ilmaan virratessa lisää vesihöyryä,

vesi alkaa tiivistyä nestemäiseksi [Pa]. Kyllästysosapaineen arvo riippuu voimakkaasti lämpötilasta.

Lämmönläpäisykerroin	Lämpövirran tiheys jatkuvuustilassa, kun rakenteen ympärillä on yhden kelvinin suuruinen lämpötilaero (U-arvo) [W/(m ² K)].
Lämpötila	Termodynaaminen tilasuure, joka kuvaa systeemin sisäenergiatiheyttä [K]. Lämpötilan tarkka kineettinen tai termodynaaminen määritelmä on monimutkainen mutta yksi toimiva määritelmä on systeemin lämpötilaa mittaavan kuvitteellisen ideaalilämpömittarin lukema.
Lämpösäteily	Materiaalipinnan, jonka lämpötila on yli absoluuttisen nol-lapisteen, taipumus emittoida sähkömagneettista säteilyä, jonka seurauksena materiaali menettää sisäenergiaa ja siten jäähtyy. Pinta voi vastaavasti myös absorboida pintaan kohdistuvaa säteilyä, jolloin pinta lämpenee.
Lämpövirta	Kahden eri systeemin välillä tapahtuva lämpöenergian siirtymisnopeus ajan suhteen [W].
Ominaislämpökapasiteetti	Aineominaisuus, joka kuvaa dynaamisessa tilanteessa aineeseen siirtyvän lämpöenergian ja lämpötilan nousun suhdetta [J/(kg·K)].
Paine	Fluidin sisältämien molekyylien kineettisestä energiasta aiheutuva kiinteään pintaan kohdistuva voima pinta-alayksikköä kohti [N/m ²]. Fluidin sisällä mekaaninen paine määritellään infinitesimaalisen fluidielementin normaali-jännitysten keskiarvona.
Stationäärinen	Ajan suhteen muuttumaton.
Systeemi (termodyn.)	Mielivaltainen määrä ainetta, joka käyttäytyy määrätyllä tavalla.
Tasapainokosteus	Hygroskooppinen tasapainokosteus eli huokoisen materiaalin sitoman kosteuden määrä tilavuusyksikköä kohti kun huokosilman sisältämä vesihöyry, sitoutunut nestemäinen vesi ja kiinteä materiaali ovat termodynaamisessa tasapainossa [kg/m ³].

Viskositeetti

Fluidin aineominaisuus, joka kuvaa kykyä vastustaa leikkajännitysten aiheuttamien virtausgradienttien muodostumista [Pa·s].

MERKINNÄT

A	pinta-ala, [m ²]
C _p	lämpökapasiteetti vakiopaineessa, [J/K]
c _p	ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa, [J/(kg·K)]
C _v	lämpökapasiteetti vakiotilavuudessa, [J/K]
c _v	ominaislämpökapasiteetti vakiotilavuudessa, [J/(m ³ K)]
D _w	kosteusdiffusiviteetti, [m ² /s]
d	kerrospaksuus, [m]
E	systemin energia [J] tai sisäenergiatiheys [J/m ³]
e	kokonaisenergiatiheys, [J/kg]
F	voima, [N] tai tilavuusvoima, [N/m ³]
g	kosteusvirran tiheys, [kg/(m ² s)]
h	lämmönsiirtokerroin, [W/(m ² K)]
h _v	höyrystymislämpö, [J/kg]
I	säteilyintensiteetti, [W/m ²]
L	pituus tai paksuus, [m]
M	moolimassa, [kg/mol] tai homeindeksi, [-]
m	massa, [kg]
n	pinnan normaalisuuntainen yksikkövektori, [-]
n	ainemäärä, [mol]
p	kokonaispaine, [Pa]
p _v	vesihöyryn osapaine, [Pa]
Q	siirtynyt lämpö [J] tai lämpövirta [W]
q	lämpövirran tiheys, [W/m ²]
R	ideaalikaasvuvakio = 8,314 J/(mol·K)
s _d	vesihöyrynvastus, [m]
T	lämpötila, [K]
t	aika, [s]
V	virtausnopeusvektori = ui + vj + wk
V	tilavuus, [m ³]
W	mekaaninen työ, [J]
w	kosteuspitoisuus, [kg/m ³]

Kreikkalaiset kirjaimet:

α	absorptiokerroin, [-]
β	kosteudensiirtokerroin, [m/s]
γ	adiabaattivakio, [-]
γ _{ij}	fluidielementin ij-suuntainen kulmadeformaatio, [-]
δ _v	vesihöyryn läpäisevyys, [m ² /s]
ε	emissiviteetti, [-]
ε _i	fluidielementin i-suuntainen lineaarinen venymä, [-]
λ	lämmönjohtavuus, [W/(m·K)]
μ	vesihöyryn diffuusiovastuskerroin tai dynaaminen viskositeetti, [-]
v	vesihöyrypitoisuus, [kg/m ³]
ξ	ominaiskosteuskapasiteetti, [kg/m ³]
ρ	tiheys, [kg/m ³]
σ	Stefan-Boltzmannin vakio = 5,67 · 10 ⁻⁸ W/(m ² K ⁴)

τ_{ij}	fluidialkion ij-suuntainen jännitys, [Pa]
Φ	viskoosi dissipaatio, [W/m ³]
φ	suhteellinen kosteus, [-]
Ψ	avohuokoisuus, [-]

Operaattorit skalaarimuuttujalle F tai vektorimuuttujalle $\mathbf{F} = F_x\mathbf{i} + F_y\mathbf{j} + F_z\mathbf{k}$:

∇F	muuttujan F gradientti = $\mathbf{i} \frac{\partial F}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial F}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial F}{\partial z}$
$\nabla \cdot \mathbf{F}$	vektorin \mathbf{F} Divergenssi = $\left(\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \right)$
$\nabla^2 F$	Laplacen operaatio muuttujalle F = $\left(\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \right)$
\dot{F}	muuttujan F osittaisderivaatta ajan suhteen = $\frac{\partial F}{\partial t}$

Yleisimmät alaindeksit:

a	ilma
conv	konvektio
e	ulko
ef	tehollinen
mat	materiaali
p	paine
rad	säteily
s	pinta
sat	kyllästyskosteus
v	tilavuus
w	kosteus
v	vesihöyry

1 JOHDANTO

Tässä työssä on tarkasteltu laskennallisin keinoin uudella tavalla tuuletusuritetussa suurjulkisivuelementissä (kutsutaan tästä eteenpäin ainoastaan suurelementiksi) tapahtuvaa lämmön, kosteuden ja ilman siirtymistä tavoitteena määrittää kosteusteknisesti turvallisia ja samalla energiatehokkaita suurelementin avulla toteutettuja ulkoseinärakenteita.

Sekä korjaus- että uudisrakentamiseen tarkoitettu suurelementti koostuu itsekantavasta lämmöneristetyistä teräsrungosta, johon asennetaan tiivis, viistosateelta suojaava lisälämmöneristekerros, jonka ulkopintaan on liimattu vettä imemätön arkkitehtonisesti korkealaatuinen tiililaattakerros. Lisälämmöneristekerroksen ja teräsrungon väliin sijoitetaan lisäksi uritettu 50 mm paksu EPS- tai mineraalivillakerros, joka muodostaa koko rakennuksen julkisivun korkuisen yhtenäisen tuuletusurituksen. Suurelementti kiinnitetään aina olemassa olevaan joko uuteen tai vanhaan kivirakenteiseen kantavaan seinään. Suurelementin rakennetta on kuvailtu tarkemmin luvussa 3 ja suurelementin rakennepiirustukset on esitetty liitteessä 1. Tuuletusurituksen kuivattava vaikutus perustuu luonnolliseen konvektioon, joka aiheutuu painovoimasta sekä tuuletusilman ja ulkoilman välisestä lämpötilaerosta. Lämpötilaeron muodostuminen suurelementin tapauksessa perustuu lisälämmöneristekerroksen lämmönvastukseen, joka pitää kylminä kausina tuuletusilman lämpötilan useita celsiusasteita ulkoilmaa lämpimämpänä. Tuuletusuritukseen virratessaan lämpenevän ulkoilman kyllästysvesihöyrypitoisuus kasvaa, jolloin tuuletusilma pystyy kuljettamaan merkittävästi kosteutta pois rakenteesta vesihöyryn muodossa.

Lämpö-, kosteus- ja virtaustekniset tarkastelut suurelementille tehtiin yhdistäen eri laskentaohjelmien avulla saatuja tuloksia ja käsinlaskuja. Laskentatarkastelujen tuloksina saatiin rakenteiden toimintaa kuvaavia ajasta riippuvia lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoja, joiden perusteella arvioitiin erilaisissa tapauksissa kosteuden aiheuttaman vaurion riskiä suurelementissä. Toimivuuden arvioinnissa rakenteille asetettiin toimintakriteerit, joiden mukaan testiolosuhteissa rakenteisiin ei saanut laskentatulosten perusteella muodostua yli 1 kk pituista kondenssijaksoa tai homeen kasvulle otollisia olosuhteita siinä määrin, että rakenteisiin on mahdollista muodostua edes mikroskoopilla havaittavaa homeen kasvua.

Luvussa 2 on pyritty johtamaan lämmön, kosteuden ja ilman siirtymiseen liittyvät työn kannalta keskeiset differentiaaliyhtälöt siten, että differentiaali- ja integraalilaskennan perussäännöt tuntevan lukijan kannalta tekstin ymmärtämiseen vaadittava muu esittäminen olisi mahdollisimman pieni. Suurelementin rakennetta on kuvattu luvussa 3 sekä liitteessä 1. Luvuissa 4 ja 5 on esitetty tarkastelujen reunaehdot sekä suurelementin ominaisuuksista riippuvat laskentaperusteet. Luvussa 6 on esitetty laskentatarkastelujen tu-

lokset ja luvussa 7 on arvioitu tulosten luotettavuutta sekä koottu yhteenveto tutkimuksesta.

2 TEORIA

Rakennusfysiikalla tarkoitetaan soveltavaa insinööritiedettä, joka tutkii pääasiassa lämmön, kosteuden ja ilman siirtymistä ja niiden vaikutuksia rakenteisiin sekä rakennusten sisäilmaolosuhteisiin. Tässä työssä on tutkittu lämmön, kosteuden ja ilman siirtymistä eräissä julkisivurakenteissa ja pyritty tutkimustulosten avulla mitoittamaan samantyyppinen julkisivurakenne eri tapauksissa siten, että tutkittuihin rakenteisiin ei muodostu kosteudesta aiheutuvaa vaurioitumisriskiä. Lämmön, kosteuden ja ilman siirtyminen vaikuttavat kaikki toisiinsa ja ovat siten fysikaalisina ilmiöinä toisiinsa matemaattisesti kytkettyjä; tarkkaa analyysiä ainoastaan yhdestä ilmiöstä – lämmön, kosteuden tai ilman käyttäytymisestä – ei voida tehdä ottamatta samalla myös kahta muuta ilmiötä huomioon.

Tieteen nykykäsityksen mukaan aine koostuu alkeishiukkasista ja lämpö alkeishiukkasten kineettisestä energiasta, jolloin kaikki lämmön ja aineen siirtymisen mekanismit voidaan periaatteessa aina redusoida hiukkASFysiikan osa-alueiksi. Koska hiukkasten lukumäärä on rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa todella suuri, ainetta kannattaa tarkastella hiukkastason sijaan materiaalikontinuumina. Kontinuumimekaniikassa aine kuvataan avaruudellisena jatkumona, jonka sisällä fysikaalisia suureita voidaan kuvata matemaattisesti kenttäfunktioilla, joiden argumentteina ovat aina paikkakoordinaatit sekä ajasta riippuvissa tilanteissa aika. Riippuen tarkasteltavasta suureesta, kenttäfunktio voi palauttaa argumenttien perusteella skalaariarvon (esimerkiksi paine tai lämpötila), vektorin (esimerkiksi virtausnopeus) tai tensorin (esimerkiksi jännitystilä). Yhden tai useamman kenttäfunktion ratkaiseminen jossakin tunnetussa alueessa eli reuna-arvo-ongelma on tyypillinen ongelmatehtävä kontinuumimekaniikassa. Ratkaisemiseen tarvitaan aina tietoa kenttäfunktioihin liittyvistä fysiikan laeista (hallitsevat yhtälöt) sekä olosuhteista tarkasteltavan alueen reunoilla (reunaehdot). Tärkeät ominaisuudet, jotka edellytetään aina kontinuumimekaniikassa kaikille kenttäfunktioille, ovat jatkuvuus ja derivoituvuus koko alueessa, jonka ominaisuutta kenttäfunktio kuvaa.

Kontinuumimekaniikan lisäksi etenkin kaasujen termodynaamisissa tarkasteluissa tärkeä lähestymistapa on tilastollinen mekaniikka. Kaasun sisältämien hiukkasten ominaisuudet (muoto, massa ja hiukkasten välisten törmäysten kimmoisuus), vaikuttavat voimat ja liikeradat voidaan idealisoida tiettyjen yksinkertaistavien olettamusten mukaisiksi, jotka kuvaavat hypoteettista ns. ideaalikaasua. Yhdistämällä tilastomatemattisia menetelmiä sekä klassisen mekaniikan peruslakeja voidaan johtaa kineettinen kaasuteoria, joka selittää kaasujen makroskooppisia fysikaalisia suureita ja ominaisuuksia kuten paine, lämpötila, viskositeetti ja lämmönjohtavuus. Kineettisen kaasuteorian avulla on myös johdettavissa analyttisesti ns. ideaalikaasun tilayhtälö, jonka mukaan kaasumaisessa olomuodossa olevan partikkelisysteemin paine, lämpötila ja tilavuus ovat termodynaami-

sessä tasapainossa aina toisiinsa kytkettyjä. Ideaalikaasun tilayhtälö on tässä työssä keskeinen, sillä sen avulla otetaan huomioon lämpötilaeroista aiheutuva noste, joka aiheuttaa luonnollisen konvektion. Tässä työssä luonnollisen konvektion aiheuttamia ilmavirtauksia on tutkittu tuuletusuritetussa julkisivurakenteessa, jossa urituksen ja ulkoilman välissä on merkittävä lämmönvastus. Ideaalikaasujen tilayhtälöä ja luonnollista konvektiota on käsitelty luvuissa 2.1 ja 4.1.

Suurelementin rakennusfysikaalista toimintaa on tutkittu tässä työssä ratkomalla tietokoneavusteisesti numeerisin menetelmin kontinuumimekaniikan mukaisia lämmön ja kosteuden siirtymistä sekä virtausdynamiikkaa hallitsevia differentiaalisia yhtälöitä. Luvuissa 2.1–2.3 on johdettu työn kannalta tarpeelliset kontinuumimekaniikan mukaiset hallitsevat yhtälöt klassisen mekaniikan ja termodynamiikan lakeihin pohjautuen. Luvussa 2.4 on lähinnä sanallisesti kuvailtu työssä käytettyjen laskentaohjelmien toiminnan perustana olevia numeerisia menetelmiä, joista keskeisin on elementtimenetelmä.

2.1 Lämpö

2.1.1 Lämpöenergia ja ominaislämpökapasiteetti

Termodynamiikan ensimmäisen lain – energian säilymisen – mukaan minkä tahansa systeemin termodynaamisen tilan muuttuessa on voimassa [1]:

$$\Delta E = Q - W \quad (2.1.1)$$

missä ΔE = systeemin sisältämän energian muutos, [J]
 Q = systeemiin ympäristöstä siirtynyt lämpöenergia, [J]
 W = systeemin ympäristöönsä tekemä työ, [J]

Termodynaamisella systeemillä voidaan tarkoittaa periaatteessa mitä tahansa määrätysti käyttäytyvää mielivaltaista partikkelijoukkoa, mutta termodynamiikan lait ovat helpoiten ymmärrettävissä, kun systeemiksi ajatellaan niin pieni joukko partikkeleita, että lämpötila ja paine voidaan olettaa vakioksi koko systeemin alueella. Systeemin sisältämien partikkeleiden kokonaisenergia koostuu mekaanisesta energiasta (systeemin kokonaismassan kineettinen energia ja potentiaalienergia) ja sisäenergiasta. Tämän työn kannalta voidaan olettaa, että tarkasteltavien systeemien mekaaninen energia on vakio ja energian säilymisessä voidaan siten tarkastella ainoastaan sisäenergian muutoksia. Sisäenergia voidaan edelleen jakaa osiin, jotka ovat lämpöenergia (molekyyliden kineettinen energia mikrokooppisella tasolla), latentti energia (molekyyliden välisten vetovoimien vaikutus aineen faasimuutoksissa sitoutuvaan tai luovuttamaan energiaan), kemiallinen energia (kemiallisten sidosten sisältämä energia) ja ydinenergia (atomiytimien sisäinen energia). Tämän työn kannalta edelleen voidaan jättää huomiotta kemiallinen energia ja ydinenergia. Johdettaessa ominaislämpökapasiteetin määritelmää myöskään latentilla energialla ei ole merkitystä. Latentti energia vaikuttaa kuitenkin merkittävästi tutkittaessa energian säily-

mistä kosteuden siirtyessä huokoisessa aineessa (ks. luku 2.2.4). Systeemin sisältämällä energialla tarkoitetaan tästä eteenpäin tässä luvussa ainoastaan sisäenergiaa, joka koostuu ainoastaan lämpöenergiasta. Yhtälö 2.1.1 on voimassa aina riippumatta partikkeleista muodostuvan aineen olomuodosta. Systeemin kokiessa vakio paineen vallitessa infinitesimaalisen tilavuuden muutoksen voidaan infinitesimaalinen työ dW määrittellä klassisen mekaniikan mukaisesti [2]:

$$dW = pdV \quad (2.1.2)$$

missä p = paine, $[N/m^2]$
 dV = tilavuuden infinitesimaalinen muutos, $[m^3]$

Integroimalla yhtälö 2.1.2 puolittain saadaan systeemin tekemäksi työksi tilamuutoksen aikana:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} pdV \quad (2.1.3)$$

Tilalla (*state*) tarkoitetaan termodynamiikassa systeemiä koskevien kaikkien tilasuureiden (*state variables*) joukkoa jollakin ajan hetkellä. Suljetulle systeemille, jossa systeemin ainemäärä ei muutu, tilasuureet paine, tilavuus ja lämpötila eivät ole toisistaan riippumattomia, vaan niille on aina voimassa tilayhtälö, joka yleisessä muodossa on [2]:

$$f(p, V, T) = 0 \quad (2.1.4)$$

missä V = systeemin tilavuus, $[m^3]$
 T = lämpötila, $[K]$

Tunnettaessa systeemin tilayhtälö, mitkä tahansa kaksi suuretta kolmesta funktion muuttujista määrittävät systeemin tilan. Esimerkiksi pelkästään ideaalikaasusta koostuvalle suljetulle systeemille on voimassa tilayhtälö:

$$pV - nRT = 0 \quad (2.1.5)$$

missä n = ainemäärä, $[mol]$
 R = ideaalikaasuvakio = $8,31446 J/(mol \cdot K)$

Ideaalikaasun tilayhtälö on alun perin löydetty kokeellisiin havaintoihin perustuen, mutta se voidaan myös johtaa idealisoidulle partikkelisysteemille analyttisesti klassisen mekaniikan lakeja soveltamalla. Yhdistämällä yhtälöt 2.1.3 ja 2.1.5 saadaan:

$$W = RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = RT \cdot \log\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (2.1.6)$$

Mikäli systeemin tilamuutoksessa ei tapahdu tilavuuden muutosta ($V_2 = V_1$), puhutaan isokoorisesta muutoksesta ja silloin systeemi ei tee ollenkaan työtä ($W = 0$). Energian muutos tilojen välillä seuraa ainoastaan lämmön siirtymisestä:

$$\Delta E = Q \quad (2.1.7)$$

Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa, joissa tutkitaan lämmön varastoitumista kiinteissä aineissa, muutokset voidaan olettaa käytännössä aina isokoorisiksi, koska työtä muutoksen aikana aiheuttaa ainoastaan lämpölaajenemisesta aiheutuva tilavuuden muutos, jonka vaikutus voidaan olettaa merkityksettömäksi. Kiinteille aineille voidaan siten käyttää ominaislämpökapasiteettia sekä vakiotilavuudessa että vakiopaineessa. Systeemin kokiesä infinitesimaalisen tilamuutoksen voidaan kirjoittaa:

$$\begin{aligned} dE + dW &= dQ \\ dE + pdV &= dQ \end{aligned} \quad (2.1.8)$$

Olettaen, että lämpötila ja tilavuus ovat toisistaan itsenäisiä muuttujia, derivoinnin ketjusäännöstä johdettava kokonaisdifferentiaali systeemin sisäenergialle on:

$$dE = \frac{\partial E}{\partial T} dT + \frac{\partial E}{\partial V} dV \quad (2.1.9)$$

joka sijoitetaan yhtälöön 2.1.8:

$$\frac{\partial E}{\partial T} dT + \left[\frac{\partial E}{\partial V} + p \right] dV = dQ \quad (2.1.10)$$

Tilavuuden pysyessä vakiona ($dV = 0$) määritellään systeemin lämpökapasiteetti C_v [J/K] vakiotilavuudessa jakamalla yhtälö 2.1.10 dT :llä:

$$C_v = \frac{dQ}{dT} = \frac{\partial E}{\partial T} \quad (2.1.11)$$

Lämpökapasiteetti kuvaa määritelmänsä mukaan systeemin absorboiman lämpöenergian suhdetta absorptiosta aiheutuvaan lämpötilan muutokseen ja se määritetään kokeellisesti. Jakamalla C_v systeemin tilavuudella V [m^3] saadaan aineominaisuutta kuvaava ominaislämpökapasiteetti c_v [J/(m^3K)].

Lämpöenergian varastoitumisessa kaasun sisäenergiaksi on otettava huomioon kaasun lämpötilan noususta aiheutuva tilayhtälön mukainen laajeneminen ja sitä kautta kaasun tekemä työ ympäristöään vastaan. Työn osuus energian säilymisessä voidaan yleensä ottaa huomioon rakennusfysikaalisissa laskelmissa käyttämällä ilmalle ominaislämpökapasiteettia massan suhteen vakiopaineessa c_p [J/(kg·K)]. Kokeellisesti on havaittu, että lämpötilan vaikutus lämpökapasiteettiin C_v vakiotilavuudessa on hyvin pieni, jolloin ideaalikaasusta koostuvan systeemin sisäenergian määrä voidaan laskea kaavalla:

$$E = C_v T \quad (2.1.12)$$

Differentioimalla yhtälö 2.1.12 ja yhdistämällä se yhtälön 2.1.8 kanssa saadaan:

$$C_v dT + p dV = dQ \quad (2.1.13)$$

Differentioimalla ideaalikaasun tilayhtälö (yhtälö 2.1.5) saadaan:

$$p dV + V dp = n R dT \quad (2.1.14)$$

Eliminoimalla $p dV$ yhtälöistä 2.1.13 ja 2.1.14 saadaan:

$$(C_v + nR) dT - V dp = dQ \quad (2.1.15)$$

Systeemin lämpökapasiteetti vakiopaineessa ($dp = 0$) määritellään jakamalla yhtälö 2.1.15 puolittain dT :llä:

$$C_p = \frac{dQ}{dT} = C_v + nR \quad (2.1.16)$$

Vaikka esimerkiksi ilma on todellisuudessa ideaalikaasun sijaan monimutkaisesti käyttäytyvä reaalikaasu, ideaalikaasun tilayhtälö kuvaa riittävän tarkasti rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa ilman käyttäytymistä. Ilman tiheys ja moolimassa määritellään seuraavasti:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1.17)$$

$$M = \frac{m}{n} \quad (2.1.18)$$

missä ρ = tiheys, [kg/m³]
 m = systeemin massa, [kg]
 M = moolimassa, [kg/mol]

Ilman aineominaisuutta kuvaaville ominaislämpökapasiteeteille c_v [J/(m³K)] ja c_p [J/(kg·K)] saadaan laskettua arvot, kun tunnetaan ilman ominaiskaasuvakio ja ns. adiabaattivakio γ . Tarkastellaan yhtä moolia ilmaa, joka on 20 °C lämpötilassa ja normaali-ilmanpaineessa 101325 Pa. Sijoittamalla ideaalikaasun tilayhtälöön tiheyden määrittely saadaan ilman tiheys paineen ja lämpötilan funktiona:

$$\begin{aligned}
 p \frac{m}{\rho} &= nRT \\
 \rightarrow \frac{p}{\rho} &= \frac{n}{m} RT \\
 \rightarrow \frac{p}{\rho} &= \frac{RT}{M_a} \\
 \rightarrow \rho(p, T) &= \frac{p}{R_a T} = \frac{101325}{287,058 \cdot 293,15} \text{ kg/m}^3 = 1,204 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}
 \tag{2.1.19}$$

missä M_a = keskimääräinen kuivan ilman moolimassa = 0,029 kg/mol
 R_a = R/M_a = ilman ominaiskaasuvakio = 287,058 J/(kg·K)

Ilmamoolin massa NTP-olosuhteissa on:

$$m = nM_a = n \frac{R}{R_a} = \frac{R}{R_a} = 0,02896 \text{ kg}
 \tag{2.1.20}$$

Tilavuus, jonka yksi mooli täyttää on:

$$V = \frac{m}{\rho} = 0,02405 \text{ m}^3
 \tag{2.1.21}$$

Adiabaattivakio eli ominaislämpökapasiteettien C_p ja C_v suhde NTP-olosuhteissa ilmalle (ja kaikille kaksiatomisille kaasuille) on [3]:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,4
 \tag{2.1.22}$$

Yhtälö 2.1.22 sijoitetaan yhtälöön 2.1.16:

$$1,4C_v = C_v + R$$

$$\rightarrow C_v = \frac{R}{(1,4 - 1)} = 20,79 \text{ J/K} \quad (2.1.23)$$

ja jaetaan tulos tilavuudella (yhtälö 2.1.21):

$$c_v = \frac{C_v}{V} = \frac{20,79}{0,02405} \frac{\text{J}}{\text{m}^3 \text{K}} \approx 864 \frac{\text{J}}{\text{m}^3 \text{K}} \quad (2.1.24)$$

Ominaislämpökapasiteetti c_p vakiopaineessa massan suhteen saadaan myös:

$$c_p = \frac{C_p}{m} = \frac{1,4C_v}{m} = \frac{1,4 \cdot 20,79}{0,02896} \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \approx 1005 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad (2.1.25)$$

Ominaislämpökapasiteettia c_p käytetään tarkasteluissa, joissa lämpiävä ilma pääsee vapaasti laajenemaan, jolloin se tekee työtä ympäröivää vakiopainetta vastaan. Osa siirtyneestä lämpöenergiasta kuluu tähän työhön. Jos ilma on suljettu hermeettiseen säiliöön ja lämpötila kasvaa, ilma ei tee työtä, sillä tilavuus pysyy vakiona. Tällöin paine kuitenkin kasvaa säiliössä.

2.1.2 Lämmön siirtyminen

Lämpö voi siirtyä systeemin ja ympäristön välillä tai systeemin sisällä kolmella eri mekaniismilla, jotka ovat johtuminen, lämpösäteily ja konvektio.

Johtuminen

Kuvitellaan systeemi, joka on pyritty eristämään ympäristöstä kiinteästä ja läpinäkymättömästä aineesta koostuvalla seinällä, jonka läpi lämpö ei pääse siirtymään konvektiolla tai säteilyllä. Seinän on koostuttava kuitenkin jostakin todellisesta aineesta, joka koostuu riippuen aineen olomuodosta joko värähtelevistä ja keskenään törmäilevistä molekyyleistä. Kineettisen energian tasaantuminen vierekkäisten molekyylien välillä on fysikaalisen vuorovaikutuksen takia väistämätöntä. Tämä lyhyesti kuvattu sisäenergian siirtyminen mikroskooppisella tasolla on hiukan erilainen ilmiö kaasuisissa, nesteissä ja kiinteissä aineissa, mutta sitä kutsutaan olomuodosta riippumatta johtumiseksi. Johtumisesta aiheutuvan lämpövirran tiheys karteesisen koordinaattien x -suunnassa on Joseph Fourierin (1768–1830) esittämän havaintoihin perustuvan kaavan mukaan:

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.1.26)$$

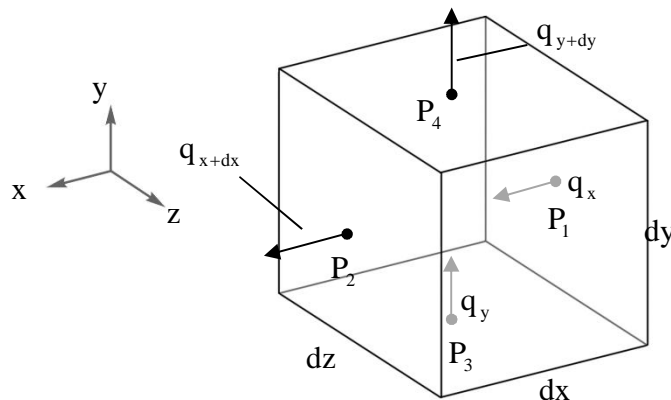
missä q_x = johtumisesta aiheutuvan lämpövirran tiheys x-suunnassa, [W/m²]
 λ = aineen lämmönjohtavuus, [W/(m·K)]

Yhtälö 2.1.11 on voimassa myös y- ja z-suunnille, joten Fourierin laki vektorimuodossa on:

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T \quad (2.1.27)$$

missä ∇ = gradientti = $\mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z}$

Kuvassa 2.1.1 on esitetty infinitesimaalinen kontrollitilavuus ja lämpövirran tiheydet sen reunoilla. Kontrollitilavuudella tarkoitetaan kuvitteellisen pinnan sulkemaa tilavuutta, jonka rajapinnan läpi voi virrata vapaasti ainetta tai energiaa. Kuvassa on tilan säästämiseksi näytetty ainoastaan x- ja y-suuntaiset lämpövirran tiheyden vektorikomponentit.



Kuva 2.1.1 Lämpövirran tiheydet kontrollitilavuuden $dx dy dz$ reunoilla.

Määriteltäessä lämpövirran tiheys q_x jossakin pisteessä (x,y,z) , Taylorin sarjan approksimaation mukainen lämpövirran tiheys q_{x+dx} pisteessä $(x+dx,y,z)$ on:

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx + \frac{\partial^2 q_x}{\partial x^2} \cdot \frac{(dx)^2}{2!} + \dots \quad (2.1.28)$$

Koska dx on infinitesimaalisen pieni, dx :n korkeammat potenssit voidaan olettaa mitätömiksi, jolloin tarkastelua voidaan jatkaa olettamalla, että:

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (2.1.29)$$

Summaamalla kontrollitilavuuteen virtaavat ja kontrollitilavuudesta pois virtaavat lämpövirrat saadaan johtumisesta aiheutuvaksi energian kasvuksi ajan suhteen (aikaderivaattaa merkitään pisteellä suuremerkin yläpuolella):

$$\begin{aligned}\dot{E} &= q_x \cdot dydz + q_y \cdot dxdz + q_z \cdot dxdy \\ &- \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) \cdot dydz - \left(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \right) \cdot dxdz - \left(q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \right) \cdot dxdy \\ \dot{E} &= - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \cdot dxdydz \\ \dot{E} &= -(\nabla \cdot \mathbf{q}) \cdot dxdydz\end{aligned}\tag{2.1.30}$$

missä merkintä $\nabla \cdot \mathbf{F} =$ vektorifunktion $\mathbf{F}(x,y,z)$ divergenssi $= \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z}$

Toisaalta kontrollitilavuuden sisältämän lämpöenergian kasvu voidaan esittää lämpötilan muutoksen ja ominaislämpökapasiteetin avulla:

$$\dot{E} = \left(c_v \frac{\partial T}{\partial t} \right) \cdot dxdydz\tag{2.1.31}$$

Yhdistämällä yhtälöt 2.1.30 ja 2.1.31 ja jakamalla saatu yhtälö tilavuudella $dxdydz$ saadaan:

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -(\nabla \cdot \mathbf{q})\tag{2.1.32}$$

Sijoitetaan yhtälöön 2.1.17 vielä Fourierin laki (yhtälö 2.1.27), jolloin saadaan yleisessä muodossa lämmön johtumista kuvaava lämpöyhtälö:

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T)\tag{2.1.33}$$

Lämmönjohtavuuden ollessa vakio, yhtälö supistuu yksinkertaisempaan muotoon:

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T\tag{2.1.34}$$

missä $\nabla^2 = \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z^2}$

Lämpösäteily

Lämpösäteily (tästä eteenpäin kutsutaan ainoastaan säteilyksi) on säteilylajiltaan samanaista kuin esimerkiksi näkyvä valo eli kaikkialla vallitsevan sähkömagneettisen kentän värähtelyn aaltomaista etenemistä valon nopeudella. Säteily koostuu nykytietämyksen mukaan yksittäisistä valon nopeudella etenevistä energiaa kuljettavista säteilykvanteista eli fotoneista. Fotonien lukumäärä kaikkialla on kuitenkin todella suuri, jolloin lämmönsiirron kannalta säteilyä voidaan tarkastella matemaattisesti jatkuvana aaltoliikkeenä. Jokainen pinta, jonka lämpötila on korkeampi kuin absoluuttinen nolapiste emittoi fotoneja tietyllä tiheydellä, joka riippuu pinnan ominaisuuksista ja lämpötilasta. Jokainen pinta emittoi säteilyä Stefan-Boltzmannin lain mukaisesti [1]:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (2.1.35)$$

missä E = pinnan emittoima säteilyteho, [W/m^2]
 ε = pinnan emissiviteetti, [-]
 σ = Stefan-Boltzmannin vakio = $5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
 T_s = pinnan lämpötila, [K]

Idealin ns. mustan kappaleen emissiviteetti on 1 ja todellisten pintojen emissiviteettien arvot ovat välillä 0...1. Säteilyemission seurauksena pinta jäähtyy, sillä emittoituva säteilyenergia on peräisin materiaalin sisäenergiasta. Pinta voi myös absorboida muualta tulevaa säteilyä, jolloin pinta lämpenee teholla:

$$q_{\text{rad}} = \alpha \cdot I_{\text{rad}} \quad (2.1.36)$$

missä q_{rad} = säteilystä absorboituva lämpöteho, [W/m^2]
 α = pinnan absorptiokerroin, [-]
 I_{rad} = pintaan kohdistuvan säteilyn intensiteetti, [W/m^2]

Rakennusfysikaalisella lämpötila-alueella pintojen emittoima säteily on näkymätöntä, pitkäaaltoista infrapunasäteilyä, jossa yksittäisen fotonin kantama energia on pienempi verrattuna lyhytaaltoiseen säteilyyn kuten esimerkiksi näkyvään valoon. Säteilyn aallonpituuden perusteella ei kuitenkaan voi laskea säteilyn intensiteettiä. Rakennusfysiikassa usein keskeisin säteilyn vaikutus on auringon säteilyllä, joka on lyhytaaltoista säteilyä. Auringon säteilyn matkatessa ilmakehän yläosista kohti maan pintaa osa säteilystä absorboituu ilmakehään ja osa siroaa ilmakehän partikkeleista ns. diffuusiksi säteilyksi maan pinnalle. Diffuusin säteilyn vaikutus maan pinnalla oleviin pintoihin on käytännössä yhtä suuri lähekkäisille pinnoille, riippumatta niiden kallistus- tai suuntakulmista. Ilmakehän absorboimatonta ja siroamatonta auringon säteilykomponenttia nimitetään suoraksi säteilyksi ja auringon paistaessa sen intensiteetti on suurin ilmakehän säteilykomponenteista.

Suoran säteilyn intensiteetti riippuu ajan hetkestä, pinnan sijainnista maapallolla, asennosta sekä taivaan pilvisyydestä. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa käytetään nykyään usein säädätiedostoja, joissa on tyypillisesti tunnin tarkkuudella ilmoitettu mitattua tai generoitua tietoa suoran ja diffuusin säteilyn intensiteeteistä. Suora säteily ilmoitetaan säädatoissa intensiteettinä sädettä kohtisuoraan olevaa pintaa vastaa, josta voidaan laskea kallistus- ja suuntakulman avulla tarkasteltavaa pintaa vastaan kohtisuora komponentti. Tätä arvoa voidaan käyttää yhtälössä 2.1.36.

Auringon säteilyn lisäksi rakenteiden ulkopintoihin vaikuttaa pitkäaaltoinen säteilytase, eli ulkopinnan emittoiman ja absorboiman pitkäaaltoisen säteilyn nettovaikutus. Pintaan kohdistuva pitkäaaltoinen säteily emittoituu ilmakehän partikkeleista sekä maan pinnalla olevista kappaleista. Säädätiedostoissa ilmoitetaan nykyään usein myös pitkäaaltoisen säteilyn komponentteja, jolloin pitkäaaltoinen säteilytase pinnan ja ympäristön välillä voidaan laskea kaavojen 2.1.35 ja 2.1.36 avulla.

Rakennusten tai rakenteiden sisällä kahden toisensa näkevän yhdensuuntaisen pinnan välille muodostuu lämpötilaeron vallitessa myös aina pitkäaaltoinen säteilytase. Pintojen välinen säteilystä aiheutuva lämpövirran tiheys voidaan laskea kaavalla:

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.1.37)$$

missä T_i = pinnan i lämpötila, [K]

ε_{12} = pintojen yhdistetty emissiviteetti [-], joka ratkaistaan yhtälöstä:

$$\frac{1}{\varepsilon_{12}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \quad (2.1.38)$$

missä ε_i = pinnan i emissiviteetti, [-]

Tarkasteltaessa kahden keskenään erisuuntaisten tai riittävän etäällä toisistaan olevien yhdensuuntaisten pintojen välistä säteilytasetta, tulee ottaa huomioon ns. näkyvyyskerroimet, joiden laskemista ei kuitenkaan käsitellä tässä työssä.

Konvektio

Lämpö siirtyy konvektiolla, kun aineen sisäenergia kuljettuu virtauksen mukana. Tällöin pelkästään Fourierin laista johdettu lämpöyhtälö ei riitä yksin kuvaamaan lämmönsiirtoa. Tarkka konvektion huomioon ottaminen lämmönsiirrossa edellyttää virtauskentän tuntemista, jonka selvittäminen on virtausdynamiikan tehtävä. Virtausdynamiikka on yksi teknillisen fysiikan tärkeimmistä osa-alueista, mutta valitettavasti myös yksi haastavimmista sekä matemaattisesti että mittausteknisesti. Tilannetta vaikeuttaa edelleen se, että paine ja lämpötila eivät ole toisistaan riippumattomia suureita (kuten luvussa 2.1.1 esitettiin), jolloin esimerkiksi luonnollista konvektiota tutkittaessa virtaus- ja lämpötilakenttä kaasussa

on ratkaistava yhtäaikaisesti. Se on kuitenkin äärellisellä tarkkuudella mahdollista tietokoneavusteisesti älykkäillä numeerisilla menetelmillä. Tässä työssä yhdistettyjä lämmönsiirron ja virtausdynamiikan simuloiteja tehtiin COMSOL Multiphysics -laskentaohjelmalla, jolla voidaan ratkaista lämpötila- ja virtauskenttä tutkittavassa alueessa siten, että energian, massan ja liikemäärän säilymisytälöt differentiaalisessa muodossa toteutuvat keskimääräisesti koko alueessa. Massan ja liikemäärän säilymislait virtauksessa on johdettu luvussa 2.3 ja energian säilyminen ei-isotermisessä virtauksessa luvussa 2.4.

Tutkittaessa sisä- ja ulkoilman toisistaan eristävän rakenteen (esimerkiksi ulkoseinän) lämmönsiirtoa, rakennetta ympäröivän ilmatilan voidaan usein olettaa olevan molemmin puolin suuri ja täysin sekoittunut eli se voidaan olettaa rakenteen lämmönsiirron kannalta vakioksi. Konvektiolla on keskeinen osa rakenteen pinnan ja ilman välisessä lämmönsiirrossa, jolle pätee Newtonin jäähtymislaki (ks. kuva 2.1.2):

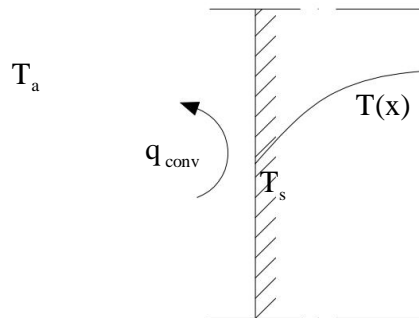
$$q_{\text{conv}} = h_{\text{conv}} (T_s - T_a) \quad (2.1.39)$$

missä q_{conv} = konvektion aiheuttama lämpövirran tiheys pinnan ja ilman välillä, $[\text{W}/\text{m}^2]$

h_{conv} = pinnan ja ilman välinen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, $[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$

T_s = pinnan lämpötila, $[\text{K}]$

T_a = ilman lämpötila, $[\text{K}]$



Kuva 2.1.2 Esimerkki lämpötilakentästä konvektion huuhtoman pinnan lähellä.

Konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen α_{conv} arvo riippuu pintaan kohdistuvan virtauksen suunnasta ja voimakkuudesta. Jotkut laskentaohjelmat hyödyntävät säädatoissa ilmoitettuja tuulen suuntia ja nopeuksia rakenteen ulkopinnan konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen laskemiseen.

2.2 Kosteus

2.2.1 Vesihöyry

Ilman voidaan ajatella olevan kaasuseos, joka koostuu ainoastaan kuivasta ilmasta ja vesihöyrystä, joka on vettä kaasumaisessa olomuodossa. Vesihöyryn määrää ilmassa voidaan kuvata kahdella eri suureella: vesihöyrypitoisuudella v [g/m^3] tai vesihöyryn osapaineella p_v [Pa]. Vesihöyrypitoisuuden arvo kuvaa suoraan kuinka monta grammaa vesihöyryä yksi kuutiometri ilmaa sisältää. Vesihöyryn osapaine kuvaa vesihöyryn osuutta vallitsevassa kokonaispaineessa Daltonin osapaineiden lain mukaisesti [1]:

$$p = p_a + p_v \quad (2.2.1)$$

missä p = kokonaispaine, [Pa]
 p_a = kuivan ilman osapaine, [Pa]
 p_v = vesihöyryn osapaine, [Pa]

Vesihöyryn osuus kokonaispaineesta on rakennusten sisäilmassa hyvin pieni eikä esimerkiksi huoneessa höyrystyvä vesi muuta käytännössä huoneessa vallitsevaa kokonaispainetta. Lämpötilan pysyessä vakiona mutta vesihöyryn osapaineen kasvaessa esimerkiksi veden pinnassa tapahtuvan höyrystymisen seurauksena vesimolekyylien määrä kasvaa, jolloin vesimolekyylien keskinäinen etäisyys pienenee. Vesihöyryn osapaineen kasvaessa tarpeeksi vesimolekyylien keskinäiset vetovoimat alkavat aiheuttaa molekyylien toisiinsa takertumista, jonka seurauksena osa vesihöyrystä alkaa muuttua vesipisaroiksi. Ilmiötä kutsutaan vesihöyryn kondensoitumiseksi eli tiivistymiseksi. Vesihöyryn osapainetta, jossa kondensoituminen alkaa, nimitetään kyllästysosapaineeksi $p_{v,\text{sat}}$, jota suuremmaksi vesihöyryn osapaine ei voi tavanomaisissa olosuhteissa nousta.

Mitä suurempi nopeus vesimolekyyleillä on, sitä epätodennäköisempää kahden vesimolekyylin toisiinsa takertuminen on. Koska vesimolekyylien nopeus riippuu paineen lisäksi myös lämpötilasta, kyllästysosapaine riippuu vahvasti lämpötilasta. Kyllästysosapainetta ei voida määrittää analyttisesti lämpötilan funktiona, mutta sille on olemassa kokeellisesti määritettyjä kaavoja. Standardissa DIN 4108-5 on esitetty normaali-ilmanpaineessa vesihöyryn kyllästysosapaineelle kaava [4]:

$$p_{v,\text{sat}} = a \left(b + \frac{\theta}{100} \right)^n \quad (2.2.2)$$

missä $p_{v,\text{sat}}$ = vesihöyryn kyllästysosapaine, [Pa]
 θ = lämpötila celsiusasteina, [°C]
 $a = 288,68$, $b = 1,098$ ja $n = 8,02$ kun $0 \text{ °C} \leq \theta \leq 30 \text{ °C}$
 $a = 4,689$, $b = 1,486$ ja $n = 12,3$ kun $-20 \text{ °C} \leq \theta < 0 \text{ °C}$

Tunnettaessa vesihöyryn osapaine ja lämpötila, voidaan ideaalikaasulaista johtaa analyytinen kaava vesihöyrypitoisuudelle:

$$v = \frac{M_w p_v}{RT} \quad (2.2.3)$$

missä v = vesihöyrypitoisuus, [g/m³]
 M_w = veden moolimassa, 18,02 g/mol
 R = yleinen kaasuvakio, 8,3143 J/(mol·K)

Suhdelukua ϕ [-] nimitetään suhteelliseksi kosteudeksi ja sillä ilmoitetaan vallitsevan vesihöyryn osapaineen ja vallitsevan lämpötilan mukaisen kyllästysosapaineen suhde:

$$\phi = \frac{p_v}{p_{v,sat}} = \frac{v}{v_{sat}} \quad (2.2.4)$$

missä v_{sat} = vesihöyryn kyllästyspitoisuus, [g/m³]

Suhteellinen kosteus ilmoitetaan tyypillisesti prosentteina eli kertomalla ϕ 100 %:lla, jolloin yksikkönä käytetään merkintää % RH.

Päinvastainen ilmiö kondensoitumiselle on höyrystyminen, jossa nestemäisen veden ja ilman rajapinnassa siirtyvien vesimolekyylien nettovirran suunta on nesteestä ilmaan. Ilmiö vaatii energiaa vettä koossa pitävien sisäisten vetovoimien voittamiseksi. Ilman massasta on suurin osa kuivaa ilmaa, joka ei tunkeudu vesipinnan läpi mutta välittää vesipinnan ja ilman välisissä molekyylitörmäyksissä lämpöenergiaa. Osa välittyneestä lämpöenergiasta kuluu vesimolekyylien irrottamiseen. Suurin osa höyrystyneistä – eli nesteestä karanneista – molekyyleistä palaa lopulta takaisin vesipintaan ja mitä suuremmaksi vesihöyryn osapaine nousee aivan vesipinnan yläpuolella, sitä suurempi osa höyrystyneistä molekyyleistä palaa takaisin veteen. Kun vesipinnan yläpuolella oleva ilma on saavuttanut kyllästyskosteuden, höyrystyvien ja veteen takaisin tiivistyvien molekyylitörmäyksen nettovirta on nolla. Tämä tasapaino asettuu vesipinnan ja pinnan lähellä olevan ilman välille hyvin nopeasti ja voidaan olettaa, että aivan vesipinnan yläpuolella olevan ilman suhteellinen kosteus on aina hyvin lähellä arvoa 100 % RH.

Veden höyrystymislämpö h_v NTP-olosuhteissa on noin 2260 kJ/kg. Energiaa vapautuu lämmöksi ympäristöön samassa suhteessa myös vesihöyryn kondensoituessa. Veden höyrystymisenergian arvo on suuri ja siksi höyrystymisellä on voimakas kosteita pintoja jäähdyttävä vaikutus ja pinnan kuivumisnopeuden määrää usein käytännössä lämmön siirtymisnopeus. Veden haihtuminen jonkin materiaalin pinnalta ympäröivään ilmaan voidaan laskea kaavalla:

$$g_{\text{evap}} = \beta \cdot (v_s - v_a) \quad (2.2.5)$$

missä g_{evap} = haihtuvan kosteuden kosteusvirran tiheys, $[\text{g}/(\text{m}^2\text{s})]$
 β = pinnan kosteudensiirtokerroin, $[\text{m}/\text{s}]$
 v_s = pinnan vesihöyrypitoisuus, $[\text{g}/\text{m}^3]$
 v_a = ympäröivän ilman vesihöyrypitoisuus, $[\text{g}/\text{m}^3]$

Vapaalle veden pinnalle v_a on vallitsevaa lämpötilaa vastaava vesihöyryn kyllästyspitoisuus. Koska haihtumisen nopeus riippuu käytännössä siitä, kuinka nopeasti ilmasta pintaan siirtyy energiaa, joka irrottaa vesimolekyyliä nesteestä ilmaan höyryksi, kosteudensiirtokerroin riippuu pinnan konvektiivisesta lämmönsiirtokertoimesta. Kosteudensiirtokerroin lasketaan Lewisin kaavalla [5]:

$$\beta = \frac{h_{\text{conv}}}{\rho_a c_{pa}} \quad (2.2.6)$$

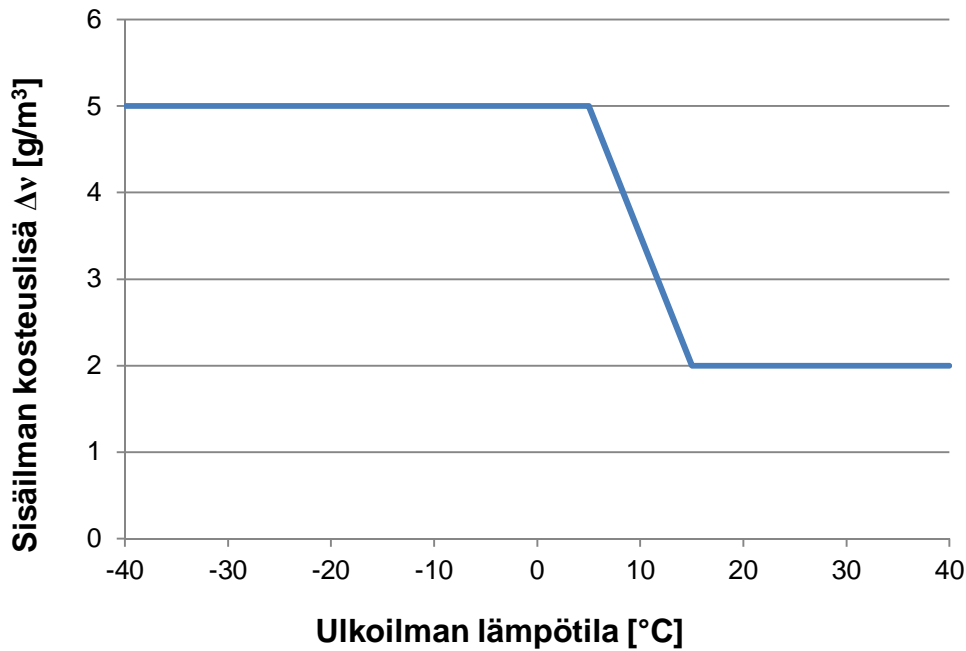
missä β = kosteudensiirtokerroin, $[\text{m}/\text{s}]$
 ρ_a = ilman tiheys, $[\text{kg}/\text{m}^3]$
 c_{pa} = ilman ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa, $[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$

Jotta haihtuminen on mahdollista, ympäröivästä ilmasta ja nesteestä on yhteensä virrattava lämpöä haihtumispintaan:

$$q_{\text{evap}} = h_v g_{\text{evap}} \quad (2.2.7)$$

missä q_{evap} = haihtumiseen kuluva lämpöteho, $[\text{W}/\text{m}^2]$

Rakenteiden kosteusteknisissä tarkasteluissa tarvitaan usein reunaehdoksi tieto sisäilman vesihöyrypitoisuudesta, jota arvioidaan tyypillisesti sisäilman kosteuslisän Δv $[\text{g}/\text{m}^3]$ avulla. Kosteuslisä kuvaa kuinka paljon sisäilmassa on vesihöyryä enemmän ulkoilman vesihöyrypitoisuuteen nähden. Sisäilman vesihöyrypitoisuus määräytyy ulkoilman vesihöyrypitoisuudesta, ilmanvaihdosta ja sisätiloissa tapahtuvasta kosteustuotosta. Kosteuslisälle on olemassa tilastollisiin tutkimuksiin perustuvia suunnittelukäyriä, joissa Δv :n arvo riippuu ulkoilman lämpötilasta. Esimerkiksi asuinrakennuksille esitetään lähteessä [6] kuvan 2.2.2 mukainen sisäilman kosteuslisä ulkoilman lämpötilan funktiona.



Kuva 2.2.2 Oppaan RIL 107-2012 mukainen sisäilman kosteuslisä asuinrakennuksissa.

Sisäilman suhteellinen kosteus voidaan laskea kaavoilla 2.2.2–2.2.4 kun tunnetaan ulkoilman olosuhteet, kosteuslisä ja sisäilman lämpötila.

2.2.2 Kosteuspitoisuus

Huokoisten materiaalien kosteuspitoisuudella w tarkoitetaan materiaalin sisältämän veden massaa materiaalin tilavuusyksikköä kohti [kg/m^3]. Materiaalin avohuokoisuudella Ψ tarkoitetaan avoimen huokostilavuuden osuutta koko materiaalin tilavuudesta eli sen yksikkö on joko m^3/m^3 tai dimensioton [-]. Kun avohuokoinen materiaali on kokonaan vedellä kyllästetty, sen huokokset sisältävät pelkästään vettä ja kosteuspitoisuus on tällöin:

$$w_{\text{sat}} = \rho_w \cdot \Psi \quad (2.2.8)$$

missä w_{sat} = kyllästyskosteuspitoisuus, [kg/m^3]
 ρ_w = veden tiheys = $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$

Kosteuden siirtyessä pois vedellä kyllästetystä materiaalista, siirtyvän veden tilavuuden korvaa ilma. Materiaalin huokosten seinämät muodostuvat kiinteästä aineesta, joka pyrkii sitomaan vesimolekyylejä huokosseinämiä vasten. Huokosilman ollessa kontaktissa huokosseinämiin sitoutuneen kosteuden kanssa tapahtuu aina höyrystymistä ja tiivistymistä, jossa vesihöyry ja kosteus pyrkivät asettumaan tasapainoon vastaavasti kuin vapaan vesipinnankin tapauksessa (ks. edellinen luku). Vesimolekyylit eivät kuitenkaan pääse huo-

kosseinämistä yhtä helposti irti kuin vapaan vesipinnan tapauksessa koska vettä koossa pitävien sisäisten vetovoimien (koheesion) lisäksi sitoutuneeseen kosteuteen vaikuttaa huokosseinämien adheesio, joka pyrkii vetämään vesimolekyylejä huokosseinämiä päin. Yksittäisen vesimolekyylin irrottamiseen sitoutuneesta kosteudesta höyryksi kuluu siksi hiukan suurempi energia kuin vapaalla vesipinnalla. Sitoutuneen kosteuden ja huokosilman väliseen rajapintaan yltävien adheesiovoimien vaikutus muuttuu sitä heikommaksi mitä paksummaksi vesikerros kasvaa, jolloin kosteuspitoisuuden kasvaessa adheesiovoimat heikkenevät, mutta myös vesipintojen kaarevuutta kuvaavat parametrit muuttuvat ja se vaikuttaa myös osaltaan rajapinnassa olevien vesimolekyylien voimatasapainoon ja siten pinnassa tapahtuvaan veden olomuodonmuutosilmiöön. Näistä syistä vesihöyryn osapaine huokoiseen materiaaliin sitoutuneen kosteuden pinnan läheisyydessä ei saavuta tasapainokosteudessa samaa arvoa kuin vapaan vesipinnan läheisyydessä vaan arvon $p_{v,sat,huok}$, jonka arvo riippuu epälineaarisesti kosteuspitoisuudesta. Hygroskooppisessa tasapainossa vesihöyryn osapaine koko huokosessa on tasoittunut arvoon $p_{v,sat,huok}$, jolloin suhteellinen kosteus huokosilmassa on (lämpötilan ollessa vakio):

$$\varphi(w) = \frac{p_{v,sat,huok}(w)}{p_{v,sat}} \quad (2.2.9)$$

Yhtälön 2.2.9 mukainen kuvaus toimii myös päinvastaisesti. Kosteuspitoisuus w voidaan esittää hygroskooppisessa tasapainossa huokosilman suhteellisen kosteuden funktiona $w(\varphi)$, joka on materiaalille ominainen kokeellisesti määritettävä tasapainokosteusfunktio. Eri materiaalien koetuloksista on kuitenkin huomattu, että tasapainokosteusfunktio riippuu materiaalin kosteuspitoisuuden historiasta [5]. Ilmiötä kutsutaan hystereesiksi, mutta sen syitä tai vaikutuksia ei käsitellä tässä työssä.

Hygroskooppisuudella tarkoitetaan materiaalin kykyä sitoa ilman vesihöyrystä suuria määriä kosteutta huokosseinämiin nestemäiseksi vedeksi. Hygroskooppisen materiaalin tasapainokosteusfunktio $w(\varphi)$ voi saada jo matalillakin suhteellisilla kosteuksilla korkeita kosteuspitoisuuden arvoja (useita kymmeniä kilogrammoja kuutiometriä kohti) kun taas ei-hygroskooppisen materiaalin kosteuspitoisuus on selvästi alle 1 kg/m^3 kun $\varphi < 0,95$. Hygroskooppisia materiaaleja ovat tyypillisesti huokoiset kivimateriaalit kuten betoni, erilaiset tiilet sekä puu ja puupohjaiset materiaalit.

2.2.3 Kosteuden siirtyminen

Diffuusio on molekyylien satunnaisesta liikkeestä aiheutuvaa aineen siirtymistä suuremmasta konsentraatiosta kohti pienempää konsentraatiota. Diffuusiota tapahtuu (lähes) kaikissa aineissa olomuodosta riippumatta. Vesihöyryn konsentraatiota ei rakennusfysiikassa usein esitetä ainemäärän yksikön [mol] avulla vaan vesihöyrypitoisuuden [g/m^3] avulla. Diffusiivinen kosteusvirran tiheys vektorimuodossa on Fickin lain mukaan analoginen lämmön johtumisen kanssa:

$$\mathbf{g}_v = -\delta_v \nabla v \quad (2.2.10)$$

missä \mathbf{g}_v = diffusiivisen kosteusvirran tiheyttä ja suuntaa kuvaava vektori, [g/(m²s)]
 δ_v = materiaalin vesihöyrynläpäisevyys, [m²/s]

Esimerkiksi seisovan ilman vesihöyrynläpäisevyys $\delta_{v,a}$ on normaaliolosuhteissa noin $2,5 \cdot 10^{-5}$ m²/s [5]. Rakennusmateriaaleille esitetään tyypillisesti vesihöyrynläpäisevyyttä kuvaava arvo μ , joka on materiaalin vesihöyrynvastuskerroin [-]. Se kuvaa ilman vesihöyrynläpäisevyyden suhdetta materiaalin vesihöyrynläpäisevyyteen:

$$\mu = \frac{\delta_{v,a}}{\delta_{v,mat}} \quad (2.2.11)$$

Rakennekerroksen vesihöyrynvastusta kuvataan usein ns. s_d -arvolla [m], joka kuvaa kuinka paksu seisova ilmakerros vastaisi rakennekerroksen vesihöyrynvastusta:

$$s_d = \mu \cdot d \quad (2.2.12)$$

missä d = rakennekerroksen paksuus, [m]

Ajasta riippumattomassa 1D-tilanteessa diffusiivisen kosteusvirran tiheys useasta rakennekerroksesta koostuvan rakenteen läpi voidaan laskea kaavalla:

$$\mathbf{g}_v = \Delta v \frac{\delta_{v,a}}{\sum s_d} \quad (2.2.13)$$

missä Δv = vesihöyrypitoisuuksien erotus rakenteen molemmin puolin, [g/m³]
 $\sum s_d$ = rakennekerrosten s_d -arvojen summa, [m]

Nestemäinen vesi voi siirtyä huokoisessa materiaalissa painovoimaisesti, ulkopuolisen paineen vaikutuksesta tai kapillaarisesti. Painovoiman tai ulkopuolisen paineen aiheuttama kosteuden siirtymistä ei kuitenkaan käsitellä tässä työssä. Kapillaari-ilmion syyt tunnetaan sinänsä nykytieteessä hyvin, mutta kapillaarisen kosteusvirran matemaattinen formuloiminen reuna-arvo-ongelmia varten on hyvin haastavaa, sillä materiaalien monimutkaisia huokosverkostoja on vaikea karakterisoida riittävän tarkasti rajallisella määrällä parametreja. Yksi mahdollinen tapa on käsitellä huokosverkosto eri paksuisten toisiinsa kytkettyjen putkien muodostamana tilavuutena. Yhteen putkeen, jossa on riittävästi kosteutta, muodostuu nestemäisen veden ja huokosilman välinen kaareutunut pinta, jota kutsutaan latinankielestä peräisin olevalla sanalla meniskus. Jos veden pintajännitys olete-

taan vakioksi, meniskuksen ja huokosseinämän välinen kontaktikulma riippuu ainoastaan huokosseinämien aiheuttamien adheesiovoimien suuruudesta, joka määräytyy materiaalin kemiallisesta koostumuksesta. Kontaktikulman sekä pintajännityksen avulla voidaan eri paksuisille putkille laskea kontaktikulman kärkeen muodostuvan voimaresultantin suuruus, josta edelleen voidaan laskea kapillaarivirtauksen aikaansaava suure nimeltä huokosalipaine p_c [Pa] (*eng. capillary suction*). Huokosalipaine voitaisiin kytkeä hygroskooppisessa tasapainossa olevassa materiaalissa suhteelliseen kosteuteen ns. Kelvinin yhtälöllä [5] ja käyttää kapillaarisen kosteusvirran laskemisessa siirtopotentiaalina suhteellista kosteutta ja diffuusiokulmakertoimenä materiaalin kosteudenjohtavuudesta [$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$] laskettavaa termiä.

Koska kapillaarivirtauksen suuruuden tiedetään kuitenkin riippuvan voimakkaasti kosteuspitoisuudesta, toinen sekä laskennallisesti että mittausteknisesti helpompi, mutta fysikaalisesti yksinkertaistettumpi lähestymistapa on käyttää siirtopotentiaalina kosteuspitoisuutta. Tällöin kapillaarinen kosteusvirta voidaan laskea kaavalla [7]:

$$\mathbf{g}_w = -D_w \nabla w \quad (2.2.14)$$

missä \mathbf{g}_w = kapillaarisen kosteusvirran tiheyttä ja suuntaa kuvaava vektori,
[$\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]

D_w = materiaalin kosteusdiffusiviteetti, [m^2/s]

Materiaalin kosteusdiffusiviteetti on kosteuspitoisuuden funktio, joka voidaan määrittää eri kosteuspitoisuuksissa kokeellisesti. Kosteusdiffusiviteetti on korkeimmillaan kosteuspitoisuuden ollessa ns. kapillaarisella alueella (tyypillisesti kun $w > w(97\% \text{ RH})$).

2.2.4 Energian ja massan säilyminen yhdistetyssä lämmön ja kosteuden siirtymisessä

Lämmön ja kosteuden siirtyessä yhtäaikaaisesti huokoisessa materiaalissa johdetaan energian ja massan säilymisyhtälöt analogisesti lämpöyhtälön kanssa. Vesihöyryn diffuusio voidaan yhtälön 2.2.10 sijaan laskea myös käyttämällä vesihöyryn osapainetta ajavana potentiaalina:

$$\mathbf{g}_v = -\delta_p \nabla p_v \quad (2.2.15)$$

missä δ_p = vesihöyrynläpäisevyys, [$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$]

Vesihöyryn osapaineen gradientti voidaan ilmaista kyllästysosapaineen ja suhteellisen kosteuden tulon gradienttina:

$$\begin{aligned}
\varphi &= \frac{p_v}{p_{v,\text{sat}}} \\
\rightarrow \varphi p_{v,\text{sat}} &= p_v \\
\rightarrow \nabla(\varphi p_{v,\text{sat}}) &= \nabla p_v
\end{aligned} \tag{2.2.16}$$

jolloin diffusiivinen kosteusvirta voidaan laskea suhteellisen kosteuden ja kyllästysoapaineen tulon gradientin avulla:

$$\mathbf{g}_v = -\delta_p \nabla(\varphi p_{v,\text{sat}}) \tag{2.2.17}$$

Kapillaarisen kosteusvirran ilmaisemiseksi suhteellisen kosteuden gradientin avulla otetaan käyttöön termi materiaalin ominaiskosteuskapasiteetti (ξ), joka määritetään seuraavasti:

$$\xi = \frac{\partial w}{\partial \varphi} \tag{2.2.18}$$

Derivoinnin ketjusäännön avulla voidaan osoittaa yhteys kosteuspitoisuuden ja suhteellisen kosteuden gradienttien välillä:

$$\begin{aligned}
dw &= \frac{\partial w}{\partial \varphi} d\varphi \\
\rightarrow \nabla w &= \xi \nabla \varphi
\end{aligned} \tag{2.2.19}$$

Kapillaarinen kosteusvirta suhteellisen kosteuden gradientin avulla ilmaistuna on:

$$\mathbf{g}_w = -D_w \xi \nabla \varphi \tag{2.2.20}$$

Tarkasteltavan materiaalin tasapainokosteuskäyrästä $w(\varphi)$ voidaan laskea suhteellisen kosteuden funktiona materiaalin ominaiskosteuskapasiteetti $\xi(\varphi)$, joka on analoginen ominaisuus lämmönsiirrossa ominaislämpökapasiteetin kanssa. Kokonaiskosteusvirta voidaan nyt esittää käyttäen potentiaalina suhteellista kosteutta:

$$\mathbf{g}_{\text{tot}} = \mathbf{g}_v + \mathbf{g}_w = -\left[\delta_p \nabla(\varphi p_{v,\text{sat}}) + D_w \xi \nabla \varphi \right] \tag{2.2.21}$$

Analogisesti lämmön varastoitumisen kanssa, massan säilymlaki voidaan kuvata sanallisesti: Massan (materiaalin sisältämän kosteuden) muutos ajan suhteen on yhtä suuri kuin kosteusvirran divergenssi (vrt. yhtälö 2.1.32).

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{g}_{\text{tot}} \quad (2.2.22)$$

joka voidaan kirjoittaa auki:

$$\xi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\delta_p \nabla (\varphi p_{v,\text{sat}}) + D_w \xi \nabla \varphi \right] \quad (2.2.23)$$

Kyllästysosapaine $p_{v,\text{sat}}$ riippuu ainoastaan lämpötilasta, jolloin kyllästysosapaineen kokonaisdifferentiaalista saadaan:

$$\begin{aligned} dp_{v,\text{sat}} &= \frac{\partial p_{v,\text{sat}}}{\partial T} dT \\ \rightarrow \nabla p_{v,\text{sat}} &= \frac{\partial p_{v,\text{sat}}}{\partial T} \nabla T \end{aligned} \quad (2.2.24)$$

Tulon derivointisäännön mukaan:

$$\begin{aligned} \nabla(p_{v,\text{sat}} \varphi) &= \varphi \nabla p_{v,\text{sat}} + p_{v,\text{sat}} \nabla \varphi \\ \nabla(p_{v,\text{sat}} \varphi) &= \varphi \frac{\partial p_{v,\text{sat}}}{\partial T} \nabla T + p_{v,\text{sat}} \nabla \varphi \end{aligned} \quad (2.2.25)$$

Yhdistämällä yhtälöt 2.2.23 ja 2.2.25 saadaan massan säilymlaki, jossa ratkaistavia muuttujia ovat lämpötila ja suhteellinen kosteus:

$$\xi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\delta_p \left(\varphi \frac{\partial p_{v,\text{sat}}}{\partial T} \nabla T + p_{v,\text{sat}} \nabla \varphi \right) + D_w \xi \nabla \varphi \right] \quad (2.2.26)$$

Yhtälöä 2.2.26 sovelletaan esimerkiksi WUFI-laskentaohjelmassa [8], [9]. Kosteuspitoisuuden muuttuessa oletetaan hygroskooppisen tasapainon säilyvän koko ajan, jolloin myös vesihöyrypitoisuuden arvo seuraa koko ajan tasapainokosteuspitoisuuden mukaista arvoa. Tämä edellyttää joko höyrystymistä tai tiivistymistä, jolloin höyrystymislämpö on otettava huomioon energian säilymisessä. Kun vesihöyryn diffuusion kuljettama latentti lämpöenergia otetaan huomioon, yhtälö 2.1.32 muotoillaan uudestaan:

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{q} + h_v \mathbf{g}_v) \quad (2.2.27)$$

Kun kuivamateriaalin ominaislämpökapasiteetin lisäksi otetaan huomioon vielä nestemäisen veden sitoma lämpöenergia ja yhdistetään yhtälöt 2.2.17 ja 2.2.26, saadaan energian säilymisyhtälöksi:

$$\left(\rho_{\text{mat}} c_{p,\text{mat}} + w c_{p,w}\right) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot \left[h_v \delta_p \nabla (\phi p_{v,\text{sat}}) \right] \quad (2.2.28)$$

missä ρ_{mat} = materiaalin kuivatiheys, [kg/m³]
 $c_{p,\text{mat}}$ = materiaalin ominaislämpökapasiteetti kuivana, [J/(kg·K)]
 $c_{p,w}$ = veden ominaislämpökapasiteetti, 4181 J/(kg·K)

Yhtälön 2.2.28 vesihöyryn diffuusiotermin voidaan kirjoittaa vielä auki, jolloin saadaan:

$$\left(\rho_{\text{mat}} c_{p,\text{mat}} + w c_{p,w}\right) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + h_v \nabla \cdot \left[\delta_p \left(\phi \frac{\partial p_{v,\text{sat}}}{\partial T} \nabla T + p_{v,\text{sat}} \nabla \phi \right) \right] \quad (2.2.29)$$

Yhtälö on monimutkaisen näköinen, mutta se on muodollisesti edelleen parabolinen osittaisdifferentiaaliyhtälö (kuten esimerkiksi lämpöyhtälö) ja sopivilla menetelmillä tietokoneavusteisesti numeerisesti ratkaistavissa.

2.3 Virtaus

Tässä luvussa on johdettu kitkallista virtausta hallitsevat massan ja liikemäärän säilymislait. Tekstin seassa viitataan niukasti lähteisiin mutta todettakoon tässä, että yhtälöiden johtaminen tässä työssä perustuu enimmäkseen lähteiden [3] ja [10] esitystapaan massan ja liikemäärän säilymisestä. Lisäksi lähdettä [11] on hyödynnetty johdettaessa jännityskomponenttien ja virtausgradienttien yhteyttä.

Virtausmekaniikan ongelmissa keskeisin kiinnostava suure on virtausnopeus. Kontinuumimekaniikassa virtausta käsitellään matemaattisesti usein eulerilaisen nopeusvektorikentän avulla, joka määritellään karteesisessa muodossa:

$$\mathbf{V}(x, y, z, t) = \mathbf{i}u(x, y, z, t) + \mathbf{j}v(x, y, z, t) + \mathbf{k}w(x, y, z, t) \quad (2.3.1)$$

missä \mathbf{i} , \mathbf{j} ja \mathbf{k} ovat x-, y-, ja z-suuntaiset yksikkövektorit ja u, v ja w skalaarimuuttujia (u = x-suuntainen, v = y-suuntainen ja w = z-suuntainen virtausnopeuden komponentti, [m/s]) karteesisten koordinaattien (x, y ja z) ja ajan (t) funktioina. Tarkasteltaessa virtaavaa fluidia partikkelien sijaan kontinuumina, pätevät edelleen mekaniikan peruslait: massan, liikemäärän ja energian säilyminen. Nämä lait kuvaavat minkä tahansa partikkelin tai partikkelijoukon muodostaman kontinuumin tiettyjen ominaisuuksien muutoksia aikayksikköä kohti. Johdettaessa virtausmekaniikan peruslakeja differentiaalimuodossa on entistä

tärkeämpää erottaa toisistaan osittaisdifferentiaali ja differentiaalilaskennan ketjusäännöstä johdettava kokonaisdifferentiaali (jota käytettiin jo luvuissa 2.1 ja 2.2).

Olkoon Q virtaavan fluidin mikä tahansa ominaisuus ja dx , dy , dz ja dt ovat toisistaan riippumattomien muuttujien infinitesimaalisen pieniä muutoksia. Tällöin Q :n kokonaisdifferentiaali on:

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial x} dx + \frac{\partial Q}{\partial y} dy + \frac{\partial Q}{\partial z} dz + \frac{\partial Q}{\partial t} dt \quad (2.3.2)$$

Seurattaessa tiettyä partikkelijoukkoa (kuten jonkin fluidin täyttämää kontrollitilavuutta), muutosten paikan suhteen tulee toteuttaa seuraavat yhtälöt:

$$dx = u dt, \quad dy = v dt \quad \text{ja} \quad dz = w dt \quad (2.3.3)$$

Yhdistämällä yhtälöt 2.3.2 ja 2.3.3 saadaan Q :n kokonaisderivaatta ajan suhteen:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + u \frac{\partial Q}{\partial x} + v \frac{\partial Q}{\partial y} + w \frac{\partial Q}{\partial z} \quad (2.3.4)$$

Ajan kokonaisderivaatan (d/dt) ja osittaisderivaatan ($\partial/\partial t$) ero on siinä, että kokonaisderivaattaa laskettaessa ei oleteta, että muut argumentit (x, y ja z) pysyisivät vakioina t :n muuttuessa dt :n verran. Tästä johtuen kokonaisderivaatan konvektiiviset termit $u \frac{\partial Q}{\partial x}$, $v \frac{\partial Q}{\partial y}$

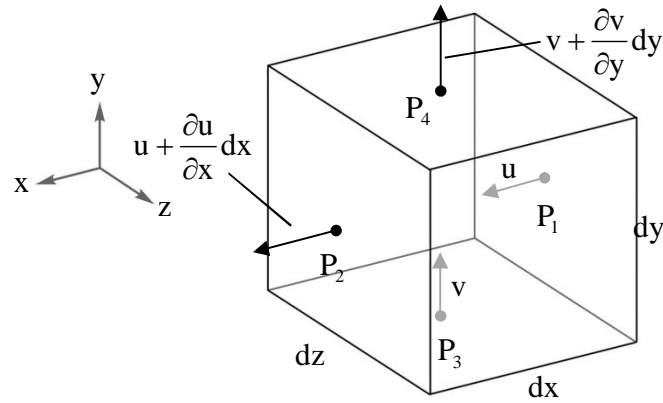
ja $w \frac{\partial Q}{\partial z}$ voivat aiheuttaa ajasta riippumattomassakin

tilanteessa partikkeleille esimerkiksi nolasta poikkeavan kokonaiskiihtyvyyden $\left(\frac{d\mathbf{V}}{dt} \neq 0\right)$

vaikka paikallinen virtausnopeuden muutos ajan suhteen olisikin $\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = 0$.

2.3.1 Massan säilyminen virtauksessa

Tarkastellaan infinitesimaalisen pientä kontrollitilavuutta, jonka sivujen pituudet ovat dx , dy ja dz (ks. kuva 2.3.1). Kuvassa on tilan säästämiseksi näytetty ainoastaan x - ja y -suuntaiset nopeusvektorit.



Kuva 2.3.1 Kontrollitilavuus massan säilymislain johtamiseksi.

Jos oletetaan, että kontrollitilavuuteen ei varastoidu massaa ja että kontrollitilavuuden sisältämässä fluidissa ei tapahdu ydinreaktioita, kontrollitilavuuteen virtaavan massavirran tulee olla yhtä suuri kuin kontrollitilavuudesta poistuvan massavirran. Virtausnopeus voidaan esittää Taylorin sarjan approksimaationa vastaavasti kuin lämpövirran tiheys (ks. luku 2.1.2). Jos virtausnopeuden x-komponentti u on määritelty kuvan 2.3.1 pisteessä P_1 , pisteessä P_2 vastaava nopeuskomponentti on:

$$u + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) dx$$

Massavirran tiheys on virtaavan aineen tiheyden ja virtausnopeuden tulo. Pisteessä P_2 x-suuntainen massavirran tiheys on:

$$\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx$$

Massavirta kuvan 2.3.1 mukaiseen kontrollitilavuuteen sivun P_1 kautta on:

$$\rho u dy dz$$

ja kontrollitilavuudesta sivun P_2 kautta poistuva massavirta on:

$$\left[\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx \right] dy dz$$

jolloin nopeuden x-suuntaisen komponentin osuus kontrollitilavuuteen kertyvästä massasta on:

$$\rho u dydz - \left[\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx \right] dydz = - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx dydz \quad (2.3.5)$$

Vastaava yhtälö on voimassa myös y- ja z-suunnalle, jolloin kontrollitilavuuteen kertyvä massa kaikkien sivujen kautta yhteensä on:

$$- \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] dx dy dz$$

Kertyvän massan arvo on negatiivinen, jos virtausgradientit ovat positiivisia. Kontrollitilavuuden massan, $\rho dx dy dz$, muutos ajan suhteen on:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz$$

jonka on oltava massan säilymisperiaatteen mukaan yhtä suuri kuin kontrollitilavuuteen kertyvän massan:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz = - \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] dx dy dz \quad (2.3.6)$$

Tämä yhtälö supistuu muotoon:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.3.7)$$

Yhtälöä 2.3.7 kutsutaan myös jatkuvuusyhtälöksi, joka supistuu vakioitiheyksiselle virtaukselle muotoon:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.3.8)$$

eli:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (2.3.9)$$

2.3.2 Liikemäärän säilyminen virtauksessa

Vaikka virtauskenttien ratkaisemisen kannalta massan säilyminen on aivan yhtä välttämätöntä ottaa huomioon kuin liikemääräänkin liittyvät ehdot, niin kenties kuuluisin virtausmekaniikkaan liittyvä yhtälö on kuitenkin Navier-Stokes -yhtälö, joka kytkee virtausnopeusvektorin ja virtaavaan aineeseen vaikuttavat sisäiset ja ulkoiset voimat toisiinsa liikemäärän säilymislain avulla. Liikemäärän säilymisyyhtälö johdetaan tässä työssä Newtonin toisen lain ja Sir George Stokesin (1819–1903) määrittelemien Newtonisten aineiden viskoosien jännitysten avulla.

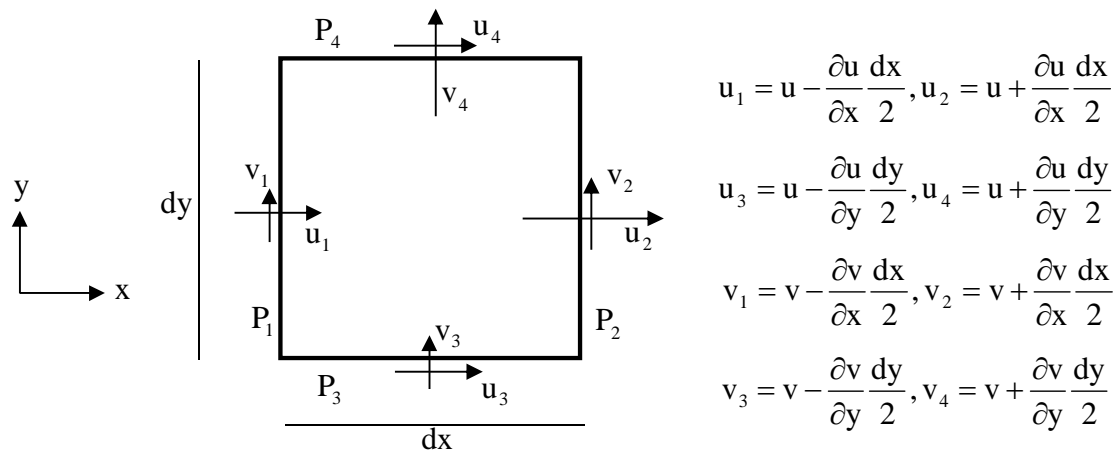
Liikemäärä on vektorisuure vastaavasti kuin voima ja molemmat voidaan jakaa komponentteihin. Newtonin toista lakia (voima = liikemäärän muutosnopeus ajan suhteen) kirjoitettaessa kontrollitulavuudelle määritellään ensin liikemäärävirta, joka on massayksikköä kohti olevan liikemäärän (eli virtausnopeuden) ja massavirran tulo. Newtonin toinen laki voidaan kuvailla sanallisesti kontrollitulavuuden x-komponenteille:

(x-suuntaisen liikemäärän paikallinen muutos ajan suhteen kontrollitulavuudessa) – (x-suuntaisen liikemäärän virtaus kontrollitulavuuteen) + (x-suuntaisen liikemäärän virtaus ulos kontrollitulavuudesta) = (kontrollitulavuuden sisältämään fluidiin vaikuttavien voimien x-komponenttien summa)

Newtonin mekaniikan mukaan positiivinen voima aiheuttaa siis kontrollitulavuudessa olevalle ja kontrollitulavuudesta poistuvalla (sisään- ja ulosvirtauksen netto) fluidille positiivisen liikemäärän kasvun ajan suhteen. Liikemäärän x-komponentin paikallinen muutos kontrollitulavuuden sisällä on x-suuntaisen nopeuden ja kontrollitulavuuden massan tulon muutos ajan suhteen:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} dx dy dz$$

Kuvassa 2.3.2 on esitetty $dx dy dz$ -kokoinen kontrollitulavuus (piirretty x,y-tasossa) ja virtausnopeudet sen reunoilla, kun nopeusvektori \mathbf{V} on määritelty kontrollitulavuuden keskellä. Kontrollitulavuuteen virtaavan x-suuntaisen liikemäärän nettoarvoa laskettaessa on otettava huomioon, että vaikka esimerkiksi sivulta P_3 kontrollitulavuuteen virtaava massa ei riipu x-suuntaisen nopeuden u_3 arvosta, niin sisään virtaavalla massalla on kuitenkin x-suuntaista liikemäärää, joka riippuu u_3 :n arvosta.



Kuva 2.3.2 Virtausnopeudet kontrollitilavuuden reunoilla, kun nopeusvektori on määritelty kontrollitilavuuden keskellä.

Tiheyttä ei myöskään oleteta vakioksi, jolloin se riippuu nopeuksien kanssa vastaavasti tarkasteltavasta sivusta. Sivun P_3 kautta kontrollitilavuuteen virtaava x-suuntainen liikemäärä on siis:

$$\rho_3 u_3 v_3 \cdot dx dz = \left(\rho - \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) \cdot \left(u - \frac{\partial u}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) \cdot \left(v - \frac{\partial v}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) \cdot dx dz \quad (2.3.10)$$

ja sivulta P_4 kontrollitilavuudesta ulos virtaava x-suuntainen liikemäärä on:

$$\rho_4 u_4 v_4 \cdot dx dz = \left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) \cdot \left(u + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) \cdot \left(v + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) \cdot dx dz \quad (2.3.11)$$

Liikemäärän x-suuntainen nettovirta kontrollitilavuudesta pois sivujen P_3 ja P_4 kautta on:

$$(\rho_4 u_4 v_4 - \rho_3 u_3 v_3) \cdot dx dz$$

Tilan säästämiseksi merkitään osittaisderivaattoja seuraavasti:

$$\frac{\partial f}{\partial i} = f_i \quad (2.3.12)$$

Käytetään lisäksi merkintää $dy/2 = d$ ja kirjoitetaan auki liikemäärän x-suuntainen nettovirta kontrollitilavuudesta pois sivujen P_3 ja P_4 kautta:

$$\begin{aligned}
& (\rho_4 u_4 v_4 - \rho_3 u_3 v_3) \cdot dx dz = \\
& \left[(\rho + \rho_y d) \cdot (u + u_y d) \cdot (v + v_y d) - (\rho - \rho_y d) \cdot (u - u_y d) \cdot (v - v_y d) \right] \cdot dx dz \\
& = dx dz \cdot (\rho uv + \rho u_y v d + \rho_y u v d + \rho_y u_y v d^2 + \rho u v_y d + \rho u_y v_y d^2 + \rho_y u v_y d^2 + \rho_y u_y v_y d^3) - \\
& dx dz \cdot (\rho uv - \rho u_y v d - \rho_y u v d + \rho_y u_y v d^2 - \rho u v_y d + \rho u_y v_y d^2 + \rho_y u v_y d^2 - \rho_y u_y v_y d^3) \\
& = dx dy dz \cdot (\rho_y uv + \rho u_y v + \rho u v_y) + dx dy dz \cdot \left(\rho_y u_y v_y \left(\frac{dy}{2} \right)^2 \right) \quad (2.3.13)
\end{aligned}$$

Koska dy on infinitesimaalisen pieni, sen neliö on merkityksetön ja huomataan, että tulon derivointisäännön mukaan liikemäärän x -suuntaisen liikemäärän nettovirta kontrollitilavuudesta pois sivujen P_3 ja P_4 kautta on:

$$dx dy dz \cdot (\rho_y uv + \rho u_y v + \rho u v_y) = \frac{\partial \rho uv}{\partial y} dx dy dz \quad (2.3.14)$$

Liikemäärän x -komponentin nettovirtaus pois kontrollitilavuudesta sivujen P_1 ja P_2 kautta voidaan laskea samalla tavalla ja sen arvoksi saadaan:

$$(\rho_2 u_2^2 - \rho_1 u_1^2) \cdot dy dz = \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} dx dy dz \quad (2.3.15)$$

Ottaen huomioon vielä kontrollitilavuuden z -akselia vastaan kohtisuorat sivut, voidaan aiemmin sanallisesti kuvailtu Newtonin toinen laki x -suunnassa kirjoittaa matemaattisessa muodossa:

$$\left[\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial y} + \frac{\partial \rho uw}{\partial z} \right] dx dy dz = \sum F_x \quad (2.3.16)$$

missä $\sum F_x$ on kontrollitilavuuteen vaikuttavien voimien x -komponenttien summa. Saman yhtälön tulee luonnollisesti toteutua kaikkiin suuntiin, jolloin voidaan kirjoittaa vektori-muodossa:

$$\left[\frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} + \frac{\partial \rho u \mathbf{V}}{\partial x} + \frac{\partial \rho v \mathbf{V}}{\partial y} + \frac{\partial \rho w \mathbf{V}}{\partial z} \right] dx dy dz = \sum \mathbf{F} \quad (2.3.17)$$

Edelleen tulon derivointisääntöä soveltamalla yhtälön 2.3.17 hakasuluissa oleva termi voidaan kirjoittaa muodossa:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} + \frac{\partial \rho u \mathbf{V}}{\partial x} + \frac{\partial \rho v \mathbf{V}}{\partial y} + \frac{\partial \rho w \mathbf{V}}{\partial z} \right] \\ & = \mathbf{V} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) \right] + \rho \left[\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + u \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (2.3.18)$$

Huomataan, että oikealla puolella oleva ensimmäinen termi hakasuluissa on sama kuin jatkuvuusyhtälö yleisessä muodossa (yhtälö 2.3.7), joka katoaa identtisesti. Huomataan myös, että jälkimmäinen hakasuluissa oleva termi on nopeusvektorin kokonaisderivaatta, jonka määritelmä esitettiin luvun 2.3 alussa. Yhtälö 2.3.17 supistuu näin ollen muotoon:

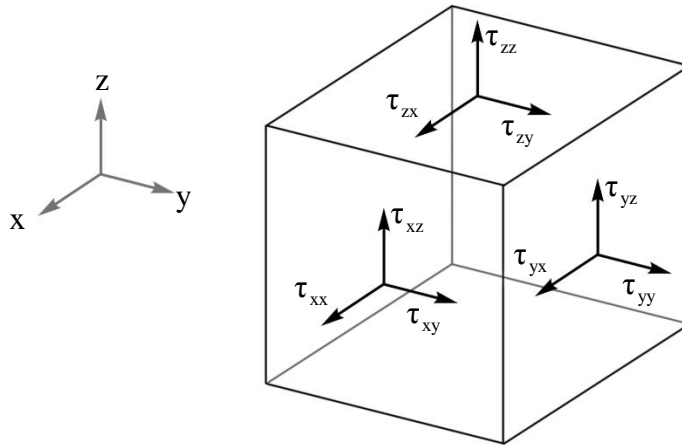
$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} dx dy dz = \sum \mathbf{F} \quad (2.3.19)$$

Koska kontrollitilavuudella tarkoitetaan ainoastaan kuvitteellista suljettua rajapintaa, joka sulkee sisäänsä tarkasteltavan partikkelisysteemin, niin määritettäessä fluidin sisäisiä voimia ($\sum \mathbf{F}$) ei puhuta enää $dx dy dz$ -kokoisesta kontrollitilavuudesta vaan kyseisen kontrollitilavuuden sisältämien partikkeleiden muodostamasta fluidielementistä. Fluidielementtiin vaikuttavat voimat voidaan jakaa pintavoimiin ja tilavuusvoimiin. Tilavuusvoimat ovat ns. pitkän kantaman voimia, jotka aiheutuvat vuorovaikutuksesta kontrollitilavuudesta kaukana olevien osien kanssa. Tavallisin esimerkki on painovoima, joka aiheuttaa ρg :n [N/m^3] suuruisen tilavuusvoiman maan pinnalla sijaitseviin fluideihin ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$, putoamiskiihtyvyys).

Pintavoimat ovat vierekkäisten fluidielementtien välillä vaikuttavia sisäisiä voimia, jotka aiheutuvat molekyyläarisistä jännityksistä. Pintavoiman kuvaamiseen tarvitaan aina voiman vaikutuspinnan suunta sekä voiman vaikutussuunta. Pintavoimia tarkastellaan käytännössä jakamalla voima vaikutuspinnan normaalin suuntaiseen komponenttiin (normaalivoima) ja kahteen sitä vastaan kohtisuoraan komponenttiin (leikkausvoimat). Jakamalla pintavoimien komponentit pinta-aloilla saadaan fluidielementtiin vaikuttavat jännitykset, jotka kootaan paikallista jännitystilaa kuvaavaksi jännitystensoriksi:

$$\tau_{ij} = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.3.20)$$

Kuvassa 2.3.3 on esitetty jännitystensorin sisältämien vektoreiden suunnat.

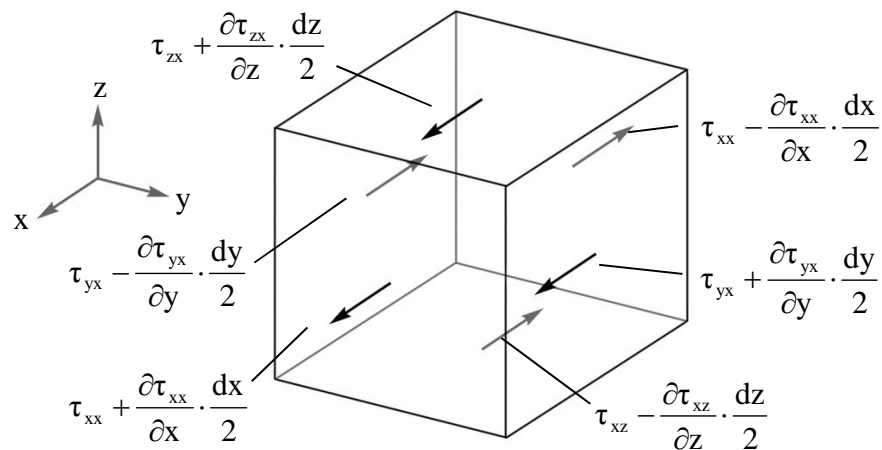


Kuva 2.3.3 Fluidielementin jännitystilaa kuvaavan jännitystensorin komponentit.

Suurimmalle osalle fluideista kuten myös ilmalle (jonka virtausta tässä työssä tarkastellaan ainoastaan) on voimassa [3]:

$$\tau_{ij} = \tau_{ji} \quad (2.3.21)$$

Jännitystensorin sisältämät jännitysvektorit eivät sinänsä aiheuta kontrollilavuuteen nettovoimaa vaan niiden gradientit. Kuvassa 2.3.4 on esitetty $dx dy dz$ -kokoiseen fluidielementtiin vaikuttavat x -suuntaiset jännitykset, kun jännitystensori τ_{ij} on määritelty kontrollilavuuden keskellä.



Kuva 2.3.4 x -suuntaiset $dx dy dz$ -kokoisen fluidielementin pintoihin vaikuttavat viskoo-sit jännitykset kun τ_{ij} on määritelty elementin keskellä.

Summaamalla kuvassa 2.3.4 esitetyistä jännityksistä pinta-alojen avulla lasketut voimat saadaan fluidielementtiin vaikuttava pintavoimista koostuva x -suuntainen nettovoima:

$$\sum F_x = \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right] dx dy dz \quad (2.3.22)$$

Vastaava yhtälö voidaan luonnollisesti johtaa myös y- ja z-suunnille, jolloin voidaan vektorimuodossa esittää:

$$\begin{aligned} \sum \mathbf{F} = & \left[\mathbf{i} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right] + \mathbf{j} \left[\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right] + \mathbf{k} \left[\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] \right] dx dy dz \end{aligned} \quad (2.3.23)$$

Yhdistämällä yhtälöt 2.3.19 ja 2.3.23 ja jakamalla saatu yhtälö puolittain $dx dy dz$:lla saadaan:

$$\begin{aligned} \rho \frac{dV}{dt} &= \mathbf{i} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right] + \mathbf{j} \left[\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right] + \mathbf{k} \left[\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (2.3.24)$$

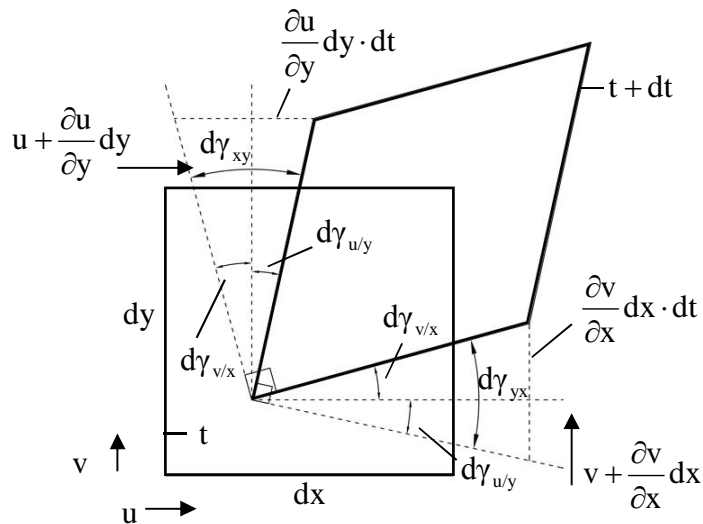
Jäljellä oleva tehtävä on selvittää jännitystensorin komponenttien ja virtauskentän välinen yhteys, jota varten tarkasteltavalle fluidille tehdään seuraavat oletukset, jotka pätevät ns. Newtonisille fluideille:

- leikkausjännitykset ovat verrannollisia fluidielementin kulmadeformaationopeuksiin
- leikkausjännitys on nolla kun kulmadeformaationopeus on nolla
- leikkausjännitysten ja kulmadeformaationopeuksien välinen yhteys fluidissa on isotrooppinen, eli tarkasteltavien tilavuusalkioiden pintojen suunnilla ei ole merkitystä.

Ensimmäinen oletus ilmaistaan matemaattisessa muodossa seuraavasti:

$$\tau_{ij} = \mu \frac{d\gamma_{ij}}{dt} \quad (i \neq j) \quad (2.3.25)$$

jossa verrannollisuuskerroin μ on fluidin aineominaisuus, dynaaminen viskositeetti [Pa·s]. Kuvassa 2.3.5 on esitetty ajassa dt muodonmuutoksen kokeva tilavuusalkio, jonka avulla kulmadeformaationopeus ($d\gamma_{ij}/dt$) hahmotetaan virtausgradienttien avulla.



Kuva 2.3.5 Ajassa dt kulmadeformaation $d\gamma_{xy}$ kokeva fluidielementti.

Kuvasta 2.3.5 nähdään, että:

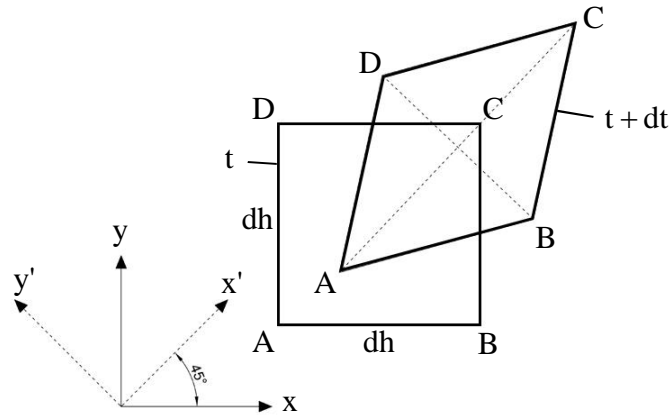
$$d\gamma_{xy} = d\gamma_{u/y} + d\gamma_{v/x} = \frac{\frac{\partial u}{\partial y} dy \cdot dt}{dy} + \frac{\frac{\partial v}{\partial x} dx \cdot dt}{dx} = \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \cdot dt \quad (2.3.26)$$

Yhdistämällä yhtälöt 2.3.25 ja 2.3.26 saadaan leikkausjännitys τ_{xy} ilmaistua virtausgradienttien avulla:

$$\tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2.3.27)$$

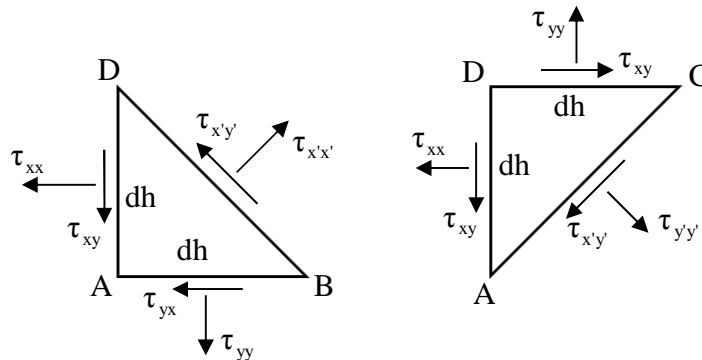
Yhtälö 2.3.27 voidaan johtaa minkä tahansa suuntaiselle leikkausjännitykselle τ_{ij} ($i \neq j$). Normaalijännitystermien τ_{ij} ($i = j$) johtaminen on hiukan monimutkaisempi tehtävä mutta se voidaan tehdä Newtonin fluidin isotrooppisuusolettamusta hyödyntäen selvittämällä lineaaristen jännitysten ja muodonmuutosten yhteys leikkausjännitysten- ja muodonmuutosten kanssa.

Tarkastellaan aluksi kaksiulotteista $dh \times dh$ kokoista fluidielementtiä, joka kokee ajassa dt lineaarisen muodonmuutoksen x - ja y -suunnissa sekä kulmadeformaation. Tarkastelua varten luodaan ylimääräinen koordinaatisto (x', y') , jonka suunnaksi koordinaatistoon (x, y) nähden valitaan tarkoituksella laskujen helpottamiseksi 45° . Isotrooppisuusolettamuksen takia valittava suunta on kuitenkin lopputuloksen kannalta mielivaltaisen.



Kuva 2.3.6 Muodonmuutoksen kokeva fluidielementti ABCD ja (x', y') -koordinaatisto.

Fluidielementti ABCD halkaistaan ensin diagonaalien suunnassa kahteen osaan ABD ja ACD. Tarkastellaan tilannetta, jossa $dh \rightarrow 0$, jolloin fluidielementin tilavuuden suhde jännitysten vaikutuspinta-aloihin häviää. Koska fluidielementin massa ja tilavuusvoiman resultantti ovat verrannollisia tilavuuteen, Newtonin toisen lain mukaan pintavoimien resultantin täytyy myös hävitä eli kuvassa 2.3.7 esitetyille jännityskomponenteille on oltava voimassa voimatasapaino.



Kuva 2.3.7 Jännitykset halkaistuissa fluidielementeissä ABD ja ACD.

Fluidielementin ABD x' -suuntaisesta voimatasapainoehdosta saadaan (edelleen, $\tau_{xy} = \tau_{yx}$):

$$dh \cdot \left(\sqrt{2} \cdot \tau_{x'x'} - \frac{\tau_{xx}}{\sqrt{2}} - \frac{\tau_{yy}}{\sqrt{2}} - \frac{2\tau_{xy}}{\sqrt{2}} \right) = 0 \quad (2.3.28)$$

$$\rightarrow \tau_{x'x'} = \frac{\tau_{xx} + \tau_{yy}}{2} + \tau_{xy}$$

Fluidielementin ACD voimatasapaino y' -suunnassa johtaa vastaavasti yhtälöön:

$$\tau_{y'y'} = \frac{\tau_{xx} + \tau_{yy}}{2} - \tau_{xy} \quad (2.3.29)$$

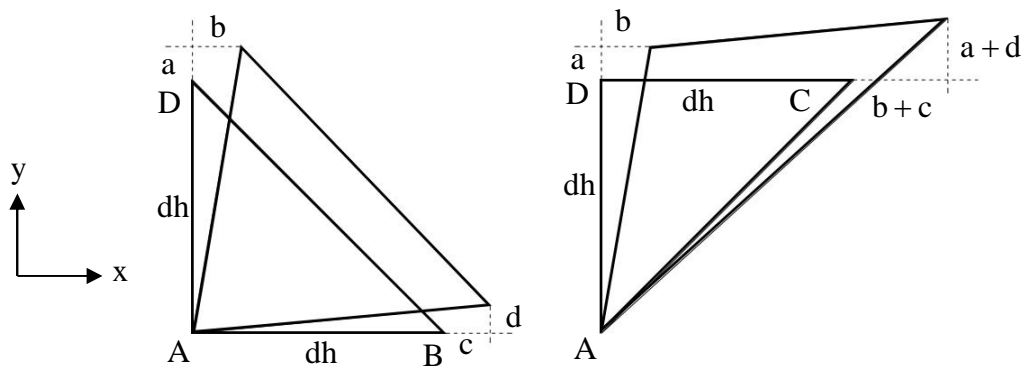
Yhtälöistä 2.3.28 ja 2.3.29 voidaan eliminoida τ_{xx} ja τ_{yy} , jolloin saadaan:

$$\tau_{x'x'} - \tau_{y'y'} = 2\tau_{xy} \quad (2.3.30)$$

johon sijoitetaan yhtälö 2.3.25:

$$\tau_{x'x'} - \tau_{y'y'} = 2\mu \frac{d\gamma_{xy}}{dt} \quad (2.3.31)$$

Kuvassa 2.3.8 on esitetty geometriset apusuureet, joiden avulla voidaan ilmaista yhteydet muodonmuutosnopeuksille (x,y) ja (x',y') -koordinaatistojen välillä.



Kuva 2.3.8 Muodonmuutokset halkaistuissa fluidielementeissä ABD ja ACD.

Tilavuusalkion kokemat lineaariset muodonmuutokset ovat kuvan 2.3.8 mukaisessa tapauksessa:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_x &= \frac{c}{dh} \\ d\varepsilon_y &= \frac{a}{dh} \end{aligned} \quad (2.3.32)$$

ja kulmadeformaatio:

$$d\gamma_{xy} = \frac{b+d}{dh} \quad (2.3.33)$$

Lineaarinen muodonmuutos x' -suunnassa ($d\varepsilon_{x'}$) voidaan ilmoittaa määrittämällä diagonaalin AC kasvu ajassa dt ja jakamalla se alkuperäisellä pituudella AC. Koska muodonmuutossuureet ovat pieniä verrattuna elementin sivun pituuteen dh , ajassa dt tapahtuva diagonaalin AC rotaatio voidaan olettaa merkityksettömäksi x' - ja y' -suuntaisten muodonmuutosten kannalta ja $d\varepsilon_{x'}$ voidaan lopulta ilmaista (x, y) -koordinaatiston mukaisilla muodonmuutoksilla:

$$d\varepsilon_{x'} = \frac{d(AC)}{AC} = \frac{\frac{a+d}{\sqrt{2}} + \frac{b+c}{\sqrt{2}}}{dh \cdot \sqrt{2}} = \frac{1}{2} \left(\frac{a+b+c+d}{dh} \right) = \frac{1}{2} (d\varepsilon_x + d\varepsilon_y + d\gamma_{xy}) \quad (2.3.34)$$

Vastaava tarkastelu kolmion ABD diagonaalin BD venymiselle voidaan tehdä ja sen avulla ilmaistaan lineaarinen muodonmuutos y' -suunnassa:

$$d\varepsilon_{y'} = \frac{d(BD)}{BD} = \frac{1}{2} (d\varepsilon_x + d\varepsilon_y - d\gamma_{xy}) \quad (2.3.35)$$

Lineaariset muodonmuutokset x - ja y -suunnissa voidaan eliminoida yhtälöistä 2.3.34 ja 2.3.35, jolloin saadaan:

$$d\varepsilon_{x'} - d\varepsilon_{y'} = d\gamma_{xy} \quad (2.3.36)$$

Yhtälö 2.3.36 jaetaan ajalla dt , joka muodonmuutoksen toteutumiseen kuluu, jolloin saadaan yhteys muodonmuutosnopeuksien välille:

$$\frac{d\varepsilon_{x'}}{dt} - \frac{d\varepsilon_{y'}}{dt} = \frac{d\gamma_{xy}}{dt} \quad (2.3.37)$$

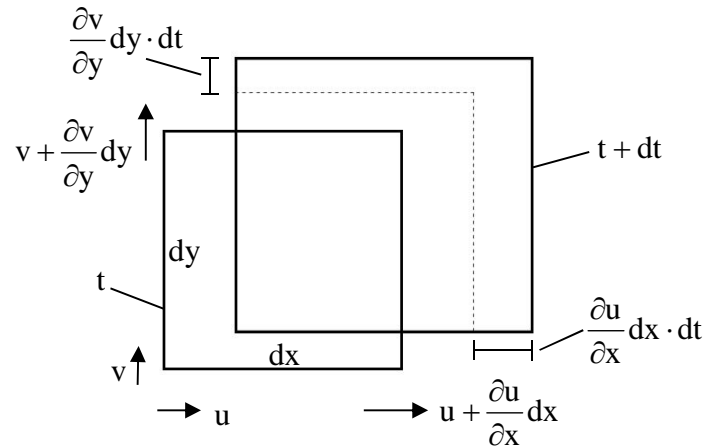
Viittaukset alkuperäiseen (x, y) -koordinaatistoon voidaan nyt eliminoida kokonaan yhdistämällä yhtälöt 2.3.31 ja 2.3.37:

$$\tau_{x'x'} - \tau_{y'y'} = 2\mu \left(\frac{d\varepsilon_{x'}}{dt} - \frac{d\varepsilon_{y'}}{dt} \right) \quad (2.3.38)$$

Koska isotrooppisuuden takia yhtälön 2.3.38 tulee toteutua minkä tahansa suuntaisessa koordinaatistossa, voidaan yleistää:

$$\tau_{ii} - \tau_{jj} = 2\mu \left(\frac{d\varepsilon_j}{dt} - \frac{d\varepsilon_i}{dt} \right) \quad (2.3.39)$$

Lineaaristen muodonmuutosnopeuksien ja virtausgradienttien välinen yhteys on esitetty kuvassa 2.3.9. Vaikka kuvan fluidielementti ei koe kulmadeformaatiota, sillä ei ole merkitystä lineaaristen muodonmuutosten laskemisessa.



Kuva 2.3.9 Lineaariset muodonmuutokset fluidielementissä.

Lineaariset muodonmuutosnopeudet voidaan ilmaista virtausgradienttien avulla:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_x &= \frac{\frac{\partial u}{\partial x} dx \cdot dt}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x} dt \rightarrow \frac{d\varepsilon_x}{dt} = \frac{\partial u}{\partial x} \\ d\varepsilon_y &= \frac{\frac{\partial v}{\partial y} dy \cdot dt}{dy} = \frac{\partial v}{\partial y} dt \rightarrow \frac{d\varepsilon_y}{dt} = \frac{\partial v}{\partial y} \end{aligned} \quad (2.3.40)$$

jotka sijoitetaan yhtälöön 2.3.39:

$$\tau_{xx} - \tau_{yy} = 2\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (2.3.41)$$

Vastaava yhtälö voidaan johtaa myös (x, z) -koordinaatistossa, jolloin:

$$\tau_{xx} - \tau_{zz} = 2\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (2.3.42)$$

Summaamalla yhtälöt 2.3.41 ja 2.3.42 päädytään viimein muutaman välivaiheen jälkeen:

$$\begin{aligned}
2\tau_{xx} - \tau_{yy} - \tau_{zz} &= 2\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad | + \tau_{xx} \\
3\tau_{xx} &= \tau_{xx} + \tau_{yy} + \tau_{zz} + 4\mu \frac{\partial u}{\partial x} - 2\mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad | /3 \\
\tau_{xx} &= \frac{\tau_{xx} + \tau_{yy} + \tau_{zz}}{3} + \frac{4}{3}\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\
\tau_{xx} &= -p_m + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\
\tau_{xx} &= -p_m + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}\mu \nabla \cdot \mathbf{V} \tag{2.3.43}
\end{aligned}$$

missä p_m on mekaaninen paine [11]:

$$p_m = -\frac{\tau_{xx} + \tau_{yy} + \tau_{zz}}{3} \tag{2.3.44}$$

joka on määritelmänsä mukaan normaalijännitysten keskiarvo ja sen vaikutus fluidielementtiin on aina puristava. Mekaaninen paine ei ole sama asia kuin termodynaaminen paine, jota ei oikeastaan ole olemassa muuta kuin tilanteissa, joissa lämpötila ja paine ovat tasapainotilassa. Virtausteknisissä tarkasteluissa mekaanisen ja termodynaamisen paineen ero tulee kuitenkin merkittäväksi vasta tilanteissa, joissa voimakkaat virtausgradientit aiheuttavat kokoonpuristumista kuten esimerkiksi shokkiaalloissa. Suuressa osassa virtausdynamiikkaa – kuten myös rakennusfysiikassa – voidaan olettaa, että termodynaaminen paine p seuraa mekaanista painetta ilman viivettä ja voidaan kirjoittaa:

$$\tau_{xx} = -p + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}\mu \nabla \cdot \mathbf{V} \tag{2.3.45}$$

Termi $-\frac{2}{3}\mu \nabla \cdot \mathbf{V}$ on myös merkityksetön (lähes) vakioitiheyksiselle kokoonpuristumattomalle virtaukselle ja kaikki jännitystensorin komponentit voidaan nyt kirjoittaa auki paineen, viskositeetin ja virtausgradienttien avulla:

$$\begin{aligned}
\tau_{xx} &= -p + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} & \tau_{yy} &= -p + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} & \tau_{zz} &= -p + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \\
\tau_{xy} = \tau_{yx} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \tau_{xz} = \tau_{zx} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\
\tau_{yz} = \tau_{zy} &= \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \tag{2.3.46}
\end{aligned}$$

Sijoitetaan jännityskomponentit yhtälöön 2.3.18 ja kirjoitetaan auki liikemäärän säilymislaki x-suunnassa (kun viskositeetti on vakio):

$$\rho \frac{dV}{dt} = \mathbf{i} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right] + \mathbf{j} \left[\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right] + \mathbf{k} \left[\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] \quad (2.3.24)$$

$$\rightarrow \rho \frac{du}{dt} = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} + 2\mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} \right), \quad \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial x} \right)$$

$$\rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + 2\mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial x} \right)$$

$$\rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial x} \right)$$

$$\rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial x} \right)$$

$$\rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u + \mu \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

$$\rightarrow \rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u + \mu \frac{\partial}{\partial x} (\nabla \cdot \mathbf{V}) \quad (2.3.47)$$

Lähes vakiotiheyksiselle ja kokoonpuristumattomalle virtaukselle pätee edelleen

$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$, jolloin liikemäärän säilymislaki x-suunnassa supistuu tilavuusvoima F_x [N/m^3] huomioon ottaen muotoon:

$$\rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u + F_x \quad (2.3.48)$$

Vastaava yhtälö pätee luonnollisesti myös y- ja z-suunnissa ja lähes vakiotiheyksiselle kokoonpuristumattomalle virtaukselle voidaan kirjoittaa liikemäärän säilymlaki eli Navier-Stokes -yhtälö vektorimuodossa:

$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \mathbf{F} \quad (2.3.49)$$

jossa ratkaistavia muuttujia ovat paine- (skalaarimuuttuja) ja virtausnopeusfunktio (vektori (x,y,z) -koordinaatistossa). Pelkästään jatkuvuus- ja Navier-Stokes -yhtälöillä voidaan mallintaa isotermisiä virtauksia, joissa lämmönsiirtoa ei tapahdu. Yhtälöt johdettiin ensimmäisen kerran jo varhain 1800-luvulla, mutta ne olivat pitkään lähes käyttämättömiä johtuen kiihtyvyyss- ja jännitystermien voimakkaan epälineaarisuuden aiheuttamasta ratkaistavuuden haasteellisuudesta.

2.3.3 Energian säilyminen ei-isotermisissä virtauksissa

Tutkittaessa yhdistettyä virtausta ja lämmönsiirtoa, luvussa 2.3.1 johdettu lämpöyhtälö ei enää riitä kuvaamaan lämmön siirtymistä virtaavassa aineessa. Minkä tahansa kontrollitilavuuden sisältämä energia muuttuu ajan suhteen nopeudella [3]:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\int_{CV} e \rho dV \right) + \int_{CS} e \rho (\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) dA \quad (2.3.50)$$

missä e on kokonaisenergian määrä massayksikköä kohti aineessa [J/kg]. Integraalitermien alaindeksillä CV tarkoitetaan koko kontrollitilavuuden yli laskettua tilavuusintegraalia ja CS kontrollitilavuuden pinnan yli laskettua pinta-alaintegraalia. $\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}$ on nopeusvektorin pistetulo kontrollitilavuuden pintaa vastaan kohtisuoran yksikkövektorin kanssa, eli virtausnopeuden pintaa vastaan kohtisuoran komponentin skalaariarvo. Jälkimmäinen integraalitermi yhtälön 2.3.50 oikealle puolella kuvaa siten kontrollitilavuuteen virtaavan ja kontrollitilavuudesta pois virtaan energian nettoarvoa. Ensimmäinen integraalitermi laskee kontrollitilavuuden kokonaisenergiamäärän, joka derivoituna ajan suhteen kuvaa kontrollitilavuuteen varastoituvan energian määrää. Toisaalta, energian säilymlain mukaan:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (2.3.51)$$

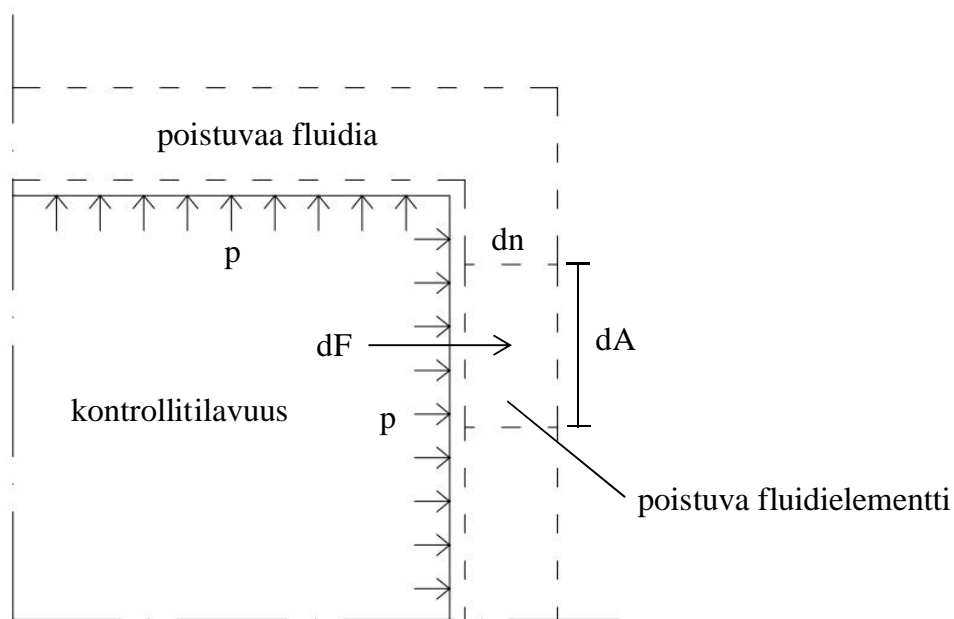
Fluidin täyttämän kontrollitilavuuden tapauksessa ajassa dt tehty työ koostuu paineen tekemästä työstä W_p sekä viskoosien jännitysten tekemästä työstä W_v . Klassisen mekaniikan mukaisesti työ voidaan määritellä sanallisesti: voima \times voiman vaikutuspisteen siir-

tymä voiman vaikutussuunnassa. Kontrollitilavuuden rajapinnassa paine aiheuttaa dA :n suuruisella alueella voiman (ks. kuva 2.3.10):

$$dF = p \cdot dA \quad (2.3.52)$$

Voima dF kohdistuu kontrollitilavuudesta poistuvaan fluidielementtiin, jonka kontrollitilavuuden pintaa vastaan kohtisuoraksi mitaksi valitaan dn :

$$dn = (\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) \cdot dt \quad (2.3.53)$$



Kuva 2.3.10 Kontrollitilavuudesta ajassa dt poistuva fluidi ja poistuvasta fluidista koostuva fluidielementti.

Ajassa dt paineen tekemä työ alueella dA on:

$$dW_p = dF \cdot dn = p \cdot dA \cdot (\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) \cdot dt \quad (2.3.54)$$

josta seuraa:

$$d\dot{W}_p = p(\mathbf{V} \cdot \mathbf{n})dA \quad (2.3.55)$$

Paineen tekemä kokonaistyö aikayksikköä kohti voidaan nyt laskea kontrollitilavuudelle:

$$\dot{W}_p = \int_{CS} p(\mathbf{V} \cdot \mathbf{n})dA \quad (2.3.56)$$

Viskoosien jännitysten tekemä työ määritetään saman periaatteen mukaisesti, jolloin päädytään:

$$\begin{aligned} d\dot{W}_v &= -\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{V}dA \\ \dot{W}_v &= \int_{CS} -\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{V}dA \end{aligned} \quad (2.3.57)$$

Viskoosien jännitysten tekemä työ on kuitenkin energian säilymisen kannalta hyvin harvoin – etenkin rakennusfysiikassa – merkittävä, sillä se edellyttää sekä voimakkaita virtausgradientteja että suurta viskositeettia. Näin ollen voidaan tehdä olettaus:

$$\dot{Q} - \dot{W}_p = \frac{d}{dt} \left(\int_{CV} e\rho dV \right) + \int_{CS} e\rho(\mathbf{V} \cdot \mathbf{n})dA \quad (2.3.58)$$

Yhtälö 2.3.51 kirjoitetaan auki paineen tekemän työn osalta ja järjestellään uudelleen:

$$\begin{aligned} \dot{Q} - \int_{CS} p(\mathbf{V} \cdot \mathbf{n})dA &= \frac{d}{dt} \left(\int_{CV} e\rho dV \right) + \int_{CS} e\rho(\mathbf{V} \cdot \mathbf{n})dA \\ \dot{Q} &= \frac{d}{dt} \left(\int_{CV} e\rho dV \right) + \int_{CS} \left(e + \frac{p}{\rho} \right) \rho(\mathbf{V} \cdot \mathbf{n})dA \end{aligned} \quad (2.3.59)$$

Vaikka kontrollitilavuuden reunojen läpi tapahtuu virtausta, lämpövirta kontrollitilavuuteen lasketaan johtumisen lämpövirroista vastaavasti kuin luvussa 2.1 (virtauksen kuljetaman energian huomioon ottava termi on jo mukana yhtälössä 2.3.50). Kontrollitilavuudelle on voimassa lämpöenergian osalta vastaava yhtälö kuin 2.1.30:

$$\dot{Q} = - \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] dx dy dz = -\nabla \cdot \mathbf{q} dx dy dz \quad (2.3.60)$$

jossa \mathbf{q} on luvussa 2.1 esitetyn Fourierin lain mukaan lämpövirran tiheys vektorimuodossa:

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T \quad (2.3.61)$$

josta seuraa:

$$\dot{Q} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) dx dy dz \quad (2.3.62)$$

Yhtälön 2.3.59 kirjoittaminen auki kontrollitulavuudelle on pitkä mutta triviaali tehtävä, jota ei näytetä tässä työssä. Sen lopputuloksena saadaan kuitenkin [3]:

$$\dot{Q} = \left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \zeta) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \zeta) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \zeta) \right] dx dy dz \quad (2.3.63)$$

missä $\zeta = e + p/\rho$. Soveltamalla tulon derivointisääntöä yhtälöön 2.3.63 voidaan sama yhtälö kirjoittaa uudestaan vektorimuodossa:

$$\dot{Q} = \left[\rho \frac{de}{dt} + \mathbf{V} \cdot \nabla p + p \nabla \cdot \mathbf{V} \right] dx dy dz \quad (2.3.64)$$

Yhdistämällä yhtälöt 2.3.62 ja 2.3.64 saadaan:

$$\rho \frac{de}{dt} + \mathbf{V} \cdot \nabla p + p \nabla \cdot \mathbf{V} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (2.3.65)$$

Kokonaisderivaatan sisältämä e (energia massayksikköä kohti) koostuu lämpötilaan verrannollisesta sisäenergiasta massayksikköä kohti \hat{u} , kineettisestä energiasta ja potentiaalienergiasta. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa lämmön johtumisen aiheuttama sisäisen energian \hat{u} kasvu on kokonaisenergiassa selvästi määräävä. Voidaan itse asiassa osoittaa liikemäärän säilymislain avulla, että jos viskoosin työn termit pidettäisiin koko yhtälön 2.3.65 johtamisen aikana mukana, osa kitkatermeistä kumoaisi kineettisen energian ja potentiaalienergian aiheuttamat termit sekä termin $\mathbf{V} \cdot \nabla p$ [3]. Viskoosien jännitysten tekemä työ aiheuttaisi yhtälöön 2.3.65 ainoastaan viskoosin dissipaatiofunktion Φ :

$$\Phi = \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (2.3.66)$$

Yleisessä muodossa energian säilymlaki kontinuumimekaniikassa konvektiiviset termit huomioon ottaen on:

$$\rho \frac{d\hat{u}}{dt} + p \nabla \cdot \mathbf{V} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \Phi \quad (2.3.67)$$

Rakennusfysikaalisissa ongelmissa virtaukset ovat (lähes) vakioitiheysisiä ja kokoonpuristumattomia, jolloin pätee edelleen $\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$. Myös Φ voidaan olettaa nolllaksi. Sisäenergian muutos $d\hat{u}$ voidaan kirjoittaa lämpötilan muutoksen ja ominaislämpökapasiteetin avulla muodossa $d\hat{u} = c_{v,m} dT$, jolloin yhtälö 2.3.67 supistuu muotoon:

$$\rho c_{v,m} \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (2.3.68)$$

missä $c_{v,m}$ = ominaislämpökapasiteetti massan suhteen vakioilavuudessa, [J/(kg·K)]

Kirjoitetaan yhtälön 2.3.68 lämpötilan kokonaisderivaatta ajan suhteen auki, jolloin nähdään myös konvektiiviset termit:

$$\rho c_{v,m} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (2.3.69)$$

Jos virtausta ei tapahdu, yhtälö supistuu luvussa 2.1 esitettyyn muotoon (yhtälö 2.1.33). Tällöin kaasujen lämmönsiirtoa tarkasteltaessa on usein kuitenkin perusteltua käyttää ominaislämpökapasiteettia vakio paineessa (c_p [J/(kg·K)]), joka ottaa huomioon kaasun laajenemisesta aiheutuvan työn.

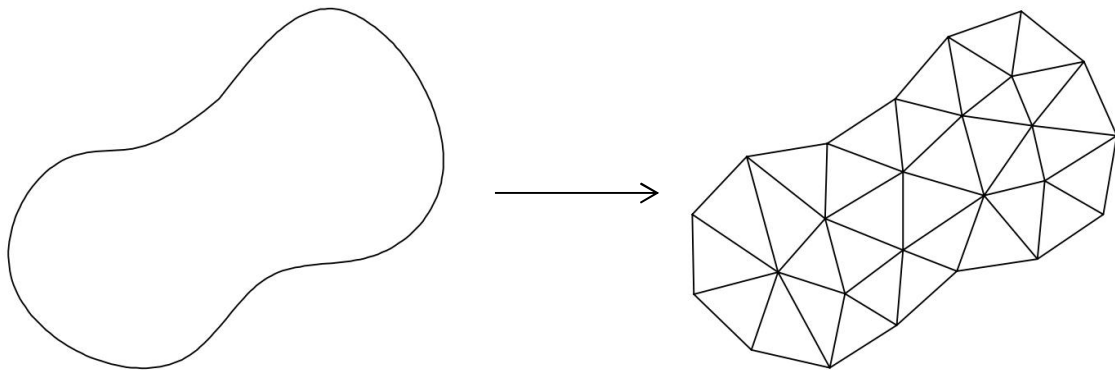
2.4 Numeerisista menetelmistä

Numeeriset menetelmät ovat tekniikoita, joilla matemaattiset ongelmatehtävät formuloidaan sellaisiksi, että ne voidaan ratkaista aritmeettisilla operaatioilla [12]. Numeerinen ratkaisu on periaatteessa aina likiarvo todellisesta ratkaisusta, vaikka numeerinen ratkaisu saattaa joissakin yksinkertaisissa tilanteissa johtaa täsmälleen samaan tulokseen kuin analyttinen ratkaisu. Edellisissä luvuissa 2.1–2.3 johdettuja osittaisdifferentiaaliyhtälöitä ja niiden yhdistelmistä koostuvia yhtälöryhmiä ei ole mahdollista ratkaista analyttisesti, sillä kiinnostuksen kohteena on monimutkainen geometria, jossa tapahtuvia ilmiöitä hallitsevat vahvasti epälineaariset yhtälöt. Tyypillisissä lämmön ja aineen siirtymisen tarkasteluissa tilanteen hankaluutta lisää muuttujien riippuvuus ajasta sekä ajan funktiona epä säännöllisesti muuttuvat reunaehdot.

Viime vuosisadan aikana on kuitenkin keksitty matemaattisia tekniikoita, joiden avulla voidaan ainakin lähestyä mitä tahansa osittaisdifferentiaaliyhtälöjen hallitsemää fysiikaalista ilmiötä mielivaltaisessa geometriassa. Tekniikat perustuvat aina jollakin tavalla geometrian diskretisointiin eli jatkuvan alueen jakamiseen äärelliseen määrään pisteitä, jotka muodostavat ratkaistavissa olevan joukon fysikaalisia muuttujia. Varhaisimmat menetelmät osittaisdifferentiaaliyhtälöiden ratkaisemiseksi ovat differenssimenetelmä (*finite difference method*) ja tilavuusmenetelmä (*finite volume method*). Differenssimenetelmässä geometria jaetaan suorakulmaiseksi hilaksi, jossa fysikaalisten suureiden eriaisteisia derivaattoja approksimoidaan vierekkäisten hilapisteiden muuttujien erotuksilla. Tilavuusmenetelmä on edelleen monissa tapauksissa tehokas menetelmä erilaisten säilymislakien ratkaisemiseen hilapisteitä ympäröivien kontrollitilavuuksien avulla. Tilavuusmenetelmässä hyödynnetään Gaussin divergenssiteoreemaa, jonka mukaan jonkin vektorikentän vuo integroituna suljetun pinnan yli on yhtä suuri kuin kyseisen vektorisuureen lähteisyys (divergenssi) integroituna pinnan sulkeman tilavuuden yli. Differenssi- tai tilavuus-

menetelmän avulla saatu ratkaisu lähestyy analyttistä ratkaisua kun hilapisteiden keskinäinen etäisyys lähestyy nollaa. Tässä työssä käytetyistä laskentaohjelmista WUFI perustuu tilavuusmenetelmään.

Monissa tilanteissa differenssi- ja tilavuusmenetelmää laskennallisesti tehokkaampi ja tarkempi menetelmä on elementtimenetelmä (*finite element method*), jonka periaatetta kuvaillaan tässä luvussa hyvin karkealla tasolla. Tässä työssä käytetyistä laskentaohjelmista COMSOL Multiphysics perustuu elementtimenetelmään. Elementtimenetelmässä geometria jaetaan äärelliseen määrään tutkittavia osia, joita nimitetään elementeiksi.



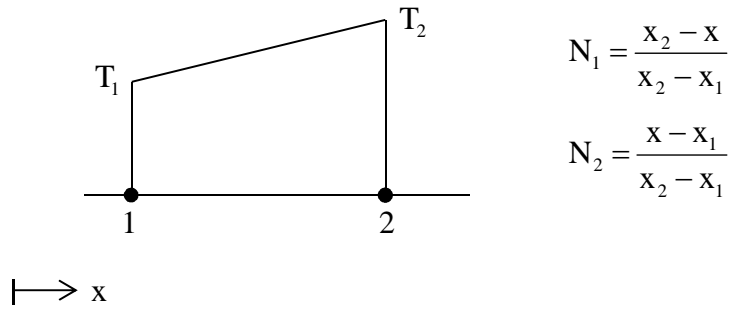
Kuva 2.4.1 Esimerkki jatkuvan 2D-geometrian diskretisoinnista kolmioelementeiksi.

Elementtien solmupisteiden avulla luodaan koko aluetta koskevaa (globaalia) ongelmaa kuvaava jäykkyyismatriisi. Ongelma voidaan tällöin esittää lineaarisena yhtälöryhmänä matriisimuodossa seuraavasti:

$$[\mathbf{K}]\mathbf{x} = \mathbf{f} \quad (2.4.1)$$

missä $[\mathbf{K}]$ = jäykkyyismatriisi
 \mathbf{x} = kaikkien solmupisteiden tuntemattomat muuttujat sisältävä vektori
 \mathbf{f} = reunaehdoista aiheutuva kuormavektori

Nimitykset ”jäykkyyismatriisi” ja ”kuormavektori” johtuvat teorian historiasta, sillä elementtimenetelmää on alun perin sovellettu lujuusopillisiin ongelmiin. Periaatteessa vastaava yhtälö 2.4.1 voidaan koota myös differenssi- ja tilavuusmenetelmän avulla mutta elementtimenetelmä poikkeaa kuitenkin differenssi- ja tilavuusmenetelmästä siten, että jäykkyyismatriisia kootessa otetaan huomioon tuntemattomien muuttujien jatkuvuus ja mahdollinen epälineaarinen luonne elementtien sisällä solmupisteiden ja ns. muotofunktioiden avulla. Lisäksi keskeinen hyöty elementeistä on kaarevien muotojen tarkempi diskretisointi suorakulmaiseen hilaan verrattuna. Kuvassa 2.4.2 on esitetty esimerkiksi solmupisteet 1 ja 2 yhdistävästä lineaarisesta 1D-elementistä ja sen muotofunktioista.



Kuva 2.4.2 Lineaarisen 1D-elementin muotofunktiot N_1 ja N_2 ja esimerkki lämpötilajakaumasta elementissä.

Linearisessa 1D-elementissä esimerkiksi lämpötila paikan funktiona voidaan nyt ilmaista muotofunktioiden avulla seuraavasti:

$$T(x) = \mathbf{N}^T \mathbf{T} = N_1 T_1 + N_2 T_2 \quad (2.4.2)$$

Koska T_1 ja T_2 eivät ole paikan funktiota, osittaisderivaatat voidaan ilmaista myös pelkästään muotofunktioiden avulla:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial N_1}{\partial x} T_1 + \frac{\partial N_2}{\partial x} T_2 \quad (2.4.3)$$

2D- ja 3D-elementeillä muotofunktiot kehittyvät monimutkaisemmiksi ja 3D-tapauksissa muotofunktioita on jo hyvin vaikea kuvata graafisesti, mutta periaate on edelleen sama: tuntemattomat suureet ja niiden derivaatat elementin alueella voidaan esittää pelkästään solmupisteiden arvoilla ja muotofunktioilla. Jäykkyysmatriisi voidaan helppoissa tapauksissa koota ns. suoralla menetelmällä, joka on mahdollista kuitenkin vain rajallisessa määrässä tapauksia. Yleisin ja ehkä tehokkain tapa selvittää yksittäisen elementin yhtälöryhmään tuoma ”jäykkyys” on Galerkinin menetelmä, jossa samoja muotofunktioita (N_i), joilla approksimoidaan ratkaistavia suureita elementin alueella, käytetään myös residuaalin painottamiseen. Residuaalilla tarkoitetaan jäännösfunktiota, joka ongelmaa kuvaavien yhtälöiden mukaan tulee olla kaikkialla nolla (esim. ajasta riippumaton johtumisen lämpöyhtälö, $\lambda \nabla^2 T = 0$), mutta jonka tiedetään sisältävän numeerisesta epätarkkuudesta aiheutuvaa virhettä. Tällöin voidaan merkitä esimerkiksi: $\lambda \nabla^2 T \neq 0 = r$. Muotofunktioilla painotettu residuaali integroidaan elementin yli ja pakotetaan integraalin arvo nollassi. Esimerkiksi pelkän johtumisen lämpöyhtälön stationäärisessä tapauksessa:

$$\int_V (\lambda \nabla^2 T) N_i dV = 0 \quad (2.4.4)$$

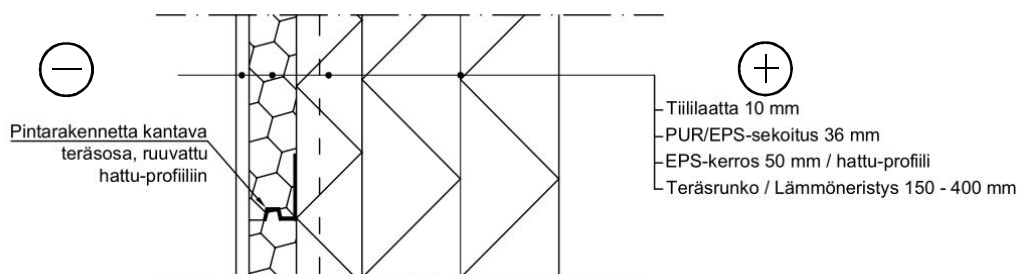
Integraalin sisältämä sulkulauseke (lämpöyhtälö) voidaan ilmaista kokonaan solmupisteiden T_i muuttujien ja muotofunktioiden N_i avulla. Jokainen elementti integroidaan yhtälön 2.4.4 mukaisesti jokaista solmupistettä i vastaavalla muotofunktiolla painottamalla. Yhdestä elementistä saadaan lopulta elementin solmupisteiden verran lineaarisia yhtälöitä ja lopulta kaikista elementeistä kootaan globaali yhtälöryhmä 2.4.1. Painotettujen residuaalien menetelmä on aina mahdollinen ratkaistavista osittaisdifferentiaaliyhtälöistä riippumatta [13]. Kuormavektorin \mathbf{f} kokoamisessa käytetään myös muotofunktioita, joilla esimerkiksi reunakuorma (lämmönsiirron tehtävissä joko tunnettu reunan lämpötila tai lämpövirran tiheys reunalla) kerrotaan ja integroidaan geometrian reuna-alueen yli, missä kuorma vaikuttaa. Jos reunaehdot ovat siten epälineaarisia, että ne riippuvat esimerkiksi reunan lämpötilasta (esimerkiksi Newtonin jäähtymislaki, yhtälö 2.1.39), integroinnin tuloksena saadaan yhtälö, joka sisältää reunalla olevien elementtien solmupisteiden lämpötiloista riippuvia termejä. Sijoitettaessa integroinnin tuloksena saatu yhtälö matriisiyhtälöön 2.4.1, solmupisteiden lämpötiloja sisältävät termit viedään jäykkyysmatriisin puolelle yhtälöä. Koska muotofunktiot ovat eriasteisia yksinkertaisia polynomifunktioita, niiden tarkka numeerinen integrointi on mahdollista ja jäykkyysmatriisin kokoamiseen yhtälön 2.4.4. avulla tarvitaan ainoastaan aritmeettisiä operaatioita.

Kun yhtälö 2.4.1 on koottu, voidaan muuttujavektori \mathbf{x} ratkaista suoraan kertomalla yhtälö molemmiin puolin jäykkyysmatriisin käänteismatriisilla. Käänteismatriisin suora ratkaiseminen Gaussin eliminoinnilla on aina mahdollista (edellyttäen, että matriisi ei ole singulaarinen), mutta se on laskennallisesti hidas tapa ratkaista yhtälöryhmä. On olemassa kuitenkin sekä suoria että iteratiivisia laskennallisesti tehokkaampia tapoja ratkaista lineaarinen yhtälöryhmä. Yksi tyypillinen nykyaikaisten laskentaohjelmien suosima suora tapa kääntää matriisi on ns. LU-hajotelma (*Lower-Upper decomposition*), jolla saadaan aina eksakti käänteismatriisi, mutta matriisin sisällöstä riippuen se voi johtaa merkittävästi nopeampaan laskenta-aikaan [12].

Rakennusfysikaalisten ilmiöiden dynaaminen luonne sekä yhtälöiden (etenkin Navier-Stokes) ja materiaaliominaisuuksien epälineaarisuus tuovat lisää numeerisessa ratkaisemisessa huomioon otettavia tekijöitä mutta niitä varten on olemassa edelleen omia elementtimenetelmän yhteydessä sovellettavia numeerisia tekniikoita (aika-askellus, numeerinen stabilointi, yhtälöiden linearisointi jne.), joihin liittyviä teorioita ei kuitenkaan käsitellä tässä työssä.

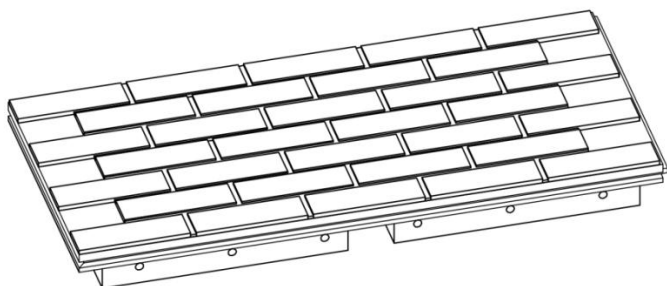
3 SUURELEMENTIN RAKENNE

Työssä tarkasteltu suurelementti on maksimipituudeltaan noin 12 m ja suurelementit toteutetaan aina kerroksen korkuisena (noin 3 m). Liitteessä 1 on esitetty suurelementin rakennepiirustukset. Suurelementin teräsohutlevyrakenteisen runkokerroksen lämmöneristys voidaan toteuttaa joko EPS:llä tai mineraalivillalla. Kuvassa 3.1 on esitetty pystyleikkaus EPS:llä eristetyistä suurelementistä ilman kivirakenteista kantavaa seinää, johon suurelementti kiinnitetään.



Kuva 3.1 EPS:llä lämmöneristetyin suurelementin pystyleikkaus.

Korjausrakentamisessa suurelementti eristetään tyypillisesti mineraalivillalla, joka sallii epätasaisuuksia kantavan kiviseinän ulkopinnalle. Kantavaan teräsrunkoon kiinnitetään pystysuuntaisia teräksisiä hattuprofiileja, joiden avulla lisäeristyslementit kiinnitetään. Hattuprofiilien korkeus on 50 mm, jolloin lisäeristyslementin taustan ja teräsrunkon väliin jää 50 mm kerros, joka täytetään tuuletusurituksen muodostavilla valmiiksi uritetuilla EPS-levyillä. Tuuletusuritukseksi muodostuvaa geometriaa on käsitelty luvussa 4. Suurelementtiä rakennettaessa 50 mm paksuiset EPS-levyt liimataan valmiiksi noin 1200 mm × 600 mm kokoiisiin lisäeristyslementteihin (ks. kuva 3.2). Lisäeristyslementti koostuu 10 mm paksusta tiililaattakerroksesta, joka on liimattu polyuretaanin ja EPS:n sekoituksesta koostuvaan eristyslevyyn.



Kuva 3.2 Yksittäinen lisäeristyslementti, jonka taustalle on liimattu 2 EPS-levyä. EPS-levyjen väliin on jätetty tila hattuprofiilia varten.

4 VIRTAUSTEKNISET TARKASTELUT

Suurelementin tuuletusurituksen virtaustekniset laskelmat suoritettiin COMSOL Multiphysics 4.1 -laskentaohjelmalla. Ohjelmaa voidaan luonnehtia yleisesti elementtimenettelmään perustuvaksi osittaisdifferentiaaliyhtälöiden ratkentaohjelmaksi, jossa käyttäjälle on valmiiksi tehty eri fysikaalisia ilmiöitä mallintavia moduuleja. Moduulit tarkoittavat käytännössä yhtä tai useampaa laskennassa huomioon otettavaa osittaisdifferentiaaliyhtälöä ja ohjelmalla voidaan muodostaa malleja, joissa ratkaistaan yhdistetysti usean eri moduulin sisältämät yhtälöt. Tässä työssä käytettiin *Non-isothermal Flow* -moduulia, jonka sisältämät Navier-Stokes-, jatkuvuus- ja energian säilymisyhtälöt yleisessä muodossa supistuvat tämän työn stationäärisissä tarkasteluissa yhtälöiksi:

$$\rho \left(u \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \mathbf{F} \quad (4.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (4.2)$$

$$\rho c_{v,m} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (4.3)$$

joissa tuntemattomia muuttujia ovat virtausnopeus, paine ja lämpötila. Yhtälöiden termien merkityksiä on selostettu aiemmin luvussa 2. Tulo- ja poistoaukkojen reunaehdoiksi asetettiin ns. avoin reuna, jossa viskoosit jännitykset häviävät:

$$\mu \nabla^2 \mathbf{V} = 0 \quad (4.4)$$

Avoimella reunalla lämpötilalle on voimassa:

$$\begin{aligned} T &= T_e, \text{ jos } \mathbf{n} \cdot \mathbf{V} < 0 \\ \nabla T \cdot \mathbf{n} &= 0, \text{ jos } \mathbf{n} \cdot \mathbf{V} \geq 0 \end{aligned} \quad (4.5)$$

missä T_e = ulkoilman lämpötila, [K]

Yhtälössä 4.2 $\mathbf{n} \cdot \mathbf{V} < 0$, kun ilma virtaa sisään tuuletusuritukseen ja $\mathbf{n} \cdot \mathbf{V} \geq 0$, kun ilma virtaa ulos. Virtauksen suuntaa ei tarvitse tuntea etukäteen, vaan ohjelman ratkaisija osaa

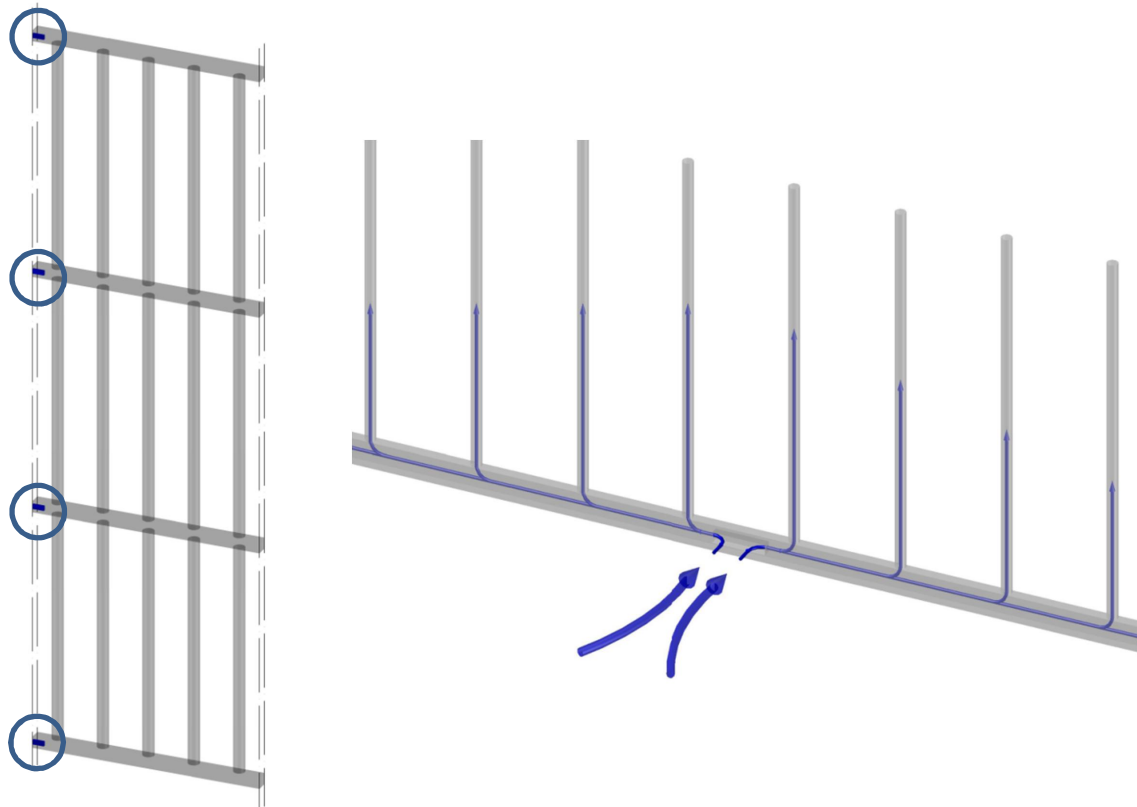
automaattisesti muuttaa reunaehtoa virtausnopeusvektorin \mathbf{V} kehittyessä ratkaisemisen aikana. Virtausnopeus tuuletusurien seinämillä asetettiin nolaksi (*no-slip condition*).

Geometrian sisältäessä avoimia reunoja, luonnollinen konvektio voidaan mallintaa asettamalla tyypillisen painovoimakomponentin ($F_z = -g\rho$) sijaan tilavuusvoimaksi [12]:

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= [0, 0, F_z]^T \\ F_z &= g(\rho_{a,e} - \rho_a) \end{aligned} \quad (4.6)$$

missä $\rho_{a,e}$ = ulkoilman lämpötilan mukainen ilman tiheys, [kg/m^3]

Ohjelmassa käytettiin sisäänrakennettua ilman materiaalimallia, joka ottaa automaattisesti huomioon ilman tiheyden lämpötilariippuvuuden ideaalikaasun tilayhtälön mukaisesti. Ilman lämmitessä tuuletusurituksessa virtatessa tiheys ρ_a pienenee alkuperäisestä tiheydestä $\rho_{a,e}$ jolloin F_z saa positiivisen etumerkin ja virtauksen suunta on alhaalta ylös.



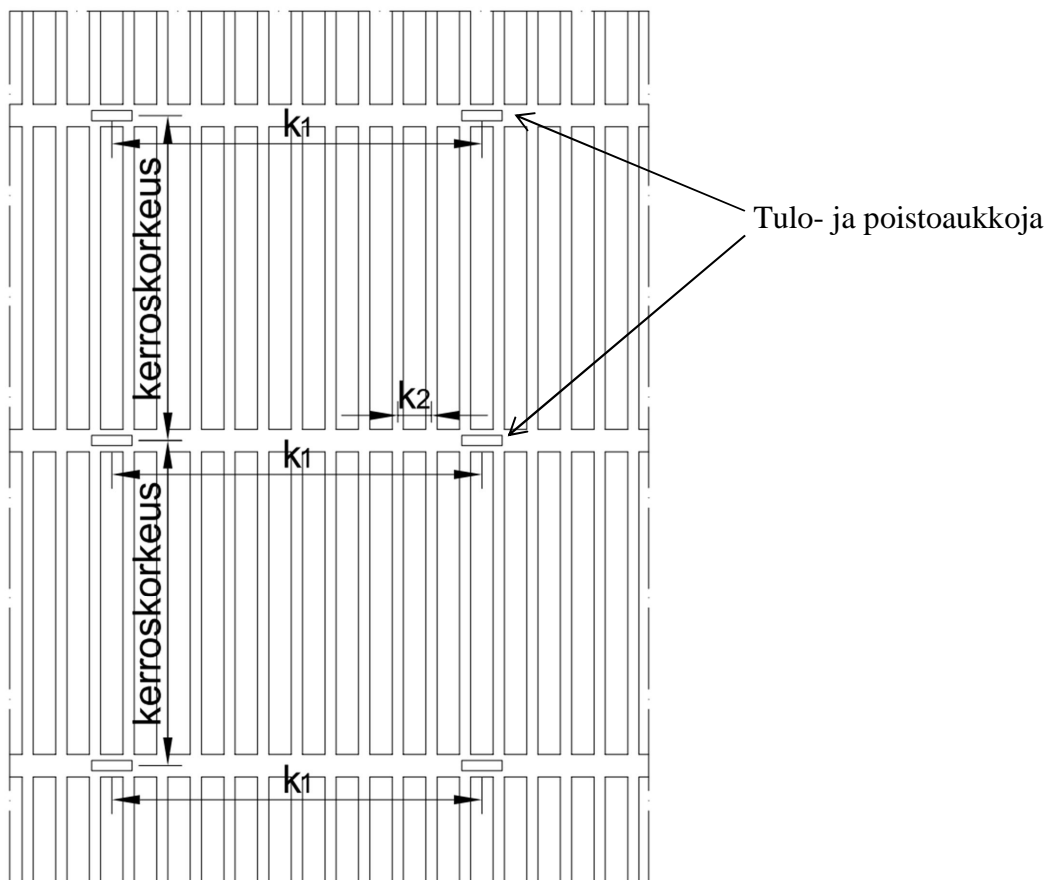
Kuva 4.1 Vasemmalla: Periaatekuva koko julkisivun kokoisen tuuletusurituksen geometriasta. Tulo- ja poistoaukot on ympyröity ja symmetriatasot on kuvattu katkoviivoilla. Oikealla: Periaatekuva virtauksen heikkenemisestä pystyurissa edettäessä kauemmaksi tulo- ja poistoaukoista. Kuvien mittasuhteet eivät ole todellisia.

Koko julkisivussa tuuletusurituksesta muodostuu kuvan 4.1 (vasemmalla) mukainen geometria. Koska virtaus luonnollisesti hidastuu pystyurissa edettäessä tulo- ja poistoau-

koista kauemmaksi (ks. kuva 4.1 oikealla), ohjelman ratkaistua virtauskentän koko tuuletusurituksessa jälkikäsitteijällä laskettiin tilavuusvirrat kauimmaisissa pystyurissa ja tilavuusvirtojen perusteella tehtiin käsinlaskuja kosteuden konvektiosta (ks. luku 4.2).

Koska suurelmentin tuuletusuritus on yhtenäinen kanavisto koko rakennuksen julkisivussa, sen täydellinen lämpö- ja virtaustekninen mallintaminen vaatisi suunnattomasti muistia ja laskentatehoa. Tutkimuksessa jouduttiin tekemään laskentaa keventäviä fyysikaalisia yksinkertaistuksia siten, että tuuletusuritukseseen tasaantuvaa lämpötilaa arvioitiin ensin yksinkertaistetuilla malleilla. Virtauskenttä koko julkisivun kokoisessa tuuletusurituksessa mallinnettiin lopulta mallilla, jossa reunaehtoina käytettiin ensin määritettyjä lämpötiloja (ks. luku 4.1).

Ulko- ja sisäilman välisen lämpötilaeron lisäksi tuuletusurituksen virtausten voimakkuuteen vaikuttaa geometriset tekijät. Tarkasteltavan julkisivun kokoisen tuuletusurituksen korkeudeksi valittiin kaikkiin tapauksiin 3 kerrosta eli 9 m. Tulo- ja poistoaukoista kauimpana olevien pystyurien tilavuusvirtojen kannalta kriittisin geometrinen parametri on tulo- ja poistoaukkojen keskinäinen etäisyys k_1 (ks. kuva 4.2). Muita keskeisesti vaikuttavia tekijöitä, joiden vaikutusta tutkittiin, ovat tulo- ja poistoaukkojen koko (sisämitat) sekä pystyurien k-jako (k_2). Pystyurat toteutetaan lähtökohtaisesti pyöreinä ja niiden halkaisijana käytettiin laskelmissa arvoja 17,5 ja 20 mm. Kokoojakanavat toteutetaan sisämitoiltaan pystyurien levyisinä ja 50 mm korkeina.

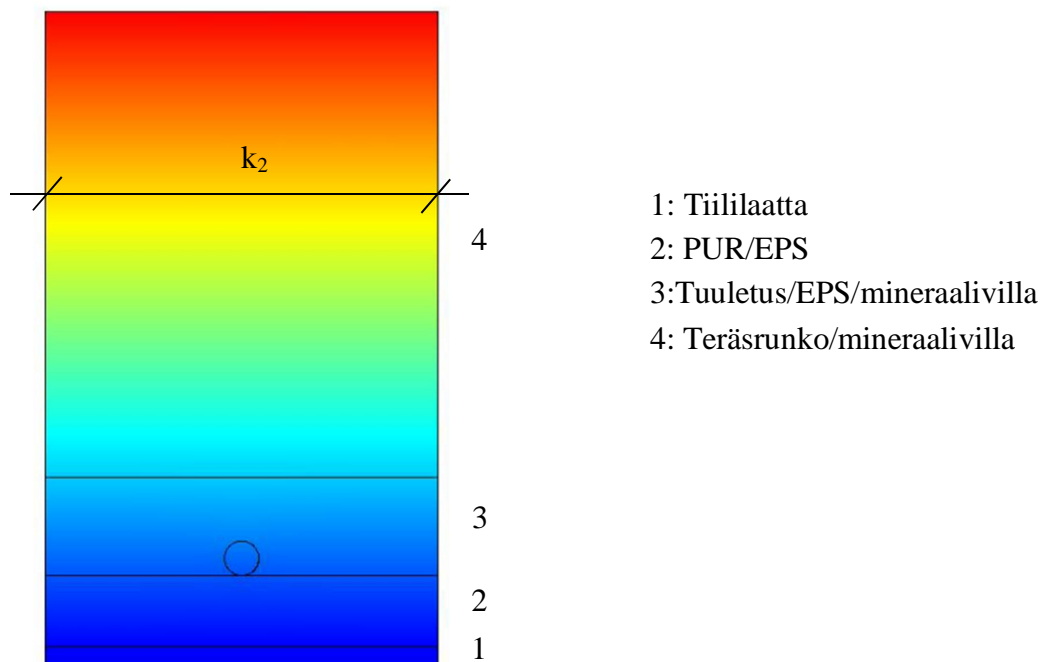


Kuva 4.2 Tuuletusurituksen virtauksen voimakkuuden kannalta kriittisimmät geometriset parametrit k_1 ja k_2 .

4.1 Fysikaaliset yksinkertaistukset

4.1.1 Virtauskentän mallintaminen

Tuuletusurituksen virtausteknistä laskentaa kevennettiin fysikaalisilla yksinkertaistuksilla siten, että lopulliset mallinnukset tehtiin pelkällä tuuletusurituksen geometrialla ilman ympäröiviä lämmöneristeitä tai seinän muita rakenteita. Tyypillisesti julkisivujen tuuletusurituksissa ilmavirtaus on lämpötilan tasoittumisen kannalta niin hidasta, että uritukseen virtaavan ilman lämpötila tasoittuu hyvin lyhyessä matkassa lämpötilaan, josta se ei käytännössä enää muutu. Tätä lämpötilaa nimitetään tässä työssä kyllästyslämpötilaksi ja sen arvo riippuu ulko- ja sisäilman lämpötiloista sekä suurelementin tapauksessa teräsrungon ja pintarakenteen muodostavan lisälämmöneristyskerroksen välisestä lämmönvastusten suhteesta. Kyllästyslämpötila eri tapauksissa määritettiin 2D-mallilla, jossa otettiin huomioon ainoastaan lämmön johtuminen (ks. kuva 4.1.1). Mallissa käytettyjen lisäeristys-elementtien materiaalien sekä ilman lämmönjohtavuudet on esitetty liitteessä 3. Teräsrunolle käytettiin eri tapauksissa koko rakenteen U-arvosta riippuvaa tehollista lämmönjohtavuutta, jonka avulla laskettuna U-arvo täyttää tasot 0,17, 0,14 tai 0,10 W/(m²K).



Kuva 4.1.1 Lämpötilajakauma kyllästyslämpötilan laskemiseen käytetyssä 2D-mallissa.

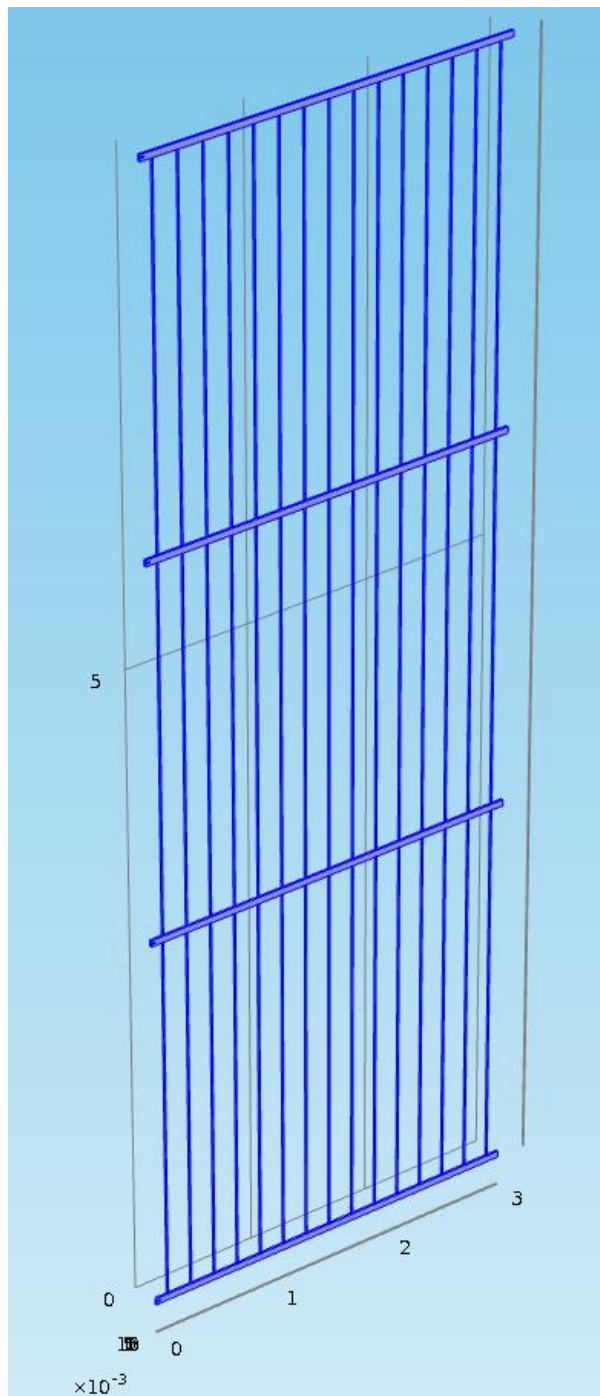
Tuuletusurituksen toimivuutta arvioitiin kahdella eri ulkoilman lämpötilan arvolla, -15 °C ja -20 °C. Tarkasteluissa noudatettiin samoja periaatteita kuin tässä aiemmassa tutkimuksessa [15], jossa stationäärinen ulkoilman lämpötilana käytettiin arvoa -10 °C. Tämän työn tapauksessa jouduttiin tekemään kuitenkin hiukan enemmän fysikaalisia yksinkertaistuksia (ks. esimerkiksi kuva 4.1.4), jolloin lisävarmuutta haluttiin tuoda käyttämällä tarkasteluissa kylmempiä ulkolämpötiloja. Toimintakriteerien täyttyminen tarkistettiin

kuitenkin ainoastaan -15 °C ulkolämpötilassa ja -20 °C tarkasteluilla haluttiin lähinnä lisätietoa siitä, kuinka rakenteen käyttäytyminen muuttuu ulkoilman kylmetessä. Sisäilman lämpötilana tarkasteluissa käytettiin 20 °C . Taulukossa 4.1.1 on esitetty laskennallisesti määritetyt kyllästyslämpötilan arvot eri tapauksissa.

Taulukko 4.1.1 Tuuletusurituksen kyllästyslämpötilat eri tapauksissa. $T_{sat} =$ Kylästyslämpötila [$^{\circ}\text{C}$].

U-arvo [W/(m ² K)]	T_{sat} [$^{\circ}\text{C}$]	
	$T_e = -15\text{ °C}$	$T_e = -20\text{ °C}$
0,17	-6,56	-10,35
0,14	-8,21	-12,23
0,10	-10,09	-14,38

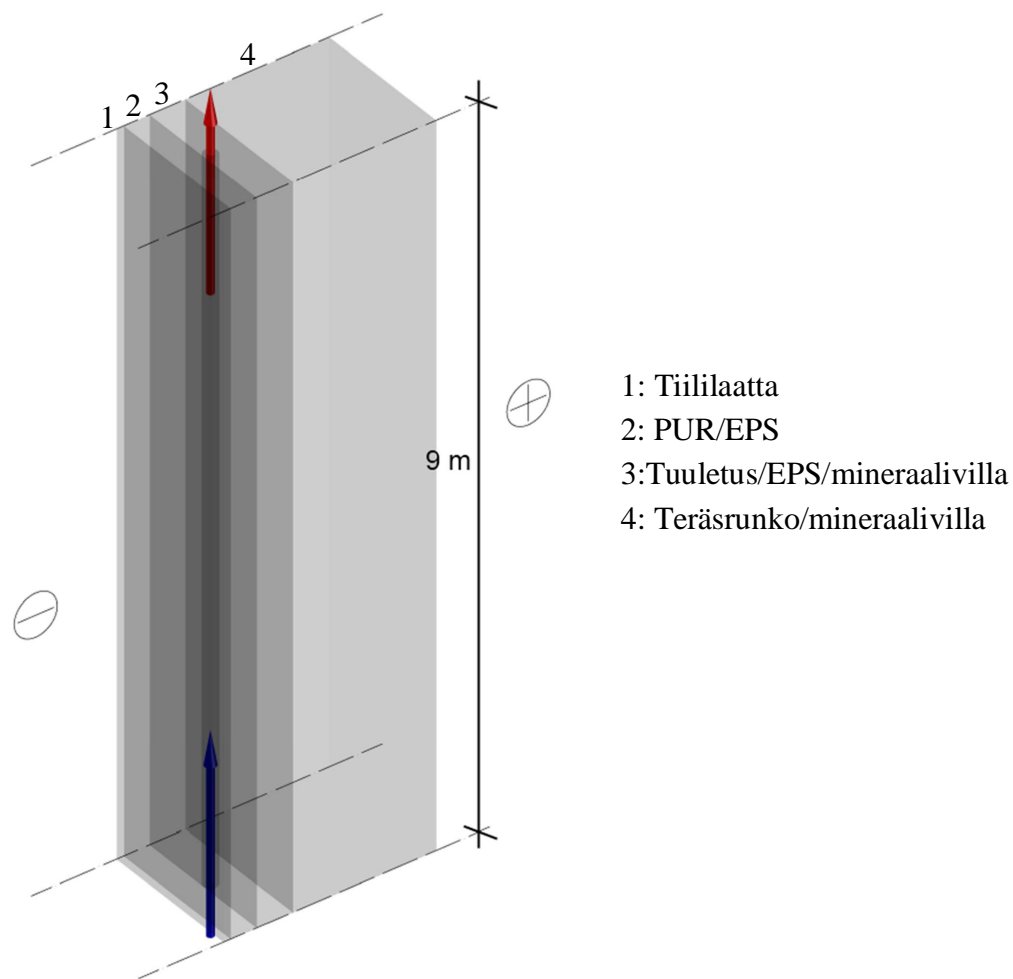
Mallinnettaessa virtauskenttä käyttäen kaavaa 4.6 ja pakottamalla reunaehdoilla tuuletusilman lämpötila etukäteen määräytyksi, tilavuusvirtojen tarkkuuden kannalta keskeisin vaikutus on koko tuuletusurituksen sisältämän ilmapatsaan kokonaispainon oikealla suuruudella. Paikallisilla lämpötilojen virheillä ei siis ole suurta vaikutusta vaan lämpötilaan käänteisesti verrannollisen tiheyden määräytyllä integraalilla tuuletusurituksen tilavuuden yli. Pakottamalla tuuletusilma käytännössä reunaehtojen mukaiseen vakiolämpötilaan tulosten tarkkuus riippuu siitä, kuinka hyvin vakiolämpötilan mukaisella vakiotiheydellä laskettu ilmapatsaan kokonaispaino vastaa todellista tilannetta. Kyllästyslämpötilaa ei tyydytty käyttämään vielä seinämien reunaehtona sillä se olisi johtanut jonkin verran todellista voimakkaampaan virtauskenttään ja olisi tuonut ylimääräistä epävarmuutta tuloksiin. Kyllästyslämpötilan avulla voitiin kuitenkin arvioida lopulliseen malliin muodostuvan virtauskentän suuruusluokkaa eri pystyurissa (ks. kuva 4.1.2).



Kuva 4.1.2 Esimerkki koko julkisivun kokoisen tuuletusurituksen mallin geometriasta.

Kyllästyslämpötilojen avulla määritettyjen virtauskenttien perusteella pystyurien virtausnopeuksien todettiin olevan välillä 0,05–0,1 m/s. Tuntemalla virtausnopeuksien suuruusluokka, todellisuutta lähempänä olevaa keskimääräistä tuuletusilman lämpötilaa voitiin arvioida 3 kerrosta korkealla yksiuraisella mallilla (ks. kuva 4.1.3), joka sisälsi virtauksen lisäksi myös lämmön johtumisen uraa ympäröivissä rakenteissa. Ulkoilma pakotettiin virtaamaan 0,05 ja 0,1 m/s keskimääräisellä nopeudella pystyuraan jonka jälkeen laskentaohjelman tuloksista laskettiin – jonkin verran kylmää lämpötilaa viileämpi – keskimääräinen tuuletusilman lämpötila T_{av} , jossa oli otettu huomioon myös uran alkuosassa vir-

taava viileämpi ilma. Tätä arvoa käytettiin lopullisiin tarkasteluihin edelleen kuvan 4.1.2 mukaisella mallilla.



Kuva 4.1.3 Periaatekuva yksiuraisesta mallista, jolla määritettiin tuuletusurituksen keskimääräinen lämpötila.

Taulukossa 4.1.2 on esitetty edellä kuvatulla tavalla määritetyt tuuletusurituksen keskimääräiset lämpötilat eri U-arvoilla ja ulkoilman lämpötiloissa.

Taulukko 4.1.2 Keskimääräiset lämpötilat tuuletusurituksessa eri tapauksissa.

U-arvo [W/(m ² K)]	T _{ulko} [°C]	T _{sat} [°C]	T _{0,05 m/s} [°C]	T _{0,1 m/s} [°C]	T _{av} [°C]
0,17	-15	-6,56	-6,76	-6,90	-6,83
	-20	-10,35	-10,58	-10,75	-10,67
0,14	-15	-8,21	-8,37	-8,48	-8,42
	-20	-12,23	-12,42	-12,55	-12,48
0,10	-15	-10,09	-10,20	-10,27	-10,24
	-20	-14,38	-14,51	-14,60	-14,55

Käyttämällä taulukon 4.1.2 mukaisia keskimääräisiä tuuletusurituksen lämpötiloja reunaehtoina lopullisessa tuuletusurituksen virtausteknisessä mallissa (ks. kuva 4.1.2) saatiin laskentaohjelman tuloksista pystyurien tilavuusvirrat, joiden avulla arvioitiin tuuletuksen kykyä poistaa kosteutta rakenteesta.

4.1.2 Kosteuden konvektion käsinlaskenta

Yhden pystyuran konvektiolla poistama kosteus voidaan laskea tunnettaessa uraan virtaavan ilman vesihöyrypitoisuus, urasta pois virtaavan ilman vesihöyrypitoisuus ja ilman tilavuusvirta uran läpi. Putkivirtaukselle on olemassa analyyttinen kaava, jonka avulla voidaan laskea tässä tapauksessa vesihöyrypitoisuus eri etäisyyksillä pystyuran alkupäästä [5]:

$$v(z) = v_k + (v_{in} - v_k) \exp(-z/L_c) \quad (4.1.1)$$

missä $v(z)$ = virtaavan ilman vesihöyrypitoisuus etäisyydellä z [m] uran alkupäästä virtaussuunnassa, [g/m^3]

v_k = vesihöyrypitoisuus tuuletusurien seinämällä, [g/m^3]

v_{in} = tuuletusurituksen sisään virtaavan ilman vesihöyrypitoisuus = v_a , [g/m^3]

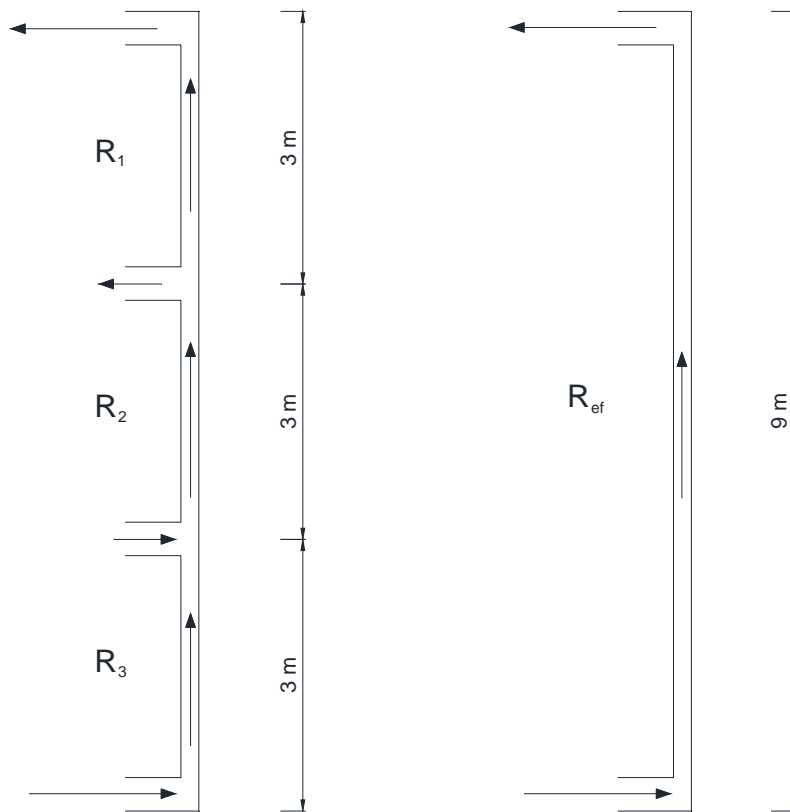
L_c = karakteristinen pituus = $R/(\beta \cdot c)$, [m]

R = tilavuusvirta pystyurassa, [m^3/s]

β = kosteudensiirtokerroin (ks. luku 2.2.1), [m/s]

c = pystyuran poikkileikkauksen piiri, [m]

Kolmen kerroksen tapauksessa yhden pystyuran matkalla on kaksi vaakakokoojaa, joista alemmasta virtaa lisää ilmaa pystyuraan ja ylemmästä poistuu. Tämä johtaa siihen, että keskimmäisen kerroksen kohdalla urassa on hiukan voimakkaampi tilavuusvirta kuin ylemmässä ja alemmassa. Asian tarkka huomioon ottaminen konvektiolla poistuvan kosteuden laskemisessa on hyvin monimutkainen tehtävä ja laskentaa yksinkertaistettiin siten, että pystyura ajateltiin kolmen kerroksen matkalla yhdeksi 9 m korkeaksi uraksi, johon virtaa ilmaa ainoastaan alhaalta ja poistuu ylhäältä (ks. kuva 4.1.4). Tehollisena tilavuusvirtana 9 m korkean uran läpi käytettiin kolmen kerroksen eri tilavuusvirtojen keskiarvoa.



Kuva 4.1.4 Kosteudenpoistokykyyn vaikuttavat tilavuusvirrat tulo- ja poistoaukkoihin nähden kauimmaisissa pystyurissa. Vasemmalla todellinen tilanne ja oikealla laskennassa käytetty yksinkertaistettu tilanne. $R_{ef} = (R_1 + R_2 + R_3)/3$. Kuvan mittasuhteet eivät ole todellisia.

Kosteudensiirtokertoimena käytettiin arvoa $1/360$ m/s, joka on tyypillisesti käytetty arvo tarkasteltaessa kosteuden haihtumista ulko-olosuhteissa. Kaavan 4.1.1 avulla huomataan, että virtaavan ilman vesihöyrypitoisuus urassa kyllästyy helposti 9 m matkalla käytännössä seinämien vesihöyrypitoisuuteen vielä keskimääräisellä virtausnopeudella $0,1$ m/s:

$$d = 0,0175 \text{ m}$$

$$c = d \cdot \pi = 0,0550 \text{ m}$$

$$A_{ura} = (d/2)^2 \pi = 0,000241 \text{ m}^2$$

$$R = 0,1 \text{ m/s} \cdot A_{ura} = 2,41 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\beta = 1/360 \text{ m/s}$$

$$L_c = R/(\beta \cdot c) = 0,1575 \text{ m}$$

$$\rightarrow \exp(-z/L_c) = \exp(-9/0,1575) \approx 0$$

$$\rightarrow v(9 \text{ m}) \approx v_k$$

(4.1.2)

Tilavuusvirran, uran seinämän vesihöyrypitoisuuden ja ulkoilman vesihöyrypitoisuuden avulla voidaan laskea yhdestä pystyurasta poistuvan kosteuden massavirta:

$$G_{\text{ulko}} = R(v_k - v_e) \quad (4.1.3)$$

Oletetaan, että tuuletusuritus poistaa tasaisesti kosteutta julkisivun koko pinta-alalta, jolloin yksi pystyura poistaa konvektiolla kosteutta pinta-alalta $A = 9 \text{ m} \cdot k_2$. Konvektiolla poistuvan kosteuden kosteusvirran tiheys on $g_{\text{conv}} = G_{\text{conv}} / A \text{ [g/(m}^2\text{s)]}$. Oletus on kosteusteknisessä mielessä turvallisella puolella, kun yksittäisen pystyuran tilavuusvirtana käytetään tuuletusurituksen heikoiten tuuletuvaa pystyuraa.

Konvektion poistamaa kosteutta laskiessa oletettiin, että tuuletusuran seinämien suhteellinen kosteus on noussut arvoon 90 % RH. Laskelmissa tarvittavat vesihöyrypitoisuudet laskettiin lämpötilojen ja suhteellisten kosteuksien perusteella käyttäen luvussa 2.2 esitettyjä kaavoja 2.2.2–2.2.4. Taulukossa 4.1.3 on esitetty tutkimuksen käsinlaskuissa tarvittut ilman vesihöyrypitoisuudet.

Taulukko 4.1.3 Kosteuden käsinlaskuissa käytetyt ilman vesihöyrypitoisuudet.

Ulkoilman lämpötila -15 °C		Ulkoilman vesihöyrypitoisuus (90 % RH)		
$v_{\text{ulko}} = 1,12 \text{ g/m}^3$				
U-arvo [W/(m²K)]	Keskimääräinen lämpötila urassa [°C]	$v_{k,\text{sat}}$ [g/m ³]	v_k (90 % RH) [g/m ³]	$v_k - v_e$ [g/m ³]
0,17	-6,83	2,79	2,51	1,39
0,14	-8,42	2,45	2,20	1,08
0,10	-10,24	2,10	1,89	0,76
Ulkoilman lämpötila -20 °C		Ulkoilman vesihöyrypitoisuus (90 % RH)		
$v_{\text{ulko}} = 0,80 \text{ g/m}^3$				
U-arvo [W/(m²K)]	Keskimääräinen lämpötila urassa [°C]	$v_{k,\text{sat}}$ [g/m ³]	v_k (90 % RH) [g/m ³]	$v_k - v_e$ [g/m ³]
0,17	-10,67	2,02	1,82	1,02
0,14	-12,48	1,73	1,56	0,76
0,10	-14,55	1,44	1,30	0,50

Tuuletusurituksen toimintakriteeri asetettiin laskemalla vertailuarvo sisäilman kosteusliästä aiheutuvalle diffusiiviselle kosteusvirran tiheydelle g_v , jolloin toimintakriteerinä käytettiin ehtoa:

$$g_{\text{conv}} \geq g_v \quad (4.1.4)$$

Vertailuarvoa g_v määrittäessä oletettiin, että suurelementti (teräsrunko 150 mm) on kiinnitetty 120 mm paksuun betoniseinään. Taulukossa 4.1.4 on esitetty vertailuarvon

laskennassa käytetyt materiaalikerrosten vesihöyrynläpäisevyydet, paksuudet ja niistä lasketut s_d -arvot.

Taulukko 4.1.4 *Materiaalikerrosten vesihöyrynvastukset määritettäessä vertailuarvoa g_v .*

Materiaalikerros	μ [m]	d [m]	s_d [m]
Tiililaatta	85	0,01	0,85
PUR/EPS	120	0,036	4,32
EPS (17,5 mm)	30	0,0175	0,525
Mineraalivilla	1.2	0,1825	0,219
Betoni	100	0,12	12
		Σs_d	17,914

Kosteusvirran tiheyden vertailuarvo voidaan nyt laskea luvun 2.2.3 kaavalla 2.2.13. Sisäilman kosteuslisänä käytettiin arvoa 6 g/m^3 , joka on suositeltava kosteuslisän arvo Viiron asuinrakennuksissa (ks. kuva 5.3.5).

$$g_v = \Delta v \frac{\delta_{v,a}}{\sum s_d} \quad (4.1.5)$$

$$g_v = 6 \cdot \frac{2,5 \cdot 10^{-5}}{17,914} \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{s}} = 8,37 \cdot 10^{-6} \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{s}} = 0,72 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{vrk}}$$

Arvioitaessa eri geometrisilla parametreilla toteutetun tuuletusurituksen toimivuutta lähtökohtana pidettiin, että luonnollisella konvektiolla poistuvan kosteuden kosteusvirran tiheys g_{conv} saa olla hiukan pienempi kuin vertailurakenteella, sillä g_{conv} :ia laskettaessa eri tapauksissa käytettiin heikoiten tuulettuvien pystyurien arvoja. Vertailuarvoksi g_v päätettiin laskelmien perusteella arvo $0,60 \text{ g/(m}^2\text{vrk)}$. Vaikka edellä kuvatut stationääritilan tarkastelut tehtiin kahdella eri ulkolämpötilan arvolla, toimintakriteerin täytyminen tarkistettiin ainoastaan $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ ulkolämpötilan tarkasteluista. Ulkolämpötilan vaikutusta lasketatuloksiin on käsitelty lisää luvuissa 6 ja 7.

4.1.3 Tuuletusratkaisut

Tuuletusurituksen toimintaan vaikuttavia muuttuvia geometrisia tekijöitä ovat tulo- ja poistoaukkojen koko ja tiheys (k_1 , ks. kuva 4.2), pystyurien halkaisija ja tiheys (k_2). Näiden yhdistelmistä muodostuvia tutkittavia tapauksia nimitetään tuuletusratkaisuiksi. Taulukossa 4.1.5 on esitetty tässä tutkimuksessa tarkastellut suurelementin mahdolliset tuuletusratkaisut.

Taulukko 4.1.5 *Tuuletuksen voimakkuuteen vaikuttavista geometrisista tekijöistä muodostuvat tarkastellut tuuletusratkaisut.*

Tuuletusratkaisu	Tuuletusurien halkaisija [mm]	Tuuletusurien jako, k_2 [mm]	Tulo- ja poistoaukkojen sisämitat	Tulo- ja poistoaukkojen tiheys, k_1^*
1	17,5	200	10 mm x 50 mm	Tapaus 1
2	17,5	200	10 mm x 50 mm	Tapaus 2
3	17,5	200	10 mm x 70 mm	Tapaus 1
4	17,5	200	10 mm x 70 mm	Tapaus 2
5	17,5	200	10 mm x 70 mm	Tapaus 3
6	20	200	10 mm x 70 mm	Tapaus 3
7	17,5	100	10 mm x 70 mm	Tapaus 3
8	20	100	10 mm x 70 mm	Tapaus 3
9	17,5	200	10 mm x 70 mm	Tapaus 4
10	20	200	10 mm x 70 mm	Tapaus 4
11	17,5	100	10 mm x 70 mm	Tapaus 4
12	20	100	10 mm x 70 mm	Tapaus 4

* ks. liite 2.

Luvussa 6.1 on esitetty laskentaohjelmalla määritetyt U-arvosta ja ulkolämpötilasta riippuvat pystyurien tilavuusvirrat eri tuuletusratkaisuissa sekä tilavuusvirtojen perusteella tehdyt kosteustekniset käsinlaskentatulokset.

5 LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNISET TARKASTELUT

Lämpö- ja kosteustekniset tarkastelut tehtiin saksalaisen Fraunhofer IBP -instituutin kehittämällä lämpö- ja kosteusteknisellä WUFI 1D Pro 5.1 -laskentaohjelmalla. Ohjelma on räätälöity suunnittelu- ja tutkimustyön kannalta helppokäyttöiseksi siten, että ohjelmaan syötettävät tiedot koskevat ainoastaan tarkasteltavan rakenteen rakennusfysikaalisia ominaisuuksia sekä sisä- ja ulkoilman olosuhteita. Toisaalta ohjelman heikkoutena voidaan pitää sitä, että lämmön- ja kosteudensiirron mekanismeja mallintavia yhtälöitä tai numeeriseen laskentaan liittyviä menetelmiä ei voi muokata.

Laskentaohjelmaan syötetään ulkoilman olosuhteet säädätiedostojen avulla, joista lasketaan sisäilman suhteellinen kosteus sisäilman kosteuslisän avulla. Sisäilman lämpötilana käytettiin vakioarvoa 20 °C. Laskennassa tarvitaan lisäksi suuri määrä tietoa rakennekerrosten materiaaliominaisuuksista, joita on käsitelty luvussa 5.2 ja liitteessä 3. Laskentaohjelman tuloksina saadaan lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot tunnin tarkkuudella määrättyissä monitoripisteissä. Tuloksia käytettiin tutkittavien rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden arviointiin kosteuden kondensoitumisen tai homeen kasvun kannalta. Laskentaohjelmassa huomioon otetut lämmön- ja kosteudensiirron mekanismit on kuvattu luvussa 2.2.4.

5.1 Tutkitut rakenteet

Käytettäessä suurelementtiä korjausrakentamisessa rakenteiden toimintaa tutkittiin tapauksissa, joissa suurelementti on kiinnitetty joko tiiliseinään (kalkkihiekkatiili ja poltettu tiili) tai betonisandwichseinään, jossa betonisandwichin ulkokuori voidaan joko purkaa ensin tai suurelementti kiinnittää suoraan ulkokuoreen.

Uudisrakentamisen tapauksissa tutkittiin tilanteita, joissa suurelementti kiinnitetään valunaikaista kosteutta sisältävään 120, 150 tai 250 mm paksuun betoniseinään. Tavoitteena oli selvittää, pysyykö suurelementti kosteusteknisesti toimivana, jos suurelementti kiinnitetään välittömästi jälkihoitoajan jälkeen betoniin tai kuinka paljon betonin täytyy antaa kuivua ennen suurelementin asentamista. Jälkimmäisissä tapauksissa betoniseinä mallinnettiin ensin ilman suurelementtiä vakio-olosuhteiden ($T = 10 \text{ °C}$, $\phi = 70 \text{ \% RH}$) vallitessa molemmiin puolin ja selvitettiin kosteusjakauma kun betoniseinä on kuivunut syvyydellä $L/5$ ($L =$ betoniseinän paksuus) tasapainokosteuspitoisuuteen, joka vastaa joko 90, 85 tai 80 % RH suhteellista kosteutta. Osittain kuivuneiden betoniseinien kosteusjakautumia käytettiin lopulta lähtötietoina kokonaisten rakenteiden dynaamisissa tarkasteluisissa. Osassa uudisrakentamisen tapauksia tutkittiin auttaako kosteusteknisessä toiminnassa

ns. älykäs höyrynsulkukalvo suurelementin ja betonin välissä. Älykkäällä höyrynsulkukalvolla tarkoitetaan kalvoa, joka vastustaa vesihöyryn diffuusiota mutta suhteellisen kosteuden noustessa diffuusiovastus laskee. Sekä uudis- että korjausrakentamiseen liittyvät tutkimuksissa tarkastellut rakennetyypit on esitetty liitteessä 4.

5.2 Materiaaliominaisuudet

Tampereen teknillinen yliopisto on tehnyt aikaisemminkin vuosina 2005–2009 yhteistyötä tämän työn tilaajan kanssa suurelementissä käytettävää lisäeristyslementtiä koskevissa tuotekehitysprojekteissa. Lisäeristyslementtien materiaaleille (tiililaatta ja PUR/EPS-sekoitus) käytettiin samoja materiaaliominaisuuksia kuin tässä aiemmassa tutkimuksessa [16]. Lopuille tutkittujen rakennetyyppien materiaaleille käytettiin kansallisessa FRAME-projektissa [17] käytettyjä materiaaliominaisuuksia.

Betonin kuivumisen kannalta keskeisin materiaaliominaisuus on betonin kosteusdiffusiviteetti. WUFI-laskentaohjelma käyttää kapillaarisuudesta aiheutuvan nestemäisen kosteusvirran (ks. yhtälö 2.2.14) laskemiseen kahta eri kosteusdiffusiviteettiä:

- *Liquid transport coefficient D_{ws} (suction)* ja
- *Liquid transport coefficient D_{ww} (redistribution)*

Ohjelma valitsee ajan hetkestä riippuvien reunaehtojen perusteella koko rakenteelle käytettäväksi kosteusdiffusiviteetin seuraavasti:

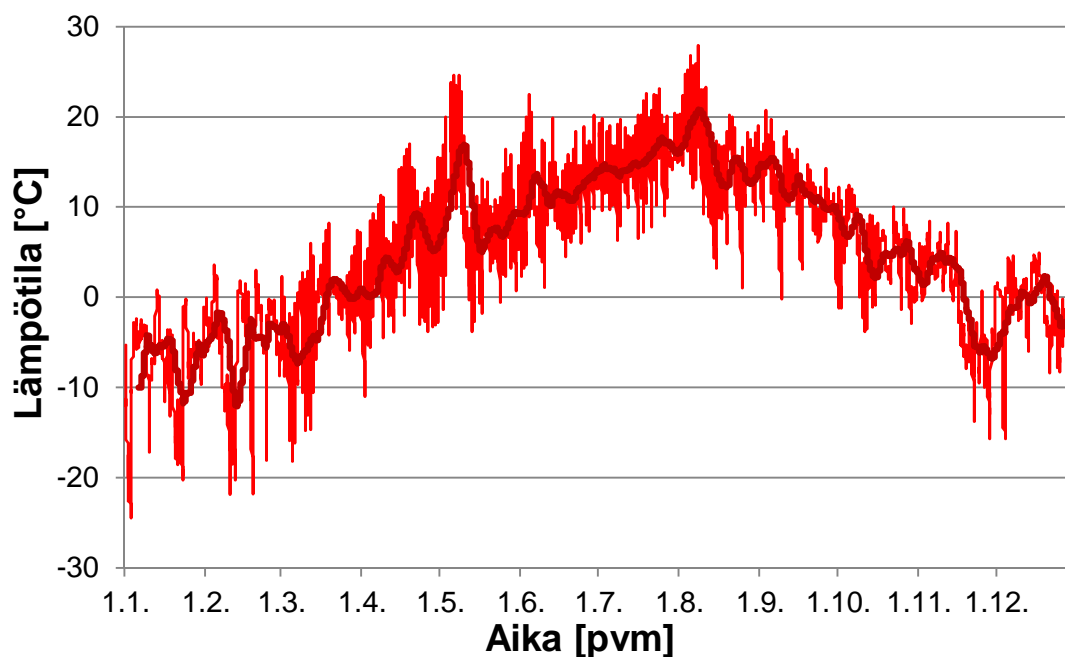
- $D_w = D_{ws}$, kun sademäärä $> 0,1$ mm/h
- $D_w = D_{ww}$, kun sademäärä $\leq 0,1$ mm/h

Jos laskentaohjelmaan syötetty ei-hygroskooppien materiaali ei sisällä ollenkaan käyttäjän määrittelemää tasapainokosteuskäyrää, ohjelma käyttää sille ns. oletustasapainokosteuskäyrää, jonka ohjelma laskee käytännössä ainoastaan huokoisuuden perusteella. Lämpö- ja kosteusteknisissä tarkasteluissa käytetyt materiaaliominaisuudet on esitetty taulukoituina liitteessä 3. Kaikkien materiaalien lähtökosteutena käytettiin 60 % RH suhteellista kosteutta vastaavaa tasapainokosteutta, paitsi betonille uudisrakentamisen tapauksissa.

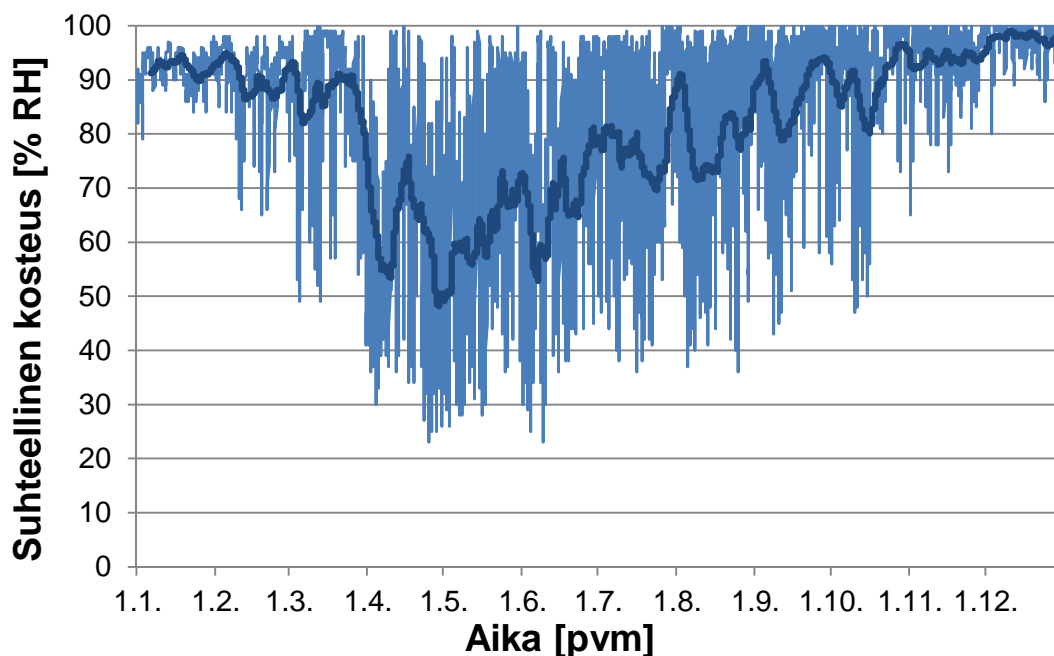
5.3 Reunaehdot ja testiolosuhteet

Rakenteiden ulkopinnan reunaehtoina eli ulkoilman olosuhteina tarkasteluissa käytettiin rakennusfysikaalista testivuotta Jokioinen 2004, joka on todettu FRAME-projektissa kriittiseksi n. 90 % kriittisyystasoa vastaavaksi Suomen ilmastovuodeksi homeen kasvun tai kosteuden kondensoitumisen kannalta tarkasteltuna rakenteille, joissa on hyvä suoja viistosadetta vastaan, mutta joissa ulkoilman korkea suhteellinen kosteus voi aiheuttaa erilaisissa rakenteiden tuuletusratkaisuissa homeen kasvulle otollisia olosuhteita [17]. Tarkasteltujen rakenteiden ilmansuunnaksi valittiin pohjoinen, joka todettiin alustavilla vuoden pituisilla tarkasteluilla tutkittavien rakenteiden kestävyuden kannalta kriittisimmäksi julkisivun ilmansuunnaksi.

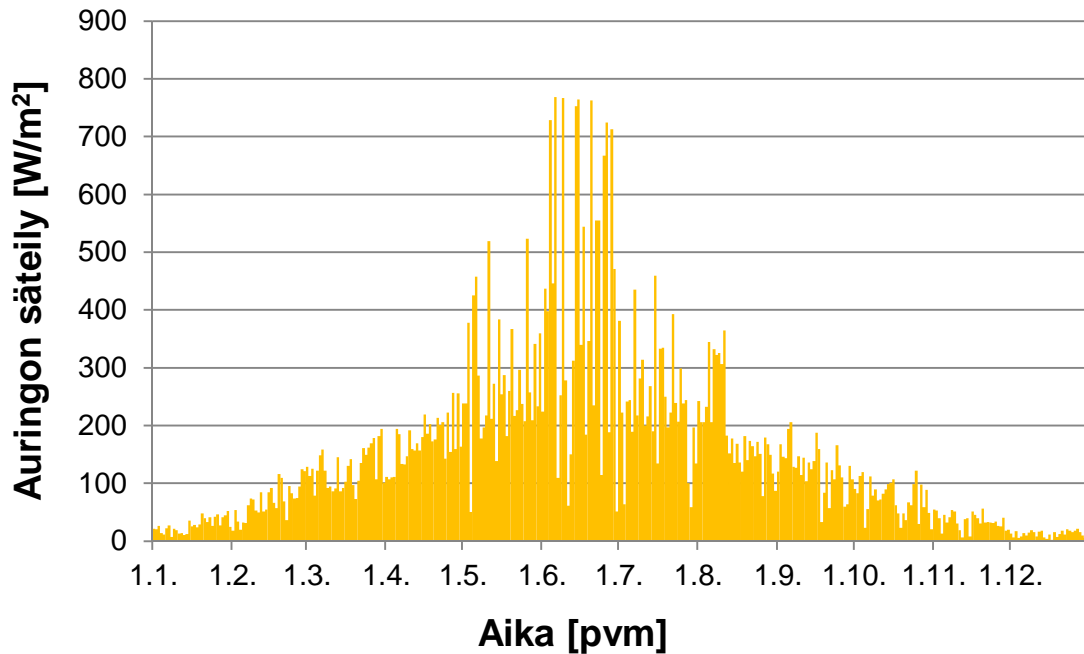
Kuvissa 5.3.1–5.3.4 on esitetty lämpötila ja suhteellinen kosteus Jokioisissa 2004 sekä pohjoiseen suunnatulle korkealle (yli 20 m) pystypinnalle kohdistuvat auringon kokonais-
säteily ja viistosade.



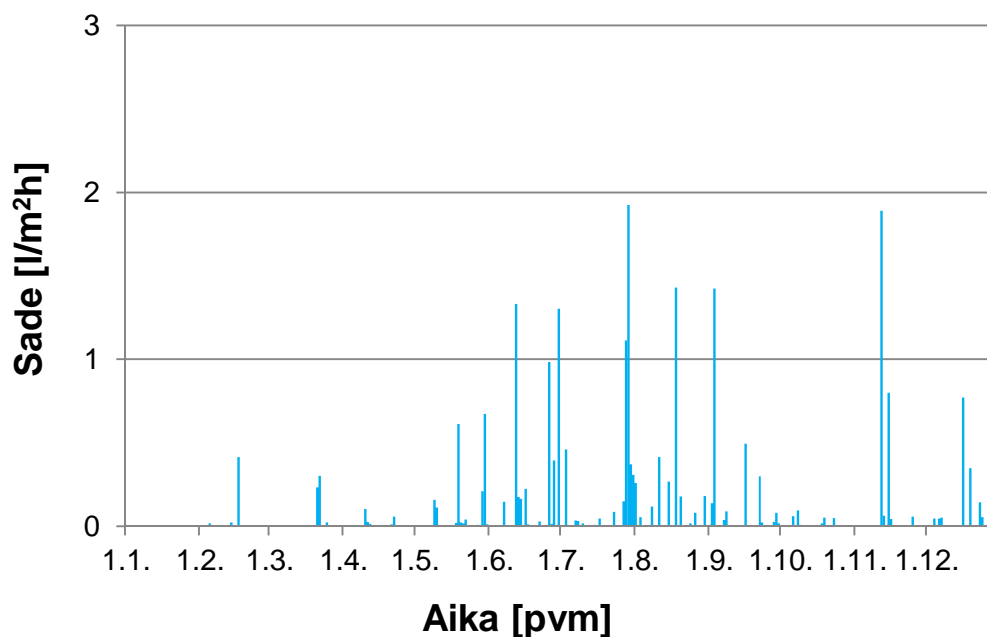
Kuva 5.3.1 Lämpötila Jokioisissa vuonna 2004.



Kuva 5.3.2 Suhteellinen kosteus Jokioisissa vuonna 2004.



Kuva 5.3.3 Auringon säteilyn kokonaisteho (suora + diffuusi) pohjoiseen suunnatulle pystypinnalle Jokioisissa vuonna 2004.

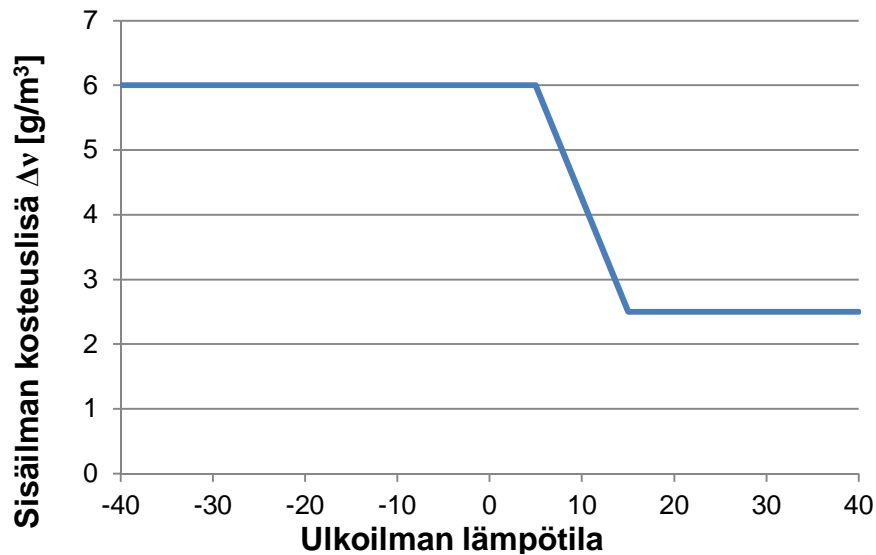


Kuva 5.3.4 Viistosateen määrä yli 20 m korkeudessa olevalle pohjoiseen suunnatulle pystypinnalle Jokioisissa vuonna 2004. Viistosateesta on poistettu lumena satavan veden osuus ($T < 0\text{ }^\circ\text{C}$).

Rakenteiden ulkopinnan (tiililaatta) säteilyn absorptiokertoimena käytettiin laskentaohjelman suosittelemaa arvoa punaiselle tiilelle 0,68. Pitkäaaltoiseen lämpösäteilytaseeseen vaikuttavana emissiviteettinä käytettiin arvoa 0,9. Taivaan tehollinen säteilylämpötila

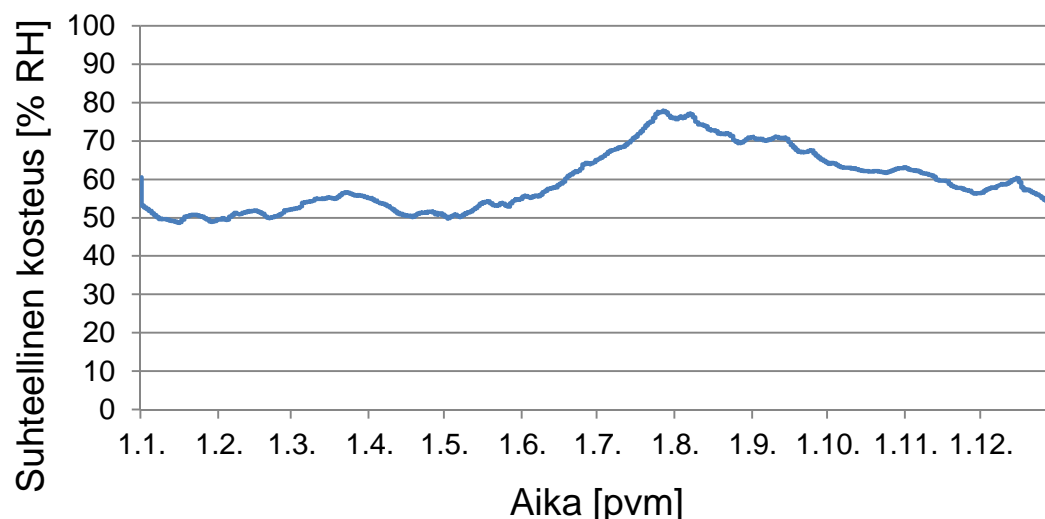
oletettiin laskennassa samaksi kuin ulkoilman lämpötila, joten ulkopinta ei jäähtynyt tarkasteluissa ulkoilmaa alhaisemmalle tasolle.

Sisäilman kosteuslisänä tarkasteluissa käytettiin hiukan korkeampia arvoja kuin mitä RIL 107-2012:ssa esitetään asuinrakennuksille. Käytetty sisäilman kosteuslisän suunnittelukäyrä ulkolämpötilan funktiona perustuu mittauksiin virolaisissa asuinrakennuksissa [18] ja se on esitetty kuvassa 5.3.5.



Kuva 5.3.5 Lämpö- ja kosteusteknisissä tarkasteluissa käytetty sisäilman kosteuslisä ulkolämpötilan funktiona.

Kuvassa 5.3.6 on esitetty ulkoilman olosuhteiden ja sisäilman kosteuslisän avulla laskettu sisäilman suhteellinen kosteus vakio­lämpötilassa 20 C.



Kuva 5.3.6 Lämpö- ja kosteusteknisissä tarkasteluissa käytetty sisäilman suhteellinen kosteus.

Tuuletusurituksen vaikutus mallinnettiin laskentaohjelmassa yhtenäisenä ilmakerroksena, jolle laskettiin tehollinen ilmanvaihtokerroin, joka vastaa tuuletusurituksen ilmanvaihtoa suhteutettuna ilmakerroksen tilavuuteen. Laskentaohjelmassa on käytettävissä valmiita ilmakerroksia, joissa on säteilyn ja konvektion vaikutukset huomioon ottavat teholliset arvot lämmönjohtavuudelle ja vesihöyrynläpäisevyydelle. Laskennassa käytettiin 20 mm paksua ilmakerrosta, jolle käytettiin kuitenkin PUR/EPS-kerroksen lämmönjohtavuutta, sillä kuvitteellisen ilmakerroksen tilalla on todellisuudessa enimmäkseen lämmöneristettä. Ilmakerrokselle laskettiin tehollinen ilmanvaihtokerroin kriittisimmän pystyuran tilavuusvirran ja pystyurien k_2 -jaon perusteella. Vaikka tuuletusurituksen virtauskenttä muuttuu todellisuudessa ulkolämpötilan muuttuessa sekä tuulenpaineiden muuttuvista vaikutuksista, tehollisena ilmanvaihtokertoimenä käytettiin vakioarvoa, joka päätettiin laskea tapauksesta tuuletusratkaisu 4 (ks. luku 4.1.3, taulukko 4.1.5, U-arvo $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ja ulkoilman lämpötila -15 °C):

Tilavuusvirta urassa (ks. luku 6.1, taulukko 6.1.1), $R = 1,36 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

Yksittäistä pystyuraa koskevan tehollisen ilmakerroksen tilavuus: $V = k_2 \cdot d \cdot h$

missä $k_2 = 0,2 \text{ m}$, $d = 0,02 \text{ m}$ (ilmakerroksen paksuus) ja $h = 9 \text{ m}$ (pystyuran korkeus)

$V = 0,036 \text{ m}^3$

Ilmanvaihtokerroin = $R / V = 3,78 \cdot 10^{-4} \text{ 1/s} = 1,36 \text{ 1/h}$

Jonkin verran tarkemman vuoden eri ajanhetkinä muuttuvan ilmanvaihtokertoimen huomioon ottaminen olisi ollut työssä mahdollista, mutta se olisi vaatinut paljon ylimääräisten virtauslaskelmien tekemistä COMSOL Multiphysics -ohjelmalla. Työssä tyydyttiin siksi käyttämään läpi vuoden vakioilmanvaihtokerrointa.

5.4 Toimintakriteerit

Tarkasteltujen rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden yhtenä edellytyksenä pidettiin, että rakenteisiin ei saa muodostua yli 1 kk mittaista yhtäjaksoista kondenssia. Kondenssiksi tulkittiin tilanne, jossa suhteellinen kosteus nousee arvoon $\geq 97 \text{ \% RH}$, joka vastaa materiaalien hygroskooppista kyllästyskosteutta. Toisena toimintakriteerinä pidettiin lämpö- ja kosteusteknisten laskentatulosten perusteella laskettavaa homeindeksiä, jonka sallittavaksi raja-arvoksi asetettiin < 1 . Homeindeksi laskettiin VTT:n ja TTY:n kehittämällä parannetulla homemallilla, jota on kuvailtu seuraavassa luvussa.

5.4.1 Parannettu homemalli

Tässä työssä käytetty parannettu homemalli perustuu jo 1980-luvulla alkaneeeseen Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) tutkijan Hannu Viitasen rakennushomeisiin liittyvään tutkimustyöhön [19]. Tutkimusten perusteella VTT:llä on kehitetty matemaattinen malli homeen kasvun laskemiseksi lämpötila- ja kosteusolosuhteiden perusteella puulle (kuusi ja mänty) [20]. 2000-luvulla VTT:n ja TTY:n yhteistyöllä mallia on kehitetty sel-

laiseksi, että sillä voidaan ottaa huomioon paremmin muuttuvien lämpötila- ja kosteusolosuhteiden vaikutus sekä tarkasteltavan materiaalin homehtumisherkyys [21]. Parannettu homemalli perustuu laajaan koesarjaan, jossa materiaalinäytteitä on säilytetty todellisissa muuttuvissa ulkoilman olosuhteissa sekä laboratorio-olosuhteissa, jolloin säilytyksen aikana näytteisiin kehittyi todellista homekasvustoa. Kasvuston määrän kuvaamiseksi homemallissa käytetään visuaaliseen havainnointiin perustuvaa homeindeksiä ($M [-]$), jonka määritelmä on esitetty taulukossa 5.4.1.

Taulukko 5.4.1 Homeindeksin visuaaliseen havainnointiin perustuvat luokitusperusteet.

Homeindeksi	Luokitusperusteet
0	Ei kasvua, pinta puhdas
1	Mikroskoopilla havaittava kasvu, paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma
2	Mikroskoopilla havaittava kasvu, useita rihmastopesäkkeitä muodostunut
3	Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto alle 10 % alasta (uusia itiöitä alkaa muodostua) tai mikroskoopilla havaittava kasvu, peitto alle 50 %
4	Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto noin 10-50 % alasta tai mikroskoopilla havaittava kasvu, peitto yli 50 %
5	Silmin havaittava kasvu, paikoin runsas tai rihmaston peitto yli 50 % alasta
6	Erittäin runsas kasvu, rihmaston peitto lähes 100 %

Homemallin kehitystyössä tehdyn regressioanalyysin mukaan homeen kasvunopeus jollakin ajan hetkellä riippuu lämpötilasta, suhteellisesta kosteudesta sekä parametreista k_1 ja k_2 :

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7 \cdot \exp(-0,68 \ln T - 13,9 \ln RH + 66,02)} k_1 k_2 \quad (5.4.1)$$

missä dM/dt = homeindeksin kasvu- tai taantumanoisuus, [1/h]

T = lämpötila, [°C]

RH = suhteellinen kosteus, [% RH]

Homeen kasvuun vaikuttavia materiaaliparametreja ovat:

- Homeen kasvunopeuden herkkyysluokka
- Homeen maksimiarvon herkkyysluokka ja
- Homeen taantumaluokka (taantumakerroin)

Homeen kasvunopeuden ja homeen maksimi-arvon herkkyysluokat ovat kaikille tähän mennessä tutkituille materiaaleille samat, paitsi kevytbetonille, jonka homeen kasvunopeuden herkkyyttä kuvaa homeutumisherakkyysluokka ”herkkä” mutta homeen maksimi-arvon herkkyyttä homeutumisherakkyysluokka ”kestävä” (ks. taulukko 5.4.2). Parametri k_1 riippuu homeindeksin arvosta tarkasteltavalla ajan hetkellä sekä homeen kasvunopeuden herkkyysluokasta taulukon 5.4.2 mukaisesti. Taulukossa on lisäksi esitetty homeen maksimimäärän herkkyysluokasta riippuvat suureet A, B ja C, joita tarvitaan parametrin k_2 laskemisessa. A, B ja C ovat homemallin kehittämisessä käytettyyn regressiomalliin liittyviä lukuja. Parametrin k_2 laskemiseen tarvitaan lisäksi homeen kasvunopeuden herkkyysluokan perusteella valittava RH_{\min} eli suhteellisen kosteuden raja-arvo, jota kuivemmissä olosuhteissa voidaan olettaa, että homehtuminen on niin hidasta, että sitä ei tarvitse ottaa huomioon.

Taulukko 5.4.2 Homeen kasvunopeuden laskennassa tarvittava parametri k_1 sekä parametrin k_2 laskemiseen tarvittavat suureet eri homeutumisherakkyysluokissa.

Homeutumisherakkyysluokka	k_1 [-]		A [-]	B [-]	C [-]	RH_{\min} [% RH]
	$M < 1$	$M \geq 1$				
Hyvin herkkä	1	2	1	7	2	80
Herkkä	0,578	0,386	0,3	6	1	80
Kohtalaisen kestävä	0,072	0,097	0	5	1,5	85
Kestävä	0,033	0,014	0	3	1	85

Tyypillisten rakennusmateriaalien homeen kasvunopeuden herkkyysluokat arvioidaan seuraavasti:

- Hyvin herkkä (*very sensitive*): Käsittelemätön puu, runsaasti ravinteita sisältävä puu. Esimerkiksi: sahattu mänty ja kuusi, höylätty mänty.
- Herkkä (*sensitive*) Höylätty kuusi, paperipintaiset tuotteet ja kalvot, puupohjaiset levyt. Esimerkiksi: kuusiliimapuulevy, kevytbetoni (kasvunopeus) ja paperipintainen PUR.
- Kohtalaisen kestävä (*medium resistant*): Sementtipohjaiset materiaalit, muovipohjaiset materiaalit, mineraalivillat. Esimerkiksi: karbonatisoitunut vanha betoni, kevytsorabetoni, kevytbetoni (homeen maksimimäärä), lasivilla, polyesterikuitueriste, EPS ja pinnoittamaton PUR.
- Kestävä (*resistant*): Lasi- ja metallimateriaalit, tehokkaita suoja-aineita sisältävät tuotteet. Esimerkiksi: alkalinen uusi betoni, homesuojatut puukuitueristeet.

Yhtälön 5.4.1 parametrin k_2 arvo muuttuu ajan funktiona, sillä se riippuu homeutumisherakkyysluokan lisäksi lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. Sen laskemiseksi täytyy ensin laskea homeindeksin maksimi-arvo M_{\max} , joka kuvaa kuinka suuri homeindeksi on

mahdollinen tarkasteltavan ajan hetken olosuhteissa sekä RH_{crit} , joka kuvaa suhteellisen kosteuden raja-arvoa, jonka yläpuolella homeindeksi alkaa kasvaa:

$$RH_{crit} = \max \begin{cases} -0,00267 \cdot T^3 + 0,16 \cdot T^2 - 3,13 \cdot T + 100 \\ RH_{min} \end{cases} \quad (5.4.2)$$

$$M_{max} = \max \begin{cases} A + B \left(\frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} \right) - C \left(\frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} \right)^2 \\ 0 \end{cases} \quad (5.4.3)$$

Tunnettaessa M_{max} , parametri k_2 lasketaan kaavalla:

$$k_2 = \max \begin{cases} \frac{1 - \exp[2,3 \cdot (M - M_{max})]}{24} \\ 0 \end{cases} \quad (5.4.4)$$

Olosuhteissa, joissa joko $T < 0$ °C tai $RH < RH_{crit}$ homeen kasvu taantuu. Homeen kasvunopeus dM/dt on taantuessa negatiivinen ja sitä ei lasketa silloin yhtälön 5.4.1 mukaisesti vaan kaavalla:

$$\frac{dM}{dt} = \max \begin{cases} -0,00133, \text{ kun } t - t_R \leq 6h \\ 0, \text{ kun } 6h \leq t - t_R \leq 24h \\ -0,000667, \text{ kun } t - t_R < 24h \end{cases} \quad (5.4.5)$$

missä t = ajan hetki, [h]

t_R = ajan hetki, jossa taantuminen alkaa, [h]

Homemallin eri kertoimien määrittäminen on tehty käyttäen yksinkertaisinta numeerista integrointimenetelmää, Eulerin menetelmää (*forward time-stepping*), ja aika-askeleena arvoa 1 h. Käyttäessä homemallia homeindeksin laskenta tulee suorittaa samalla menetelmällä, eli käytännössä kaavalla:

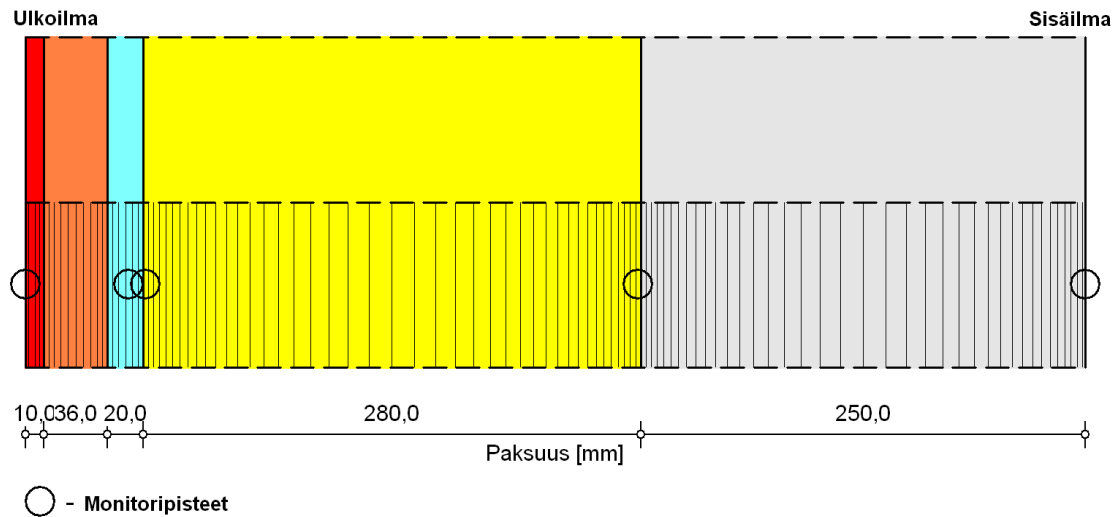
$$M_{n+1} = M_n + \frac{dM}{dt}_n \cdot 1h \quad (5.4.4)$$

missä M_{n+1} = homeindeksin arvo ajan hetkellä (n+1) h, [-]

M_n = homeindeksin arvo ajan hetkellä n h, [-]

$(dM/dt)_n$ = homeen kasvunopeus ajan hetkellä n h, [1/h]

Tässä työssä tarkastelluille rakenteille tehtiin WUFI-laskentaohjelmalla 10 vuoden pituiset simuloinnit. Simulointien tuloksina saaduista lämpötilan ja suhteellisen kosteuden ajasta riippuvista arvoista laskettiin myös homeindeksin kuvaaja koko 10 vuoden ajalta, jotta huomattaisiin varmasti onko homeen kasvu kumuloituvaa. Kuvassa 5.4.1 on esitetty esimerkkinä tarkasteltavat pisteet (monitoripisteet) seinärakenteessa US1, joissa rakenteen toimivuutta tarkasteltiin.



Kuva 5.4.1 Monitoripisteet seinärakenteessa US1.

Monitoripisteet asetettiin vastaaviin kohtiin kaikissa tutkittavissa rakenteissa ja kriittisimmäksi tarkasteltavaksi pisteeksi osoittautui kaikissa tapauksissa tuuletusura (toinen monitoripiste vasemmalta). Homehtumisherkkyysluokkana tuuletusurassa käytettiin EPS:n ja mineraalivillan mukaista luokkaa ”kohtalaisen kestävä” (ks. taulukko 5.4.2). Lämpö- ja kosteusteknisten tarkasteluiden tulokset on esitetty luvussa 6.2.

6 TULOKSET

6.1 Kosteuden poistuminen tuuletusurituksen kautta

Taulukossa 6.1.1 on esitetty konvektiolla poistuva kosteus tuuletusratkaisuissa 1–4 kun ulkoilman lämpötila on -15 °C .

Taulukko 6.1.1 Konvektiolla poistuva kosteus tuuletusratkaisuissa 1–4 eri U-arvoilla kun ulkoilman lämpötila on -15 °C .

Tuuletus-ratkaisu	U-arvo [W/(m ² K)]	R _{ef} [m ³ /s]	v _k - v _e [g/m ³]	G _{conv} [g/s]	g _{conv} [g/(m ² vrk)]	g _{conv} ≥ g _v
1	0,17	$8,79 \cdot 10^{-6}$	1,39	$1,22 \cdot 10^{-5}$	0,59	Ei
	0,14	$7,90 \cdot 10^{-6}$	1,08	$8,53 \cdot 10^{-6}$	0,41	Ei
	0,10	$6,77 \cdot 10^{-6}$	0,76	$5,14 \cdot 10^{-6}$	0,25	Ei
2	0,17	$1,32 \cdot 10^{-5}$	1,39	$1,83 \cdot 10^{-5}$	0,88	Kyllä
	0,14	$1,18 \cdot 10^{-5}$	1,08	$1,27 \cdot 10^{-5}$	0,61	Kyllä
	0,10	$1,00 \cdot 10^{-5}$	0,76	$7,60 \cdot 10^{-6}$	0,36	Ei
3	0,17	$1,07 \cdot 10^{-5}$	1,39	$1,48 \cdot 10^{-5}$	0,71	Kyllä
	0,14	$9,53 \cdot 10^{-6}$	1,08	$1,03 \cdot 10^{-5}$	0,49	Ei
	0,10	$8,10 \cdot 10^{-6}$	0,76	$6,16 \cdot 10^{-6}$	0,30	Ei
4	0,17	$1,53 \cdot 10^{-5}$	1,39	$2,12 \cdot 10^{-5}$	1,02	Kyllä
	0,14	$1,36 \cdot 10^{-5}$	1,08	$1,47 \cdot 10^{-5}$	0,70	Kyllä
	0,10	$1,15 \cdot 10^{-5}$	0,76	$8,70 \cdot 10^{-6}$	0,42	Ei

Taulukon 6.1.1 perusteella tuuletusratkaisut eivät ole kosteusteknisesti toimivia, kun U-arvo on $0,10\text{ W/(m}^2\text{K)}$. Myös muiden U-arvojen mukaisissa rakenteissa esiintyy toimimattomia ratkaisuja. Taulukossa 6.1.2 on esitetty konvektiolla poistuva kosteus tuuletusratkaisuissa 5–12 U-arvolla $0,10\text{ W/(m}^2\text{K)}$ kun ulkoilman lämpötila on -15 °C .

Taulukko 6.1.2 Konvektiolla poistuva kosteus tuuletusratkaisuissa 5–12 kun ulkoilman lämpötila on -15 °C ja koko rakenteen U -arvo $0,10\text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Tuuletus-ratkaisu	R_{ef} [m^3/s]	$v_k - v_e$ [g/m^3]	G_{conv} [g/s]	g_{conv} [$\text{g}/(\text{m}^2\text{vrk})$]	$g_{conv} \geq g_v$
5	$1,37 \cdot 10^{-5}$	0,76	$1,07 \cdot 10^{-5}$	0,51	Ei
6	$1,65 \cdot 10^{-5}$	0,76	$1,28 \cdot 10^{-5}$	0,62	Kyllä
7	$6,81 \cdot 10^{-6}$	0,76	$5,73 \cdot 10^{-6}$	0,55	Ei
8	$7,01 \cdot 10^{-6}$	0,76	$5,96 \cdot 10^{-6}$	0,57	Ei
9	$1,74 \cdot 10^{-5}$	0,76	$1,32 \cdot 10^{-5}$	0,63	Kyllä
10	$2,21 \cdot 10^{-5}$	0,76	$1,68 \cdot 10^{-5}$	0,81	Kyllä
11	$9,94 \cdot 10^{-6}$	0,76	$7,56 \cdot 10^{-6}$	0,73	Kyllä
12	$1,08 \cdot 10^{-5}$	0,76	$8,23 \cdot 10^{-6}$	0,79	Kyllä

Taulukon 6.1.2 tuuletusratkaisuista osa toimi myös rakenteen U -arvon ollessa $0,10\text{ W/(m}^2\text{K)}$. Taulukoissa 6.1.3 ja 6.1.4 on esitetty konvektiolla poistuva kosteus tuuletusratkaisuissa 1–12 vastaavasti kuin taulukoissa 6.1 ja 6.2 mutta ulkoilman lämpötilan ollessa -20 °C .

Taulukko 6.1.3 Konvektiolla poistuva kosteus tuuletusratkaisuissa 1–4 eri U -arvoilla kun ulkoilman lämpötila on -20 °C .

Tuuletus-ratkaisu	U -arvo [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]	R_{ef} [m^3/s]	$v_k - v_{ulke}$ [g/m^3]	G_{conv} [g/s]	g_{conv} [$\text{g}/(\text{m}^2\text{vrk})$]	Muutos* [%]
1	0,17	$9,59 \cdot 10^{-6}$	1,02	$9,78 \cdot 10^{-6}$	0,47	-20
	0,14	$8,60 \cdot 10^{-6}$	0,76	$6,54 \cdot 10^{-6}$	0,31	-23
	0,10	$7,35 \cdot 10^{-6}$	0,50	$3,68 \cdot 10^{-6}$	0,18	-29
2	0,17	$1,44 \cdot 10^{-5}$	1,02	$1,47 \cdot 10^{-5}$	0,71	-20
	0,14	$1,29 \cdot 10^{-5}$	0,76	$9,79 \cdot 10^{-6}$	0,47	-23
	0,10	$1,09 \cdot 10^{-5}$	0,50	$5,46 \cdot 10^{-6}$	0,26	-28
3	0,17	$1,17 \cdot 10^{-5}$	1,02	$1,19 \cdot 10^{-5}$	0,57	-20
	0,14	$1,04 \cdot 10^{-5}$	0,76	$7,93 \cdot 10^{-6}$	0,38	-23
	0,10	$8,86 \cdot 10^{-6}$	0,50	$4,43 \cdot 10^{-6}$	0,21	-28
4	0,17	$1,68 \cdot 10^{-5}$	1,02	$1,72 \cdot 10^{-5}$	0,82	-19
	0,14	$1,49 \cdot 10^{-5}$	0,76	$1,14 \cdot 10^{-5}$	0,55	-23
	0,10	$1,26 \cdot 10^{-5}$	0,50	$6,29 \cdot 10^{-6}$	0,30	-28

* g_{conv} :in muutos prosentteina verrattuna taulukon 6.1.1 tuloksiin.

Taulukko 6.1.4 Konvektiolla poistuva kosteus tuuletusratkaisuissa 5–12 kun ulkoilman lämpötila on $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja koko rakenteen U -arvo $0,10\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Tuuletusratkaisu	R_{ef} [m^3/s]	$v_k - v_e$ [g/m^3]	G_{conv} [g/s]	g_{conv} [$\text{g}/(\text{m}^2\text{vrk})$]	Muutos* [%]
5	$1,54 \cdot 10^{-5}$	0,50	$7,71 \cdot 10^{-6}$	0,37	-28
6	$1,84 \cdot 10^{-5}$	0,50	$9,18 \cdot 10^{-6}$	0,44	-29
7	$8,11 \cdot 10^{-6}$	0,50	$4,06 \cdot 10^{-6}$	0,39	-29
8	$8,36 \cdot 10^{-6}$	0,50	$4,18 \cdot 10^{-6}$	0,40	-30
9	$1,92 \cdot 10^{-5}$	0,50	$9,62 \cdot 10^{-6}$	0,46	-27
10	$2,42 \cdot 10^{-5}$	0,50	$1,21 \cdot 10^{-5}$	0,58	-28
11	$1,08 \cdot 10^{-5}$	0,50	$5,39 \cdot 10^{-6}$	0,52	-29
12	$1,16 \cdot 10^{-5}$	0,50	$5,79 \cdot 10^{-6}$	0,56	-30

* g_{conv} :in muutos prosentteina verrattuna taulukon 6.1.2 tuloksiin.

Taulukoista 6.1.3 ja 6.1.4 nähdään, että ulkolämpötilan pudotessa $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$:stä $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$:een luonnollisella konvektiolla poistuvan kosteusvirran tiheys putoaa tuuletusratkaisusta ja U -arvosta riippuen 20–30 %. Vertailemalla taulukoiden 6.1.1–6.1.4 eri sarakkeissa esitettyjä arvoja, huomataan, että keskimääräinen virtausnopeus R_{ef} kasvaa oletetusti hiukan ulkolämpötilan laskiessa, mutta ulkoilman jäähtyessä myös tuuletusilman kyllästysvesihöyrypitoisuus laskee ja sen vaikutus konvektiolla poistuvan kosteusvirran tiheyteen on merkittävämpi kuin hiukan kasvaneella virtausnopeudella. Toimintakriteerin täytyminen ($g_{\text{conv}} \geq 0,60\text{ g}/(\text{m}^2\text{vrk})$) tarkistettiin kuitenkin ainoastaan $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ulkolämpötilassa, sillä pitkät yhtäjaksoiset alle $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ pakkasjaksot ovat sekä Suomessa että Virossa harvinaisia ja sellaistenkin jälkeen rakenteella on mahdollisuus kuivua tuuletuksen kautta.

Tuuletusratkaisujen parantamiseksi kokeiltiin myös kuinka kokoojakanavan korkeus vaikuttaa virtausnopeuksiin ja sitä kautta poistuvan kosteusvirran tiheyteen. Kokoojakanavan korkeuden muuttamisen vaikutusta tutkittiin tuuletusratkaisulla, joka vastasi muuten tuuletusratkaisua 4, mutta jossa kokoojakanavan korkeus oli 60 mm. Taulukossa 6.1.5 on esitetty konvektiolla poistuva kosteus kyseisessä tuuletusratkaisussa ulkoilman lämpötilan ollessa $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Taulukko 6.1.5 Konvektiolla poistuva kosteus tuuletusratkaisuissa 4, kun kokoojakanavan korkeus on 60 mm ja koko rakenteen U -arvo $0,17\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

T_e [$^{\circ}\text{C}$]	R_{ef} [m^3/s]	$v_k - v_e$ [g/m^3]	G_{conv} [g/s]	g_{conv} [$\text{g}/(\text{m}^2\text{vrk})$]	Muutos* [%]
-15	1,60	1,39	2,23	1,07	+4,9
-20	1,76	1,02	1,80	0,86	+4,9

* g_{conv} :in muutos prosentteina verrattuna taulukoiden 6.1.1 ja 6.1.3 vastaaviin arvoihin.

Taulukosta 6.1.5 nähdään, että kokoojakanavan korkeuden kasvattaminen muutti vain vähän (n. 5 %) g_{conv} :in arvoa. Tämä ei kuitenkaan ollut riittävä parannus tuuletusurituksen

toimintaan tavoitellussa toimivaa ratkaisua rakenteille, joiden U-arvo on 0,10 W/(m²K). Lisäksi liian korkea kokoojakanavaa pidettiin työteknisesti hankalana vaihtoehtona ja tutkimustulosten osalta tutkimuksessa tyydyttiin lopulta taulukossa 6.1.2 esitettyihin toimiviin tuuletusratkaisuihin. Liitteessä 5 on esitetty esimerkiksi kuvia ja numeerisia tietoja virtausteknisen laskennan vaiheista.

6.2 Dynaamiset lämpö- ja kosteustekniset tarkastelut

Laskentaohjelmasta saatavan suuren datamäärän takia kaikkia tuloksia ei esitetä tässä työssä. Tarkasteltavien rakenteiden poikkileikkaukset on esitetty liitteessä 4. Tässä luvussa on esitetty toimintakriteerien täyttymiseen liittyvät laskentatulokset. Liitteessä 6 on esitetty kuvaajia seinärakenteen US1 laskentatuloksista. Liitteessä 7 on esitetty homeindeksin kehitys ensimmäisen 10 vuoden aikana rakenteen US11 tuuletusurassa, kun suhteellinen kosteus betonissa on 90 % RH (L/5 syvyydellä) suurelementin asennushetkellä.

Taulukossa 6.2.1 on esitetty toimintakriteerien täytyminen lämpö- ja kosteusteknisten laskentatulosten perusteella rakenteissa US1–US9 korjausrakentamisen tapauksessa.

Taulukko 6.2.1 *Toimintakriteerien täytyminen lämpö- ja kosteusteknisten laskentatulosten perusteella rakenteissa US1–US9.*

Seinärakenne	Kondenssin kesto [kk]	Maks. homeindeksi	Toimintakriteerien täytyminen
US1	0	0,12	Kyllä
US2	0	0,10	Kyllä
US3	0	0,22	Kyllä
US4	0	0,11	Kyllä
US5	0	0,24	Kyllä
US6	0	0,15	Kyllä
US7	0	0,50	Kyllä
US8	0	0,44	Kyllä
US9	0	0,32	Kyllä

Taulukossa 6.2.2 on esitetty toimintakriteerien täytyminen lämpö- ja kosteusteknisten laskentatulosten perusteella tutkituissa uudisrakentamisen tapauksissa, joissa suurelementti on kiinnitetty heti jälkihoidon jälkeen betoniseinään.

Taulukko 6.2.2 Toimintakriteerien täytyminen lämpö- ja kosteusteknisten laskentatulosten perusteella rakenteissa US7–US12, kun kantavana rakenteena on alkukosteutta (120 kg/m^3) sisältävä uusi betoniseinä.

Seinä rakenne	Kondenssin kesto [kk]	Maks. homeindeksi	Toimintakriteerien täytyminen
US7	> 1	3,18	Ei
US8	> 1	3,27	Ei
US9	> 1	3,33	Ei
US10	> 1	2,33	Ei
US11	> 1	2,90	Ei
US12	> 1	3,27	Ei

Taulukossa 6.2.3 on esitetty toimintakriteerien täytyminen lämpö- ja kosteusteknisten laskentatulosten perusteella tutkituissa uudisrakentamisen tapauksissa, joissa suurelmentti on kiinnitetty jonkin verran molemmilta puolilta kuivuneeseen betoniin.

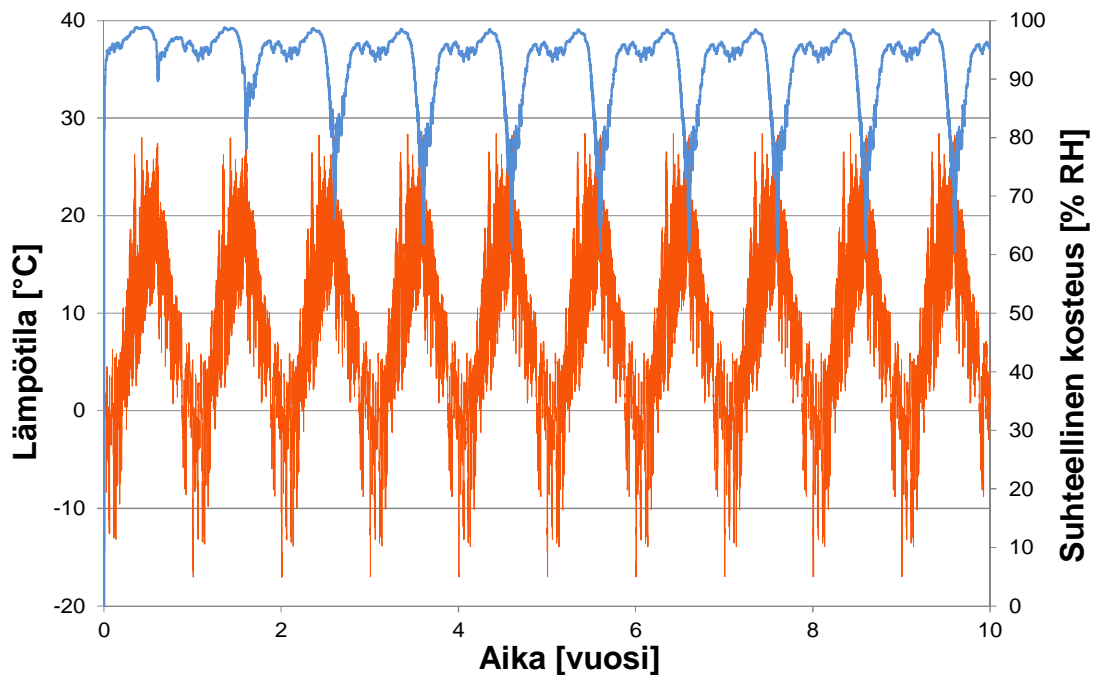
Taulukko 6.2.3 Toimintakriteerien täytyminen lämpö- ja kosteusteknisten laskentatulosten perusteella rakenteissa US7–US12, kun kantavana rakenteena on jonkin verran kuivunut uusi betoniseinä.

Seinä rakenne	Alkukosteus* [% RH]	Kondenssin kesto [kk]	Maks. homeindeksi	Toimintakriteerien täytyminen
US7	90	> 1	2,20	Ei
	85	> 1	1,38	Ei
	80	> 1	0,93	Ei
US8	90	> 1	2,48	Ei
	85	> 1	1,54	Ei
	80	> 1	0,86	Ei
US9	90	> 1	2,97	Ei
	85	> 1	1,90	Ei
	80	≤ 1	0,74	Kyllä
US10	90	≤ 1	0,64	Kyllä
	85	0	0,10	Kyllä
	80	0	0,06	Kyllä
US11	90	≤ 1	0,90	Kyllä
	85	0	0,11	Kyllä
	80	0	0,06	Kyllä
US12	90	> 1	1,64	Ei
	85	0	0,39	Kyllä
	80	0	0,09	Kyllä

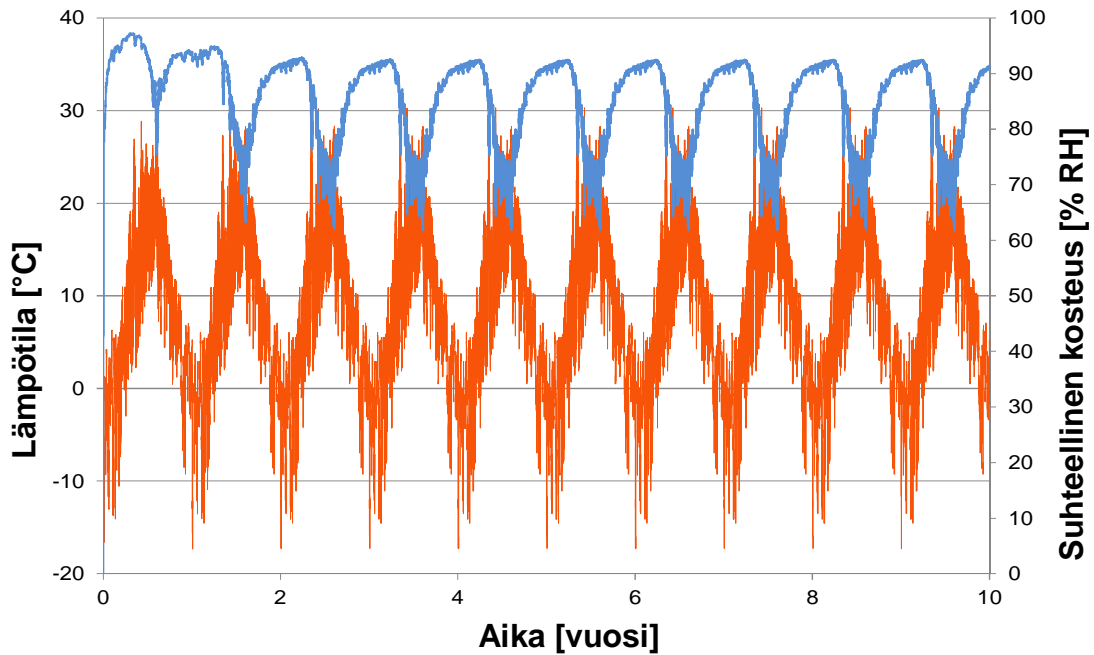
* Suhteellinen kosteus betonissa syvyydellä $L/5$ (L = betoniseinän paksuus).

Taulukossa 6.2.3 esitetyt maksimihomeindeksit on laskettu siten, että koko 10 vuoden pituisesta T/RH-tulosdatasta lasketuista homeindeksien arvoista (ks. esimerkiksi liite 7) valittiin suurin. Tämän arvon vertaaminen kriittiseen raja-arvoon ($M < 1$) on toimintakriteerinä hyvin rankka, mutta muun muassa sillä perusteltiin työssä tehdyt lukuisat fysikaaliset yksinkertaistukset.

Kuvissa 6.2.1 ja 6.2.2 on esitetty kuvaajina lämpötila (punaisella) ja suhteellinen kosteus (sinisellä) koko simuloinnin ajalta rakenteissa US7 (ei höyrynsulkua) ja US10 (älykäs höyrynsulku suurelementin ja betonin välissä). Kuvien tapausten alkukosteudet ovat 90 % RH taulukon 6.2.3 mukaisesti.



Kuva 6.2.1 Lämpötila ja suhteellinen kosteus rakenteen US7 tuuletusurassa (ks. kuva 5.4.1, toinen monitoripiste vasemmalta). Alkukosteus betonin L/5-syvyydellä 90 % RH.



Kuva 6.2.2 Lämpötila ja suhteellinen kosteus rakenteen US10 tuuletusurassa (ks. kuva 5.4.1, toinen monitoripiste vasemmalta). Alkukosteus betonin L/5-syvyydellä 90 % RH.

Kuvista 6.2.1 ja 6.2.2 nähdään, että älykäs höyrynsulku hidastaa jonkin verran kosteusvirtaa betonista ulospäin ja siten tuuletusurituksen suhteellinen kosteus pysyy matalammalla. Betonin kuivuminen ei ole kuitenkaan käytännössä nopeampaa rakenteella US7, sillä kosteuden virrattua rakenteen ulko-osiin, kosteuden siirtymisen potentiaalikin laskee ja kosteusvirta hidastuu. Toimivassa tapauksessa US10 suhteellinen kosteus voi nousta ajoittain yli 90 % RH arvoihin mutta parannetun homemallin perusteella homeen kasvua ei pitäisi esiintyä. Hetkinä, jolloin suhteellinen kosteus on korkealla, lämpötila on alle 10 °C, mikä hidastaa homeen kasvua. Lisäksi tarkastelupisteessä olevan EPS-lämmöneristeen homehtumisherkkyydellä (homehtumisherkkyysluokka: kohtalaisen kestävä) on merkittävä homeen kasvua vähentävä vaikutus.

7 TULOSTEN TARKASTELO JA YHTEENVETO

Suurelementin tuuletusurituksen kautta poistuvaan kosteuteen vaikuttaa tuuletusratkaisun mitoituksen lisäksi oleellisesti myös vallitseva ulkoilman lämpötila. Sisäilman lämpötilan pysyessä vakiona ja ulkoilman lämpötilan laskiessa tuuletusurituksen ja ulkoilman välinen lämpötilaero kasvaa, jolloin virtausnopeudet tuuletusurituksessa kasvavat. Tällöin kuitenkin myös tuuletusurituksen lämpötila ja kyllästysvesihöyrypitoisuus laskevat, mikä pienentää tuuletusurituksen kautta luonnollisella konvektiolla poistuvan kosteuden määrää. Tutkimuksessa tarkastelluilla rakenteilla luonnollisen konvektion avulla poistuvan kosteuden määrä pieneni tuuletusratkaisusta riippuen noin 20–30 %, kun ulkoilman lämpötila laski -15 °C :sta -20 °C :een. Pitkät pakkasjaksot, joissa ulkoilman lämpötila on koko ajan $< -20\text{ °C}$ ovat kuitenkin harvinaisia ja riittävän ankaraksi ulkoilman mitoituslämpötilaksi valittiin -15 °C .

Suurelementin kosteustekninen toimivuus muuttuu nopeasti kriittisemmäksi, kun koko seinärakenteen U-arvoa pienennetään, jolloin tuuletusilman lämpötila lähestyy ulkoilman lämpötilaa. Etsittäessä toimivia tuuletusratkaisuja U-arvon ollessa $0,10\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ kokeiltiin suurentaa pystyurien halkaisijaa sekä pystyurien tulo- ja poistoaukkojen tiheyttä (k_2 -jako). Mallinnusten perusteella merkittävin vaikutus virtauskentän voimakkuuteen ja luonnollisen konvektion poistamaan kosteuteen on tulo- ja poistoaukkojen tiheydellä (k_1 -jako), joka arkkitehtonisista syistä halutaan kuitenkin mahdollisimman pieneksi.

Pystyurien k_2 -jaon pienentäminen pienentää ilman tilavuusvirtoja yksittäisten pystyurien läpi, mutta toisaalta pienemmällä k_2 -jaolla kunkin pystyuran tarvitsee poistaa kosteutta pienemmältä pinta-alalta. Taulukoiden 6.1.2 ja 6.1.4 perusteella pystyurien jaon pienentäminen 200 mm:stä 100 mm:iin lisäsi kosteuden poistumista, kun pystyurien halkaisija oli 17,5 mm mutta vähensi kosteuden poistumista, kun pystyurien halkaisija oli 20 mm. Pystyurien halkaisijan suurentaminen 17,5 mm:stä 20 mm:iin tapauksissa, joissa pystyurien k_2 -jako on 200 mm lisäsi kosteuden poistumista yli 20 % mutta tapauksissa, joissa k_2 -jako on 100 mm vaikutus oli alle 10 %. Kokoojakanavien korkeuden kasvattamisella 50 mm:stä 60 mm:iin ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta.

Korjausrakentamisen tapauksessa suurelementti asennetaan vanhaan kantavaan kivi-rakenteeseen, jossa ei ole merkittävästi alkukosteutta. Kaikissa tutkituissa korjausrakentamistapauksissa suurelementti toimi selvästi kosteusteknisesti hyvin. Laskennoissa käytetty rakennusfysikaalinen testi vuosi on olosuhteiltaan hyvin ankara tuuletusurituksen kosteudenpoiston kannalta, sillä ulkoilman suhteellinen kosteus on yli 90 % RH pitkiä ajanjaksoja kyseisen vuoden aikana. Suurelementin tuuletusurituksen toimivuus perustuukin siihen, että ulkopinnan ja tuuletusurituksen välissä on varsin suuri lämmönvastus, jolloin uriin virtaava ulkoilman lämpenee ja sen suhteellinen kosteus laskee. Tulosten

varmuutta lisää se, että rakenteiden mallintamisessa käytettiin samaa kriittistä vuotta 10 kertaa peräkkäin.

Uudisrakentamisen tapauksessa kantavana rakenteena oleva betonirakenne voi sisältää merkittävästi ylimääräistä rakennusaikaista kosteutta. Tulosten perusteella suurelementin tuuletusuritukseseen voi muodostua tällöin yli kuukauden mittaisia kondenssijaksoja ($\phi > 97\% \text{ RH}$) ja homeen kasvulle otollisia olosuhteita ensimmäisinä vuosina, mikäli suurelementin ja ylimääräistä kosteutta sisältävän betonin välissä ei ole vesihöyryn kulkua rajoittavaa materiaalikerrosta. Jos suurelementin ja betonin välissä käytetään tavallista höyrynsulkukalvoa, suurelementti toimii hyvin, koska kosteusvirta ulospäin putoaa merkittävästi. Tällöin betonirakenne pääsee kuitenkin kuivumaan ainoastaan sisäänpäin. Tarkastelluissa rakenteissa US10–US12 suurelementin ja betonin väliin lisättiin höyrynsulkukalvo, jonka vesihöyrynvastus putoaa suhteellisen kosteuden noustessa. Kalvon käyttö mahdollistaa suurelementin asentamisen huomattavasti kosteamman betonirakenteen päälle. Tällaisen höyrynsulkukalvon käyttö hidastaa jonkin verran betonirakenteen kuivumista ulospäin mutta ei merkittävästi. Tämä johtuu siitä, että höyrynsuluttomassa tapauksessa rakenteen kosteuspitoisuudet ulkopinnan lähellä nousevat korkeiksi ensimmäisinä vuosina, jolloin kosteuden siirtymisen potentiaali on pieni ja betonin kuivuminen on myös hidasta. Älykästä höyrynsulkukalvoakin käyttäessä betonin on annettava kuitenkin kuivua taulukon 6.2.3 mukaisiin arvoihin ennen kuin suurelementti voidaan asentaa.

Suurelementin kosteusteknistä toimivuutta tutkittiin kahdella toisistaan poikkeavalla laskennallisella menetelmällä, joka tuo kokonaistarkasteluun luotettavuutta. Tutkimustuloksina saatiin joukko rakennetyyppejä, joissa suurelementin käyttö on kosteusteknisesti riskitöntä. Johtuen suurelementin tuuletusurituksen fysikaalisen toiminnan monimutkaisuudesta, molemmissa tapauksissa jouduttiin tekemään yksinkertaistuksia, joiden vaikutukset tutkimuksessa tehtyjen johtopäätösten luotettavuuteen on hankalasti arvioitavissa. Fysikaalisten ilmiöiden laskennallinen yksinkertaistaminen todettiin kuitenkin oikeuteksi, sillä kaikissa tarkasteluissa käytettiin ankaria testiolosuhteita ja tiukkoja toimintakriteerejä.

LÄHTEET

- [1] Incropera, F., Dewitt, D., Bergman, T. & Lavine (2006): Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Sixth edition. John Wiley & Sons, Ltd. New Jersey, United States. 997 p.
- [2] Fermi, E. (1936): Thermodynamics. Dover publications, Inc. New York, United States. 160 p.
- [3] White, F. (2003): Fluid dynamics. Fifth edition. McGraw-Hill. New York, United States. 866 p.
- [4] DIN 4108-5. 1981. Wärmeschutz im Hochbau, Berechnungsverfahren. Deutsches Institut für Normung. 9 s.
- [5] Hagentoft, C-E. (2001): Introduction to Building Physics. Studentlitteratur AB. Lund, Sweden. 422 p.
- [6] Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. RIL 107-2012 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet.
- [7] Hens, H. (2007): Building physics – Heat, Air and Moisture. Ernst & Sohn. Berlin, Germany. 270 p.
- [8] Künzle, H. (1995): Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components – One- and two-dimensional calculation using simple parameters. Doctor's thesis. Fraunhofer Institute of Building Physics. Holzkirchen, Germany. 64 p.
- [9] Nusser, B. & Teibinger, M. (2012): Coupled Heat and Moisture Transfer in Building Components – Implementing WUFI Approaches in COMSOL Multiphysics. Proceedings of the 2012 COMSOL Conference. Milan, Italy. 7 p.
- [10] Ahlstedt, H. (2012): Kitkallinen virtaus. Luentomoniste 1/12. Tampereen teknillinen yliopisto, Energia- ja prosessitekniikka. Tampere, Suomi.
- [11] Internet-lähde: Equation of Motion for Viscous Fluids. Ain A. Sonin. Massachusetts Institute of Technology. Department of Mechanical Engineering. 2001. http://web.mit.edu/2.25/www/pdf/viscous_flow_eqn.pdf (Viitattu 05.11.2013)
- [12] Chapra, S. & Canale, R. (2010): Numerical Methods for Engineers. Sixth Edition. McGraw-Hill. New York, United States. 968 p.

- [13] Lewis, R., Nithiarasu, P. & Seetharamu, K (2004): *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester, England. 341 p.
- [14] Huttunen, P. & Vinha, J. (2012): Raketerm-suurelementin U-arvon laskennallinen määrittäminen. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Tutkimus-
selostus TRT/2013/2012. Tampere, Suomi. 14 s. + 12 liites.
- [15] Hietala, J., Vinha, J. & Lindberg, R. (2007): Raketerm-julkisivuelementin taustan
tuuletuksen laskennallinen tarkastelu. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennus-
tekniikan laitos. Tutkimus-
selostus TRT/1574/2007. Tampere, Suomi. 15 s. + 5 lii-
tes.
- [16] Lähdesmäki, K., Vinha, J. & Lindberg, R. (2007): Uritettujen Raketerm-
julkisivuelementillä verhottujen seinärakenteiden laskennallinen mallinnus. Tam-
pereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Tutkimus-
selostus TRT/1557/2007. Tampere, Suomi. 14 s. + 27 liites.
- [17] Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T.,
Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J.,
Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Kos-
kenvesa, A. & Palolahti, T. (2013): Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisä-
yksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennus-
ten energiankulutuksessa. Tutkimusraportti 159. Tampereen teknillinen yliopisto,
Rakennustekniikan laitos. Tampere, Suomi. 354 s. + 43 liites.
- [18] Kumaran, K. & Sanders, C. (2008): Annex 41: Whole Building Heat, Air, Mois-
ture Response. Boundary Conditions and Whole Building HAM Analysis. Interna-
tional Energy Agency, Executive committee on Energy Conservation in Buildings
and Community Systems. (Report available: K.U. Leuven, Department of Civil
Engineering) Leuven, Belgium. 235 p.
- [19] 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. Dissertation. Uppsala. The Swedish University of Agricultural
Sciences, Department of Forest Products. Thesis 58 p.
- [20] Hukka, A. & Viitanen, H. (1999): A mathematical model of mould growth on
wooden material. *Wood Science and Technology*. 33 (6) 475-485.
- [21] Vinha, J., Viitanen, H., Lähdesmäki, K., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Paajanen, L.,
Strander, T. & Iitti, H. (20xx): Rakennusmateriaalien ja rakenteiden homehtumis-
riskin laskennallinen arviointi. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekni-
kan laitos. (julkaistaan vuoden 2013 aikana) Tampere, Suomi. xx s. + xx liites.

LIITTEET

LIITE 1: Suurelementin rakennepiirustukset, 2 sivua.

LIITE 2: Tutkitut tuuletusratkaisut, 1 sivu

LIITE 3: Lämpö- ja kosteusteknisissä tarkasteluissa käytetyt materiaaliominaisuudet,
6 sivua

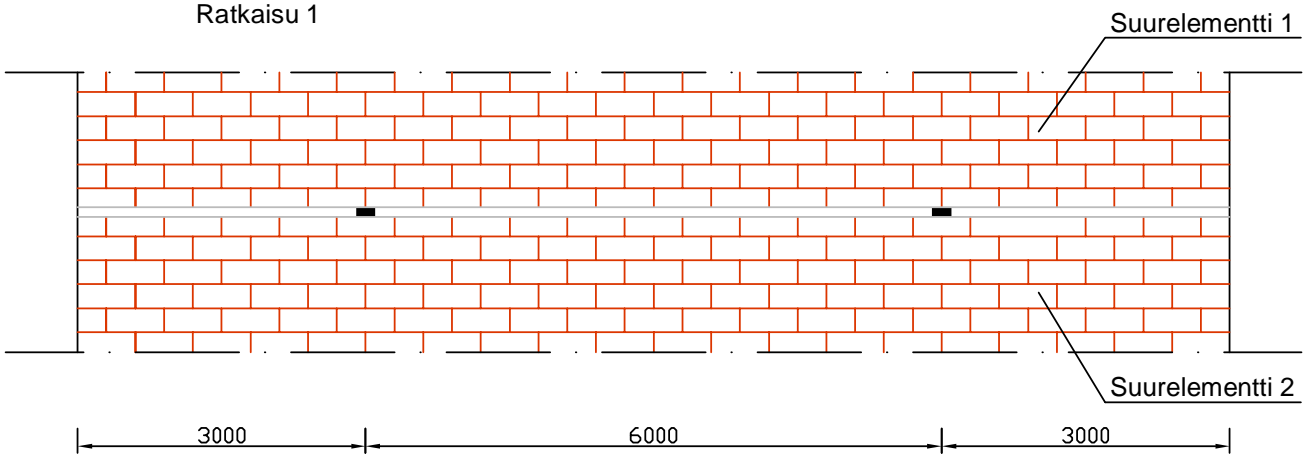
LIITE 4: Lämpö- ja kosteusteknisesti tutkitut seinärakenteet US1–US12, 3 sivua

LIITE 5: Kuvia ja numeerisia tietoja virtausteknisen laskennan vaiheista, 7 sivua

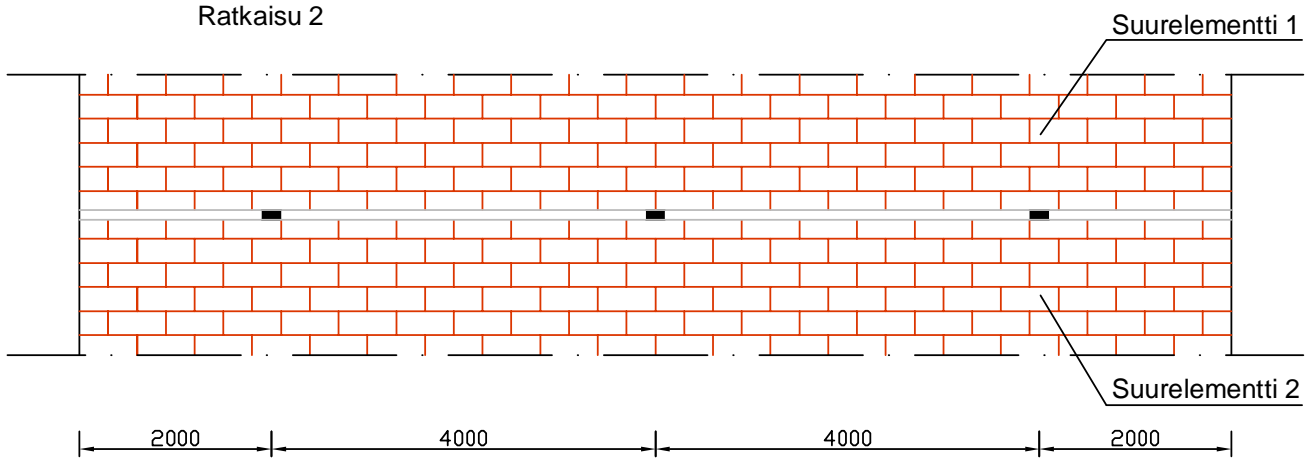
LIITE 6: Seinärakenteen US1 laskentatuloksia, 6 sivua

LIITE 7: Homeindeksin kehittyminen seinärakenteen US11 tuuletusurassa, 1 sivu

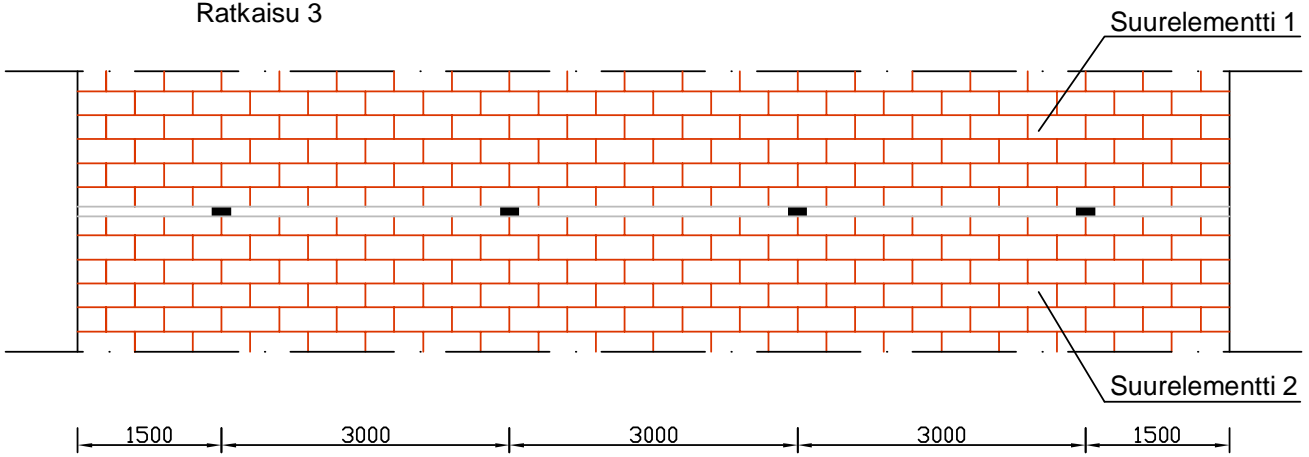
Ratkaisu 1



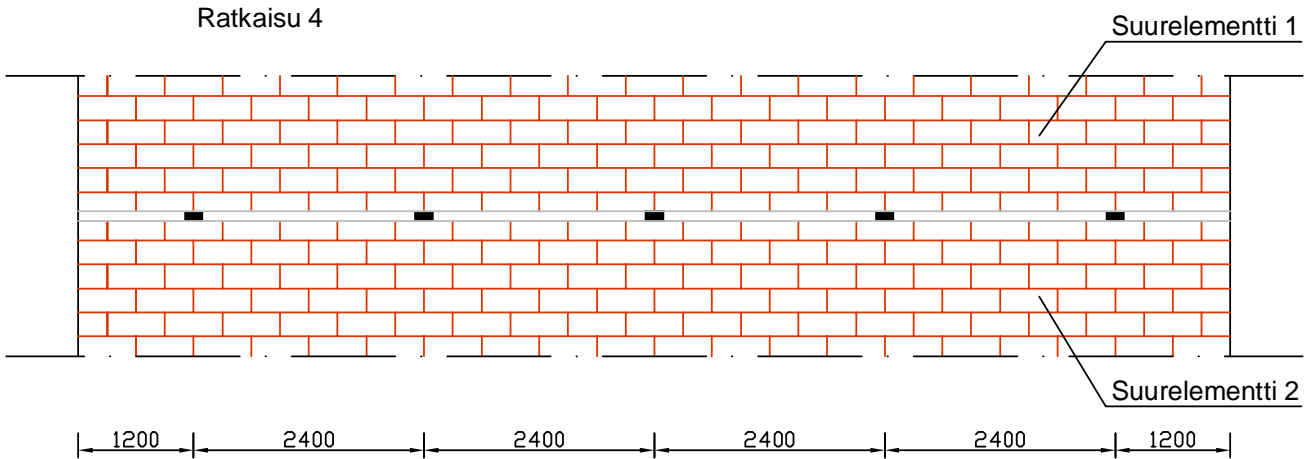
Ratkaisu 2



Ratkaisu 3



Ratkaisu 4



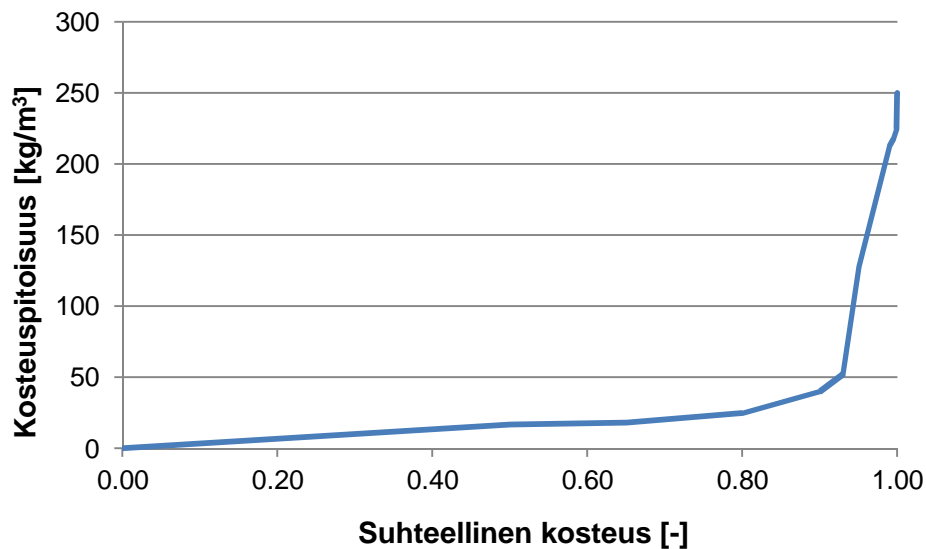
Taulukossa L3.1 on esitetty lämpö- ja kosteusteknisissä tarkasteluissa käytettyjä materiaaliominaisuuksia, jotka kuvaavat materiaalin ominaisuuksia täysin kuivana.

Taulukko L3.1 Tutkimuksessa materiaaleille käytettyjä rakennusfysikaalisia kuivaominaisuuksia.

Materiaali	Kuivatiheys [kg/m ³]	Huokoisuus [m ³ /m ³]	c _p (kuiva) [J/(kgK)]	λ (kuiva) [W/(mK)]	μ [-]
Tiililaatta	1900	0,29	850	1	85
EPS/PUR	67	0,95	1500	0,033	120
Mineraalivilla	22	0,98	850	0,04	1,2
Kalkkiahkatiili	1900	0,29	850	1	28
Poltettu tiili	650	0,74	850	0,13	15
Betoni	2222	0,18	850	1,7	130
Intello-kalvo*	115	0,086	2500	2,4	26000

* Intello-kalvon ominaisuudet saatiin laskentaohjelman materiaalitietokannasta. Kalvo on syötettävä ohjelmassa aina 1 mm paksuna materiaalikerroksena, jolloin taulukossa esitetyt teholliset arvot soveltuvat laskentaan.

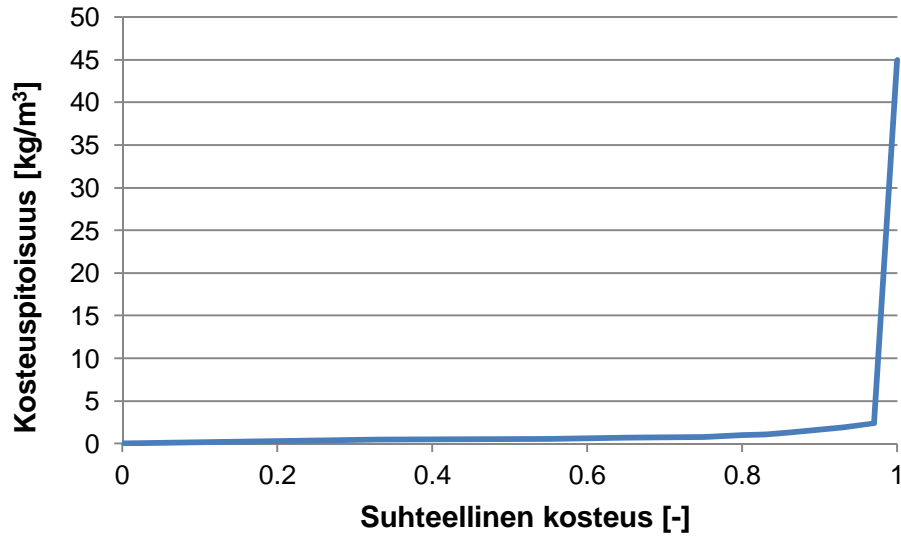
Kuvissa L3.1–L3.6 ja taulukoissa L3.2–L3.7 on esitetty materiaaleille käytetyt tasapainokosteusfunktiot. PUR/EPS-kerrokselle ei määritetty tasapainokosteusfunktiota, jolloin WUFI laskee sille ns. oletustasapainokosteuden huokoisuuden perusteella.



Kuva L3.1 Tiililaatan tasapainokosteusfunktio.

Taulukko L3.2 Tiililaatan tasapainokosteusfunktio.

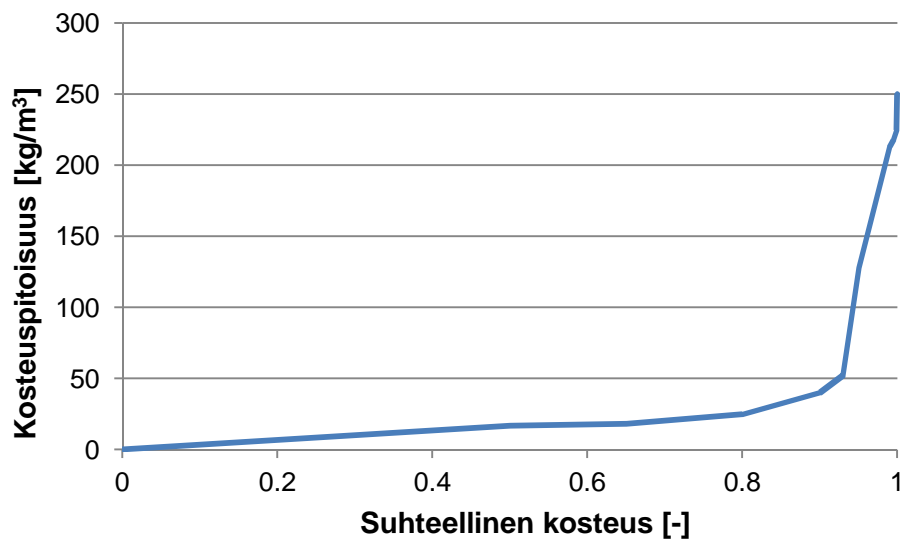
φ [-]	0	0,5	0,65	0,8	0,9	0,93	0,95	0,99	0,995	0,999	1
w [kg/m ³]	0	17	18	25	40	52,3	128	213	218	225	250



Kuva L3.2 Mineraalivillan tasapainokosteusfunktio.

Taulukko L3.3 Mineraalivillan tasapainokosteusfunktio.

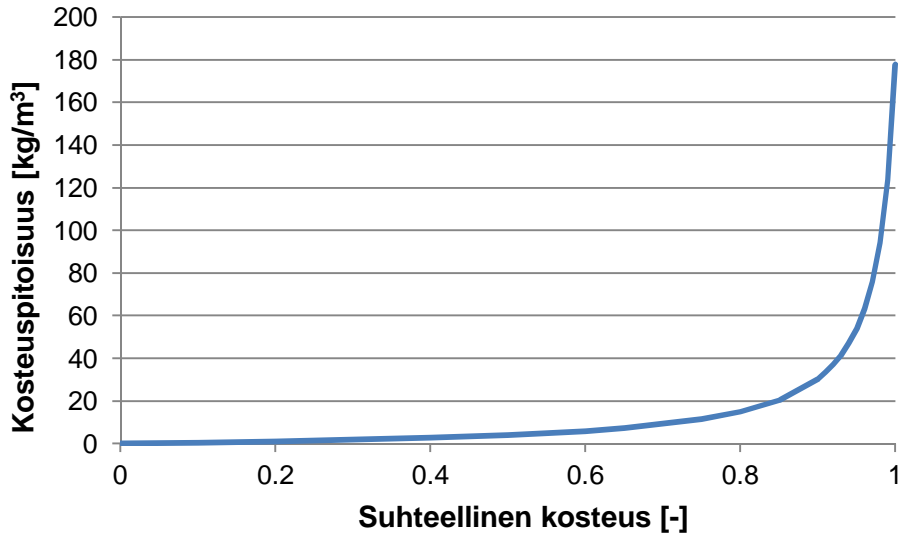
ϕ [-]	0	0,33	0,55	0,65	0,75	0,8	0,83	0,86	0,93	0,97	1
w [kg/m³]	0	0,45	0,54	0,66	0,78	0,98	1,1	1,3	1,9	2,4	45



Kuva L3.3 Kalkkihiekkatiilen tasapainokosteusfunktio.

Taulukko L3.4 Kalkkihiekkatiilen tasapainokosteusfunktio.

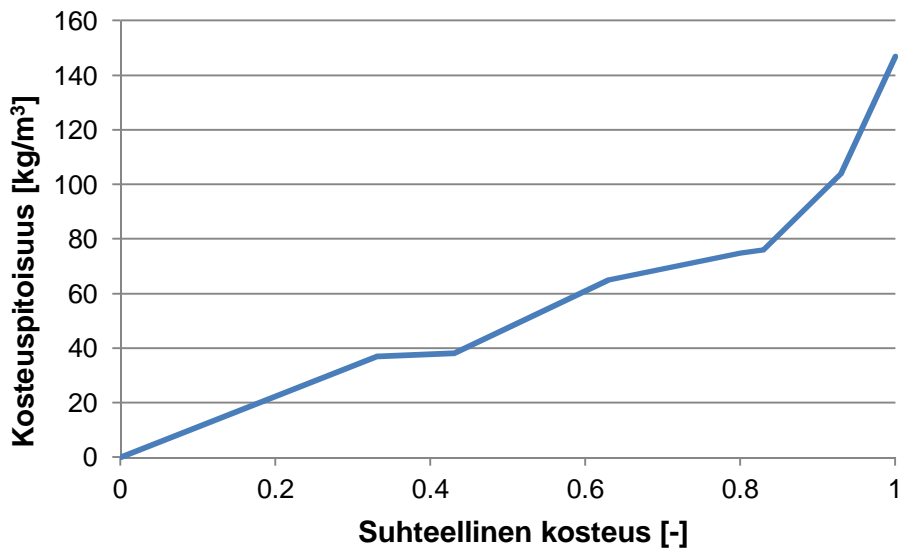
ϕ [-]	0	0,5	0,65	0,8	0,9	0,93	0,95	0,99	0,995	0,999	1
w [kg/m³]	0	17	18	25	40	52,3	128	213	218	225	250



Kuva L3.4 Poltetun tiilen tasapainokosteusfunktio.

Kuva L3.5 Poltetun tiilen tasapainokosteusfunktio.

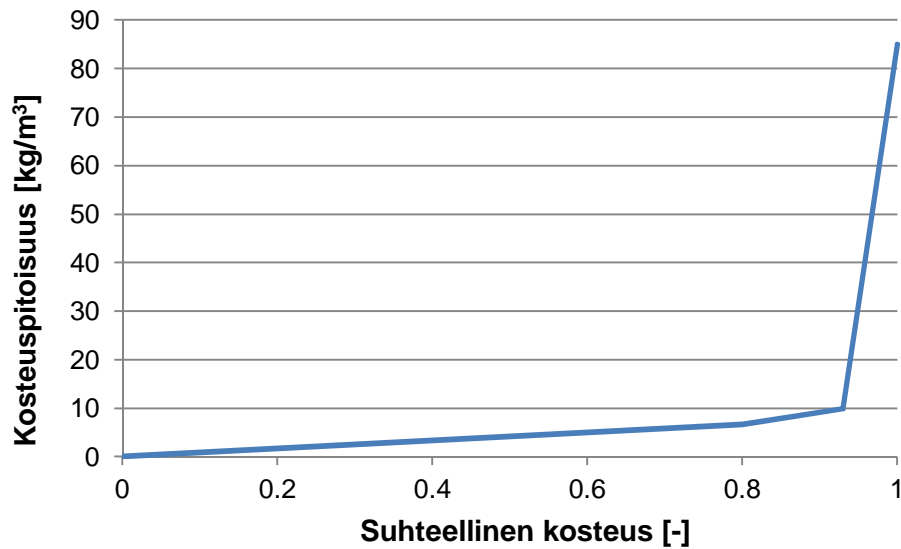
φ [-]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,55	0,6	0,65
w [kg/m ³]	0	0,45	1,02	1,74	2,69	4	4,87	5,94	7,29
φ [-]	0,75	0,8	0,85	0,9	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95
w [kg/m ³]	11,49	15	20,53	30,53	33,59	37,24	41,67	47,16	54,14
φ [-]	0,96	0,97	0,98	0,99	1				
w [kg/m ³]	63,32	75,93	94,33	123,7	178				



Kuva L3.5 Betonin tasapainokosteusfunktio.

Taulukko L3.6 *Betonin tasapainokosteusfunktio.*

φ [-]	0	0,33	0,43	0,63	0,8	0,83	0,93	1
w [kg/m ³]	0	37	38	65	75	76	104	147



Kuva L3.6 *Intello-kalvon tasapainokosteusfunktio.*

Taulukko L3.7 *Intello-kalvon tasapainokosteusfunktio.*

φ [-]	0	0,8	0,93	1
w [kg/m ³]	0	6,7	10	85

Taulukoissa L3.8–L3.11 on esitetty kapillaarisille materiaaleille käytetyt kosteusdiffusiviteetit D_{ws} ja D_{ww} .

Taulukko L3.8 *Tiililaatan kosteusdiffusiviteetit D_{ws} ja D_{ww} .*

w [kg/m ³]	0	37	62	100	150
D_{ws} [m ² /s]	0	2,0E-10	3,0E-09	7,0E-09	1,0E-08
w [kg/m ³]	200	225	238	250	
D_{ws} [m ² /s]	3,0E-08	6,0E-08	8,0E-08	1,2E-07	
w [kg/m ³]	0	37	62	100	
D_{ww} [m ² /s]	0	2,0E-10	3,0E-10	8,0E-10	
w [kg/m ³]	150	200	225	238	250
D_{ww} [m ² /s]	1,5E-09	4,0E-09	8,0E-09	9,0E-09	1,0E-08

Taulukko L3.9 Kalkkikiiekkatiilen kosteusdiffusiviteetit D_{ws} ja D_{ww} .

w [kg/m ³]	0	37	62	100	150
D_{ws} [m ² /s]	0	2,0E-10	3,0E-09	7,0E-09	1,0E-08
w [kg/m ³]	200	225	238	250	
D_{ws} [m ² /s]	3,0E-08	6,0E-08	8,0E-08	1,2E-07	
w [kg/m ³]	0	37	62	100	
D_{ww} [m ² /s]	0	2,0E-10	3,0E-10	8,0E-10	
w [kg/m ³]	150	200	225	238	250
D_{ww} [m ² /s]	1,5E-09	4,0E-09	8,0E-09	9,0E-09	1,0E-08

Taulukko L3.10 Poltetun tiilen kosteusdiffusiviteetit D_{ws} ja D_{ww} .

w [kg/m ³]	0	15	178
D_{ws} [m ² /s]	0	1,60E-10	1,35E-06
w [kg/m ³]	0	15	178
D_{ww} [m ² /s]	0	1,60E-10	7,50E-07

Taulukko L3.11 Betonin kosteusdiffusiviteetit D_{ws} ja D_{ww} .

w [kg/m ³]	0	29	72	116	130	147	
D_{ws} [m ² /s]	1,00E-09	4,00E-09	1,00E-08	2,00E-08	3,00E-08	3,00E-07	
w [kg/m ³]	0	29	72	100	116	130	147
D_{ww} [m ² /s]	2,00E-11	4,00E-11	6,00E-11	4,00E-10	8,00E-10	8,00E-09	1,00E-07

Taulukoissa L3.12–L3.17 on esitetty osalle materiaaleista huomioon otetut kosteuspitöisuuden vaikutukset lämmönjohtavuuteen. Laskennassa käytettävät lämmönjohtavuudet interpoloidaan taulukon arvojen avulla.

Taulukko L3.12 Kosteuspitöisuuden vaikutus tiililaatan lämmönjohtavuuteen.

w [kg/m ³]	0,00	290,00
λ [W/(mK)]	1,00	2,22

Taulukko L3.13 Kosteuspitöisuuden vaikutus PUR/EPS-eristeen lämmönjohtavuuteen.

w [kg/m ³]	0	10	20	50	100
λ [W/(mK)]	0,033	0,04	0,04	0,042	0,049
w [kg/m ³]	200	300	400	500	600
λ [W/(mK)]	0,071	0,1	0,14	0,18	0,24
w [kg/m ³]	700	800	900	950	
λ [W/(mK)]	0,31	0,4	0,52	0,6	

Taulukko L3.14 Kosteuspitoisuuden vaikutus mineraalivillan lämmönjohtavuuteen.

w [kg/m ³]	0	2,4	980
λ [W/(mK)]	0,04	0,04	0,6

Taulukko L3.15 Kosteuspitoisuuden vaikutus kalkkahiiekkatiilen lämmönjohtavuuteen.

w [kg/m ³]	0	290
λ [W/(mK)]	1	2,221

Taulukko L3.16 Kosteuspitoisuuden vaikutus poltetun tiilen lämmönjohtavuuteen.

w [kg/m ³]	0	740
λ [W/(mK)]	0,13	1,61

Taulukko L3.17 Kosteuspitoisuuden vaikutus betonin lämmönjohtavuuteen.

w [kg/m ³]	0	180
λ [W/(mK)]	1,7	2,803

Taulukoissa L3.18–L3.21 on esitetty osalle materiaaleista huomioon otetut lämpötilan vaikutukset lämmönjohtavuuteen. Laskennassa käytettävät lämmönjohtavuudet interpoloidaan taulukon arvojen avulla.

Taulukko L3.18 Lämpötilan vaikutus kalkkahiiekkatiilen lämmönjohtavuuteen.

T [°C]	-20	80
λ [W/(mK)]	0,994	1,014

Taulukko L3.19 Lämpötilan vaikutus poltetun tiilen lämmönjohtavuuteen.

T [°C]	-20	80
λ [W/(mK)]	0,124	0,144

Taulukko L3.20 Lämpötilan vaikutus betonin lämmönjohtavuuteen.

T [°C]	-20	80
λ [W/(mK)]	1,694	1,714

Taulukko L3.21 Lämpötilan vaikutus Intello-kalvon lämmönjohtavuuteen.

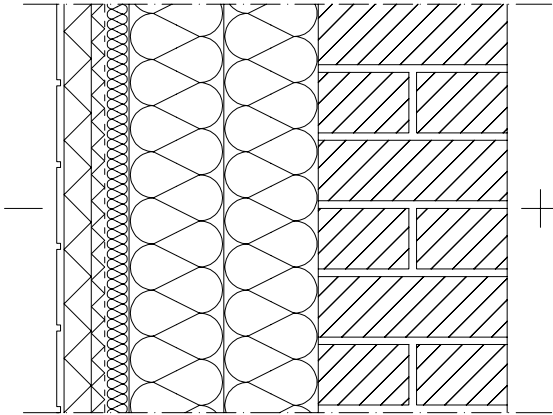
T [°C]	-20	80
λ [W/(mK)]	2,394	2,414

COMSOL Multiphysics -laskentaohjelman materiaalitietokannan mukaiset ilman lämmönjohtavuus ja dynaaminen viskositeetti lämpötilan T [K] funktiona:

$$\lambda \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]} = -0,00227583562 + 1,15480022 \cdot 10^{-4} \cdot T - 7,90252856 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 + 4,11702505 \cdot 10^{-11} \cdot T^3 - 7,43864331 \cdot 10^{-15} \cdot T^4$$

$$\mu \text{ [Pa}\cdot\text{s]} = -8,38278 \cdot 10^{-7} + 8,35717342 \cdot 10^{-8} \cdot T - 7,69429583 \cdot 10^{-11} \cdot T^2 + 4,6437266 \cdot 10^{-14} \cdot T^3 - 1,06585607 \cdot 10^{-17} \cdot T^4$$

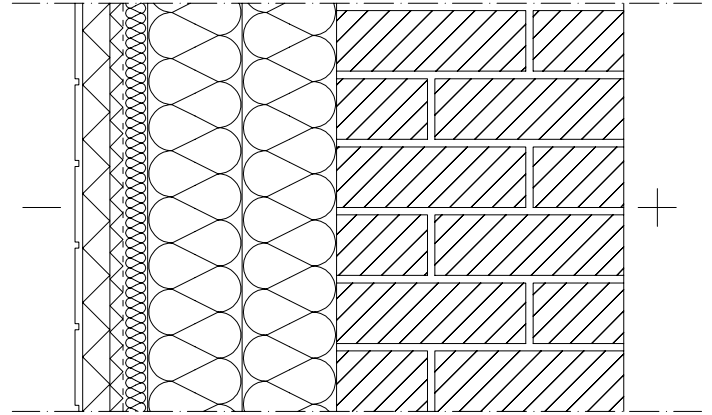
US 1



46 mm	Raketerm-elementti
17,5 mm	EPS-lämmöneriste (tuuletusurat Ø 17,5 mm, liimattu Raketerm-elementin taustalle)
32,5 mm	Kova mineraalivilla
250 mm	Kevyt mineraalivilla + teräsohutlevyrunko
250 mm	Muuraus, kalkkihiekkatiili
U-arvo	< 0,14 W/m ² K

U-arvossa otettu huomioon tuuletusurituksen ja teräsosien aiheuttamat lisäkonduktanssit.

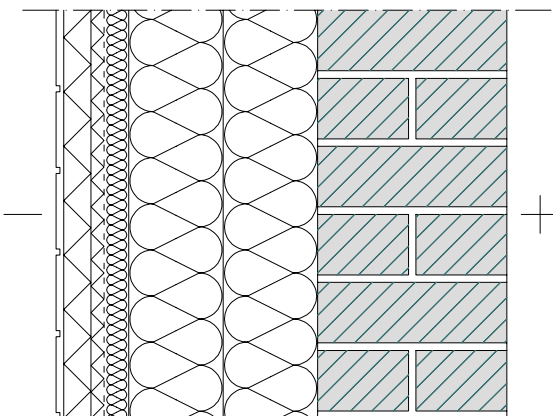
US 2



46 mm	Raketerm-elementti
17,5 mm	EPS-lämmöneriste (tuuletusurat Ø 17,5 mm, liimattu Raketerm-elementin taustalle)
32,5 mm	Kova mineraalivilla
250 mm	Kevyt mineraalivilla + teräsohutlevyrunko
380 mm	Muuraus, kalkkihiekkatiili
U-arvo	< 0,14 W/m ² K

U-arvossa otettu huomioon tuuletusurituksen ja teräsosien aiheuttamat lisäkonduktanssit.

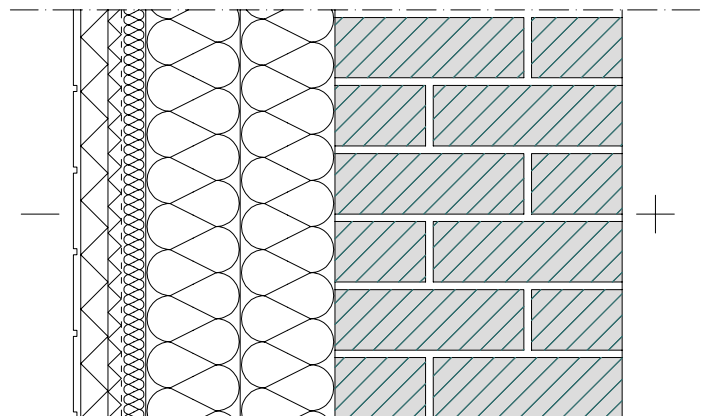
US 3



46 mm	Raketerm-elementti
17,5 mm	EPS-lämmöneriste (tuuletusurat Ø 17,5 mm, liimattu Raketerm-elementin taustalle)
32,5 mm	Kova mineraalivilla
250 mm	Kevyt mineraalivilla + teräsohutlevyrunko
250 mm	Muuraus, poltettu tiili
U-arvo	< 0,14 W/m ² K

U-arvossa otettu huomioon tuuletusurituksen ja teräsosien aiheuttamat lisäkonduktanssit.

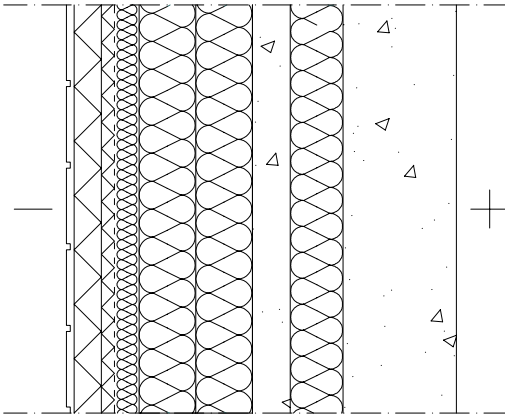
US 4



46 mm	Raketerm-elementti
17,5 mm	EPS-lämmöneriste (tuuletusurat Ø 17,5 mm, liimattu Raketerm-elementin taustalle)
32,5 mm	Kova mineraalivilla
250 mm	Kevyt mineraalivilla + teräsohutlevyrunko
380 mm	Muuraus, poltettu tiili
U-arvo	< 0,14 W/m ² K

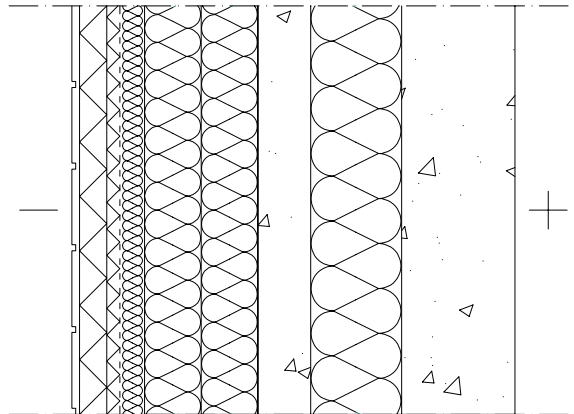
U-arvossa otettu huomioon tuuletusurituksen ja teräsosien aiheuttamat lisäkonduktanssit.

US 5



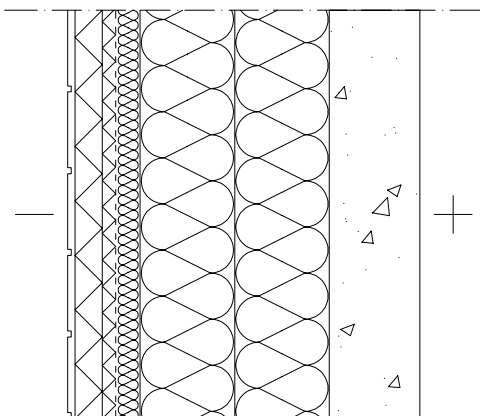
46 mm	Raketerm-elementti
17,5 mm	EPS-lämmöneriste (tuuletusurat Ø 17,5 mm, liimattu Raketerm-elementin taustalle)
32,5 mm	Kova mineraalivilla
150 mm	Kevyt mineraalivilla + teräsohutlevyrunko
270 mm	Betonisandwich (50 mm betoni, 70 mm mineraalivilla, 150 mm betoni)
U-arvo	< 0,14 W/m²K
U-arvossa otettu huomioon tuuletusurituksen ja teräsohujen aiheuttamat lisäkonduktanssit.	

US 6



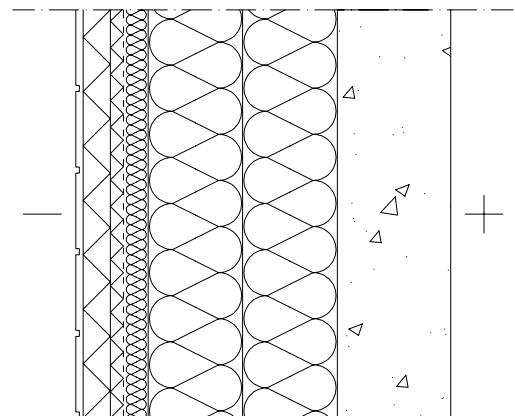
46 mm	Raketerm-elementti
17,5 mm	EPS-lämmöneriste (tuuletusurat Ø 17,5 mm, liimattu Raketerm-elementin taustalle)
32,5 mm	Kova mineraalivilla
150 mm	Kevyt mineraalivilla + teräsohutlevyrunko
340 mm	Betonisandwich (70 mm betoni, 120 mm mineraalivilla, 150 mm betoni)
U-arvo	< 0,14 W/m²K
U-arvossa otettu huomioon tuuletusurituksen ja teräsohujen aiheuttamat lisäkonduktanssit.	

US 7



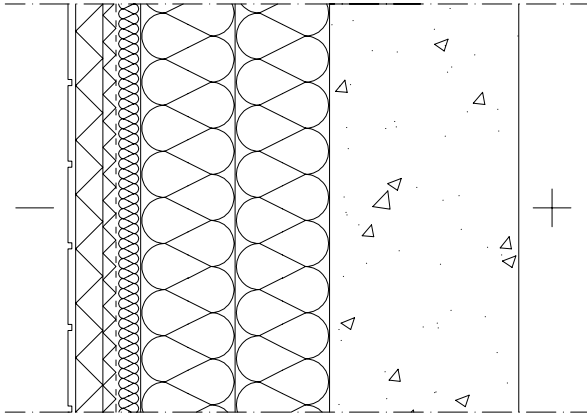
46 mm	Raketerm-elementti
17,5 mm	EPS-lämmöneriste (tuuletusurat Ø 17,5 mm, liimattu Raketerm-elementin taustalle)
32,5 mm	Kova mineraalivilla
250 mm	Kevyt mineraalivilla + teräsohutlevyrunko
120 mm	Betoni
U-arvo	< 0,14 W/m²K
U-arvossa otettu huomioon tuuletusurituksen ja teräsohujen aiheuttamat lisäkonduktanssit.	

US 8



46 mm	Raketerm-elementti
17,5 mm	EPS-lämmöneriste (tuuletusurat Ø 17,5 mm, liimattu Raketerm-elementin taustalle)
32,5 mm	Kova mineraalivilla
250 mm	Kevyt mineraalivilla + teräsohutlevyrunko
150 mm	Betoni
U-arvo	< 0,14 W/m²K
U-arvossa otettu huomioon tuuletusurituksen ja teräsohujen aiheuttamat lisäkonduktanssit.	

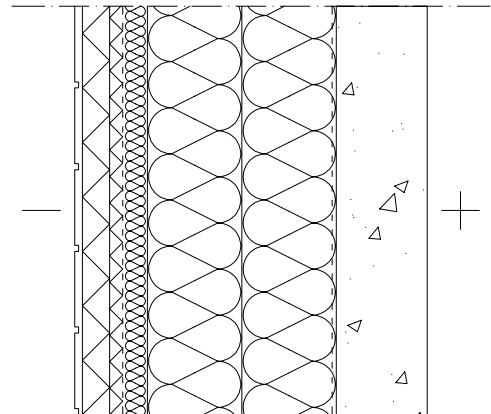
US 9



46 mm	Raketerm-elementti
17,5 mm	EPS-lämmöneriste (tuuletusurat Ø 17,5 mm, liimattu Raketerm-elementin taustalle)
32,5 mm	Kova mineraalivilla
250 mm	Kevyt mineraalivilla + teräsohutlevyrunko
250 mm	Betoni
U-arvo	< 0,14 W/m²K

U-arvossa otettu huomioon tuuletusurituksen ja teräsosien aiheuttamat lisäkonduktanssit.

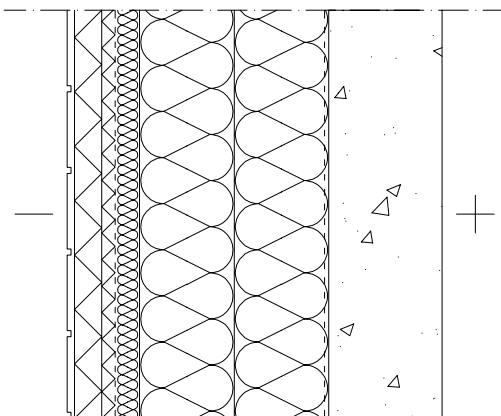
US 10



46 mm	Raketerm-elementti
17,5 mm	EPS-lämmöneriste (tuuletusurat Ø 17,5 mm, liimattu Raketerm-elementin taustalle)
32,5 mm	Kova mineraalivilla
250 mm	Kevyt mineraalivilla + teräsohutlevyrunko
0,2 mm	Intello -höyrynsulkukalvo
120 mm	Betoni
U-arvo	< 0,14 W/m²K

U-arvossa otettu huomioon tuuletusurituksen ja teräsosien aiheuttamat lisäkonduktanssit.

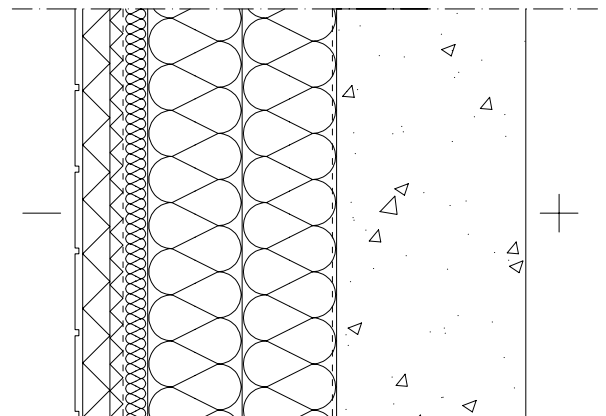
US 11



46 mm	Raketerm-elementti
17,5 mm	EPS-lämmöneriste (tuuletusurat Ø 17,5 mm, liimattu Raketerm-elementin taustalle)
32,5 mm	Kova mineraalivilla
250 mm	Kevyt mineraalivilla + teräsohutlevyrunko
0,2 mm	Intello -höyrynsulkukalvo
150 mm	Betoni
U-arvo	< 0,14 W/m²K

U-arvossa otettu huomioon tuuletusurituksen ja teräsosien aiheuttamat lisäkonduktanssit.

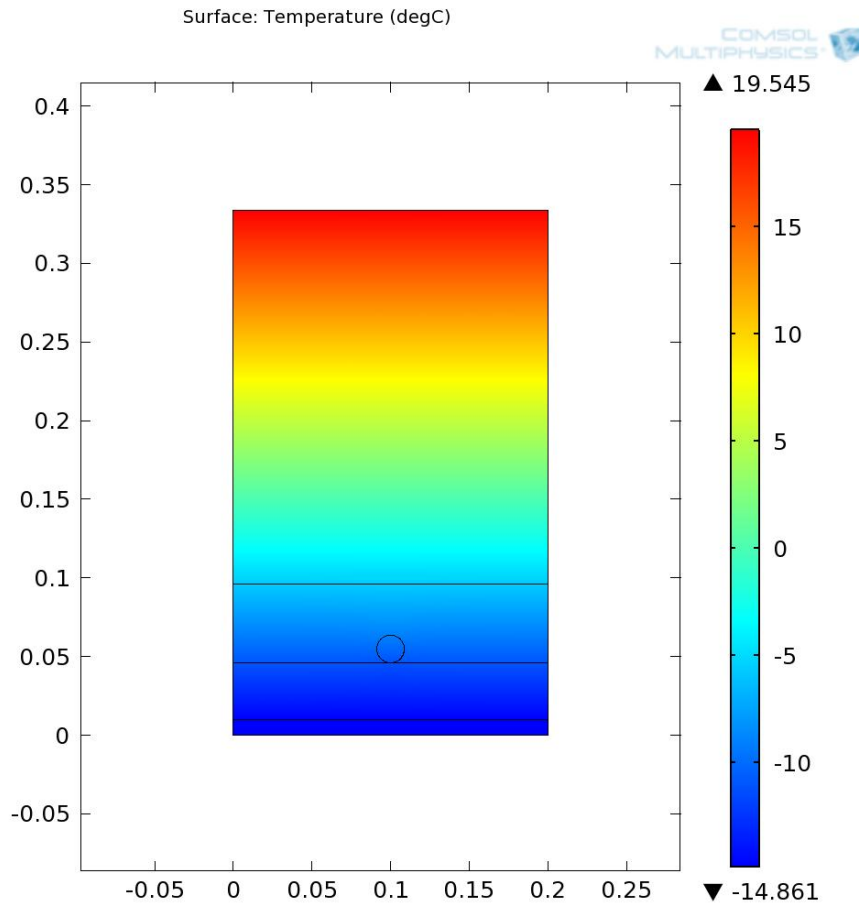
US 12



46 mm	Raketerm-elementti
17,5 mm	EPS-lämmöneriste (tuuletusurat Ø 17,5 mm, liimattu Raketerm-elementin taustalle)
32,5 mm	Kova mineraalivilla
250 mm	Kevyt mineraalivilla + teräsohutlevyrunko
0,2 mm	Intello -höyrynsulkukalvo
250 mm	Betoni
U-arvo	< 0,14 W/m²K

U-arvossa otettu huomioon tuuletusurituksen ja teräsosien aiheuttamat lisäkonduktanssit.

Kyllästyslämpötilan laskemisessa käytetty malli



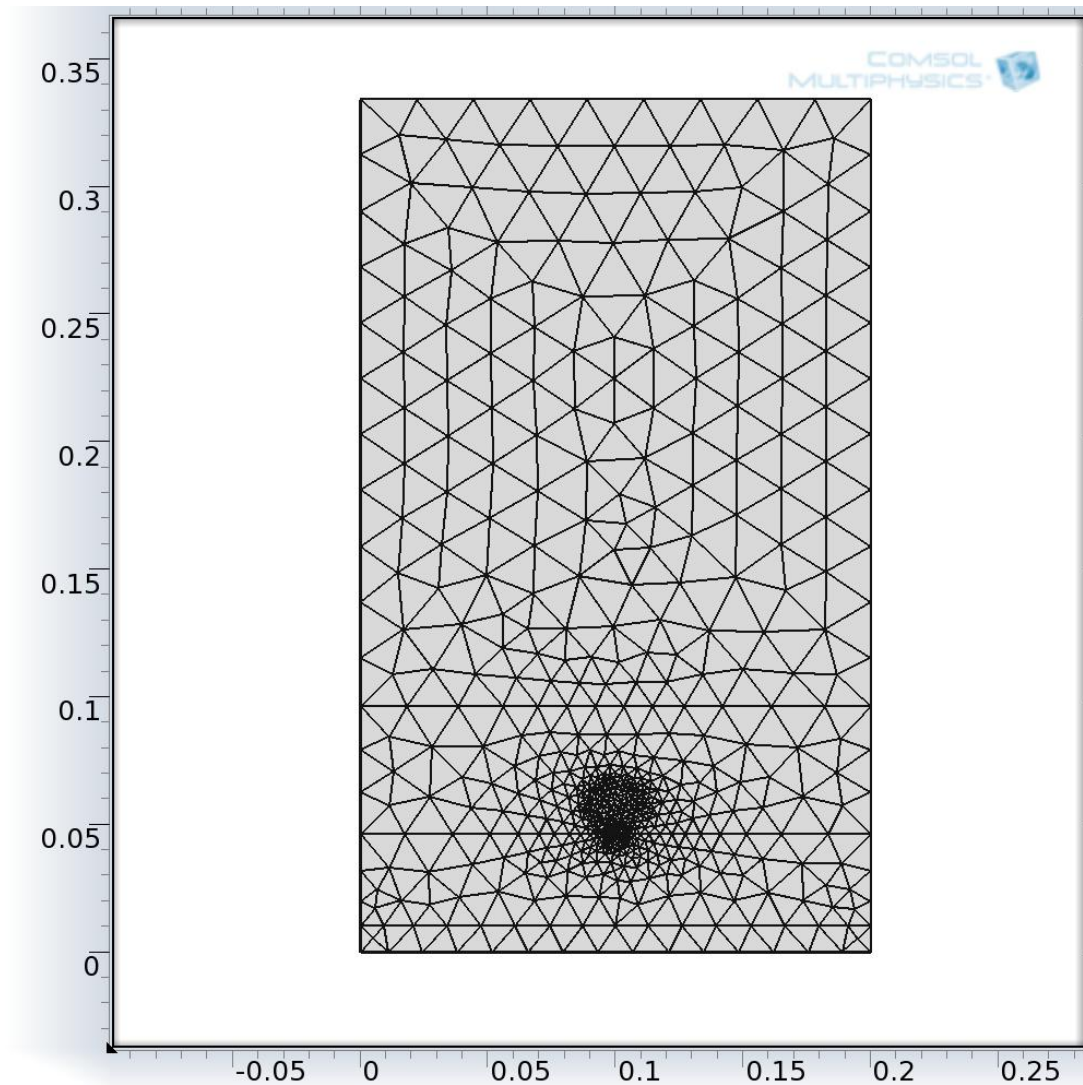
Kuva L5.1 Esimerkki kylästyslämpötilan laskemisessa käytetyn mallin tuloksena saadusta lämpötilajakaumasta. U -arvo $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $T_{\text{ulko}} = -15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kyllästyslämpötilat ratkaistiin eri U -arvoille kaksiulotteisella mallilla, jossa teräsrungon sisältävän kerroksen paksuutena käytettiin tehollista arvoa.

Taulukko L5.1 Rakennekerrosten paksuudet ja lämmönjohtavuudet kylästyslämpötilojen määrittämisessä.

Rakennekerros	λ [W/(mK)]	d [mm]
Tiililaatta	1	0,01
PUR/eps	0,033	0,036
eps	0,033	0,05
Teräsrunko	0,033	
Pintavastukset [(m ² K)/W]		
Sisäpinta	0,13	
Ulkopinta	0,04	

U-arvo [W/(m ² K)]	Teräsrungon tehollinen paksuus [mm]
0,17	102
0,14	144
0,10	238

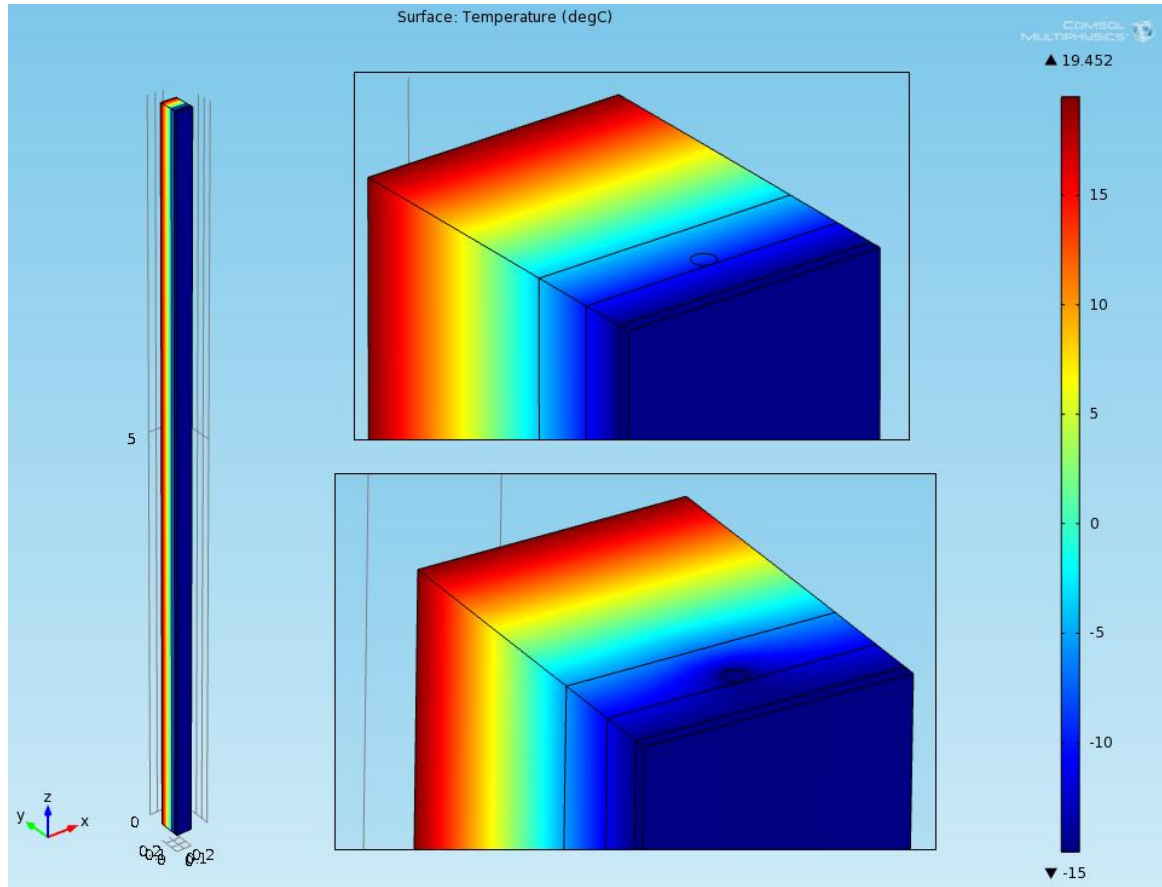


Kuva L5.2 Kyllästyslämpötilan laskennassa käytetyn mallin elementtiverkko.

Elementtien lukumäärä: 1190

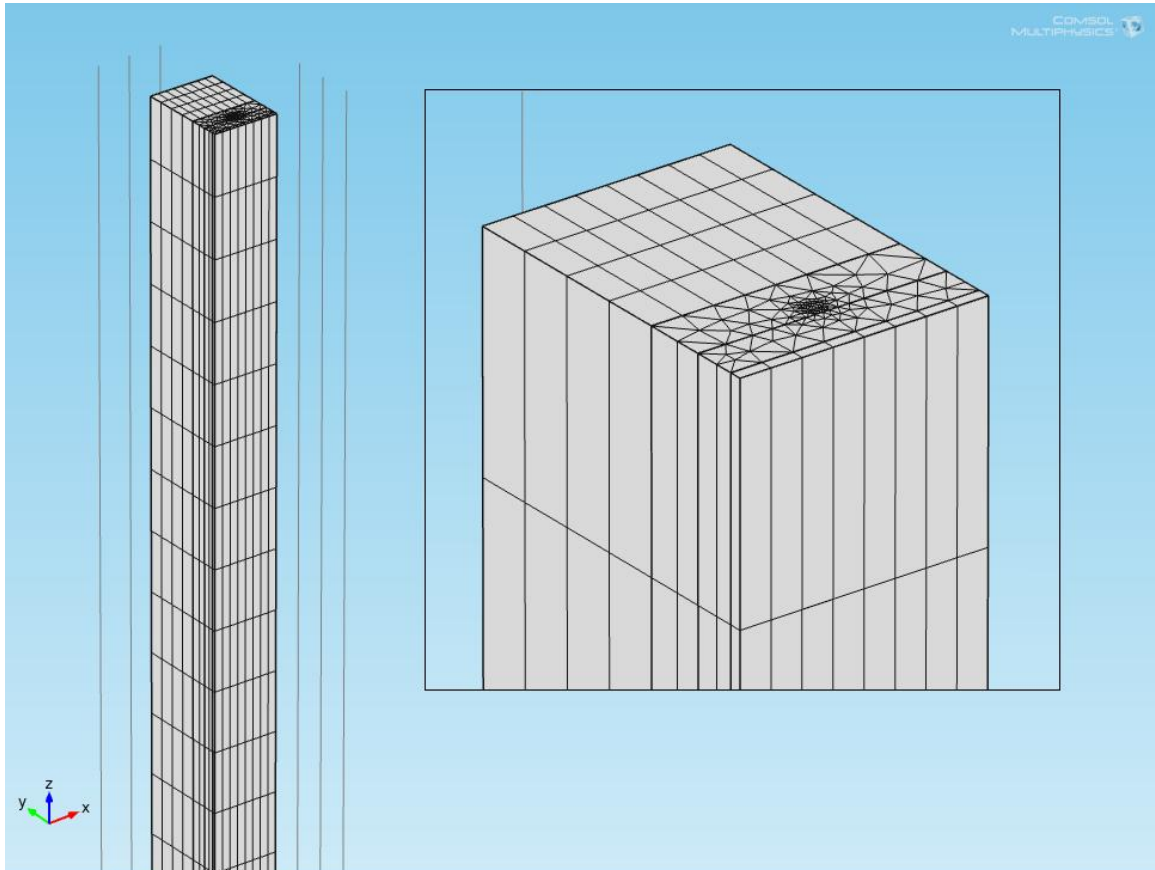
Vapausasteiden lukumäärä: 2441

Tuuletusurituksen keskimääräisen lämpötilan laskemisessa käytetty malli



Kuva L5.3 Lämpötilajakauma yksiuraisessa mallissa. Tarkennukset pystyuran päistä ylä- ja alapuolelta katsottuna.

Tuuletusurituksen keskimääräisen lämpötilan laskemisessa käytettiin samoja lämmönjoh-
tavuuksia kuin kyllästyslämpötilan laskemisessa.



Kuva L5.4 Yksiuraisen mallin elementtiverkko.

Elementtien lukumäärä: 11800

Vapausasteiden lukumäärä. 13464

Esimerkki lopullisen virtauskentän laskemiseen käytetystä mallista

Tuulettusratkaisu 4 ($U = 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$):

Taulukko L5.2 Tilavuusvirrat kolmen eri kerroksen reunimmaisessa pystyurassa (ka-uimpana tulo- ja poistoaukoista) kun ulkoilman lämpötila $-15 \text{ }^\circ\text{C}$. $R_{ef} = \text{keskiarvo}(R_1...R_3)$

T_{av}	-6,83	$^\circ\text{C}$
R_1	$1,25 \cdot 10^{-5}$	m^3/s
R_2	$1,83 \cdot 10^{-5}$	m^3/s
R_3	$1,50 \cdot 10^{-5}$	m^3/s
R_{ef}	$1,53 \cdot 10^{-5}$	m^3/s

Taulukko L5.3 Tilavuusvirrat kolmen eri kerroksen reunimmaisessa pystyurassa (ka-uimpana tulo- ja poistoaukosta) kun ulkoilman lämpötila $-20 \text{ }^\circ\text{C}$. $R_{ef} = \text{keskiarvo}(R_1...R_3)$

T_{av}	-10,67	$^\circ\text{C}$
R_1	$1,37 \cdot 10^{-5}$	m^3/s
R_2	$2,01 \cdot 10^{-5}$	m^3/s
R_3	$1,66 \cdot 10^{-5}$	m^3/s
R_{ef}	$1,68 \cdot 10^{-5}$	m^3/s

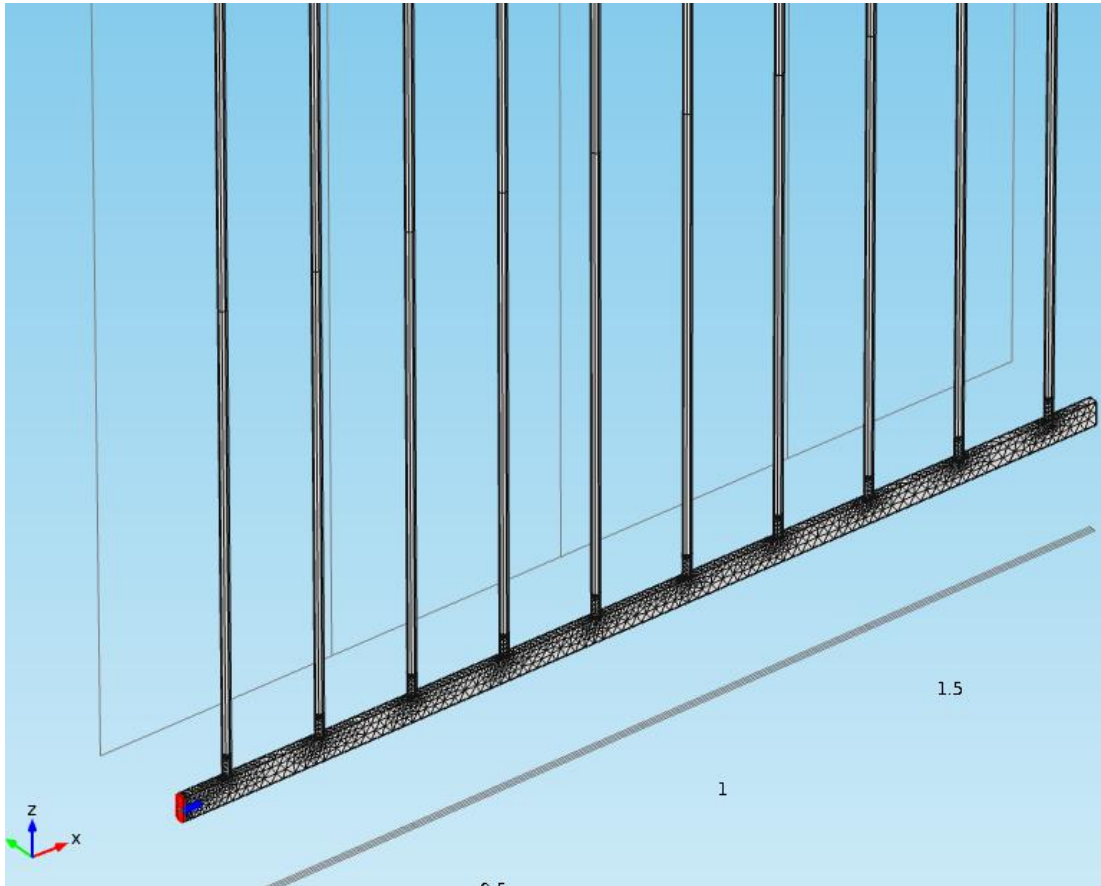
R_1 = ilman tilavuusvirta ylimmän kerroksen reunimmaisessa pystyurassa.

R_2 = ilman tilavuusvirta keskimmäisen kerroksen reunimmaisessa pystyurassa.

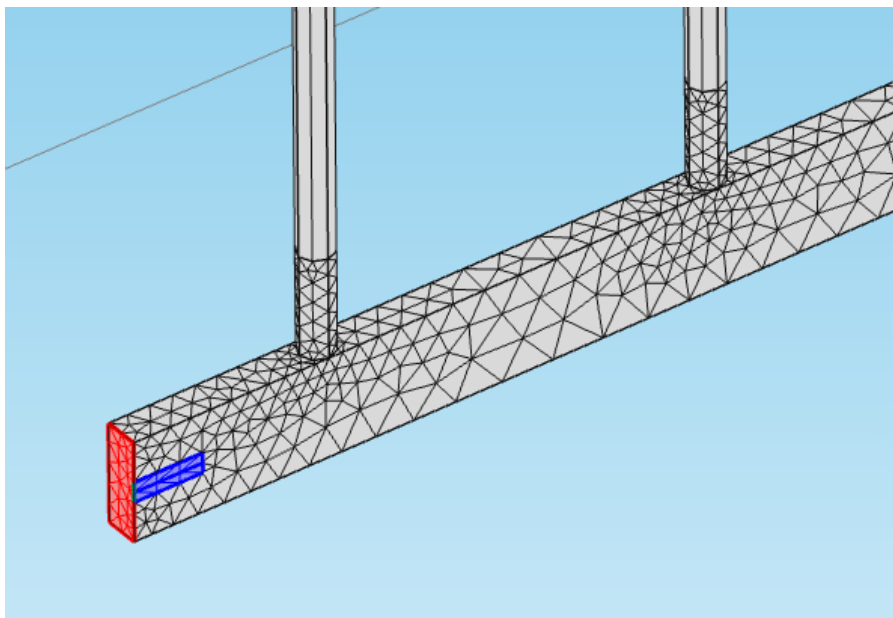
R_3 = ilman tilavuusvirta alimman kerroksen reunimmaisessa pystyurassa.

Elementtien lukumäärä: 64188

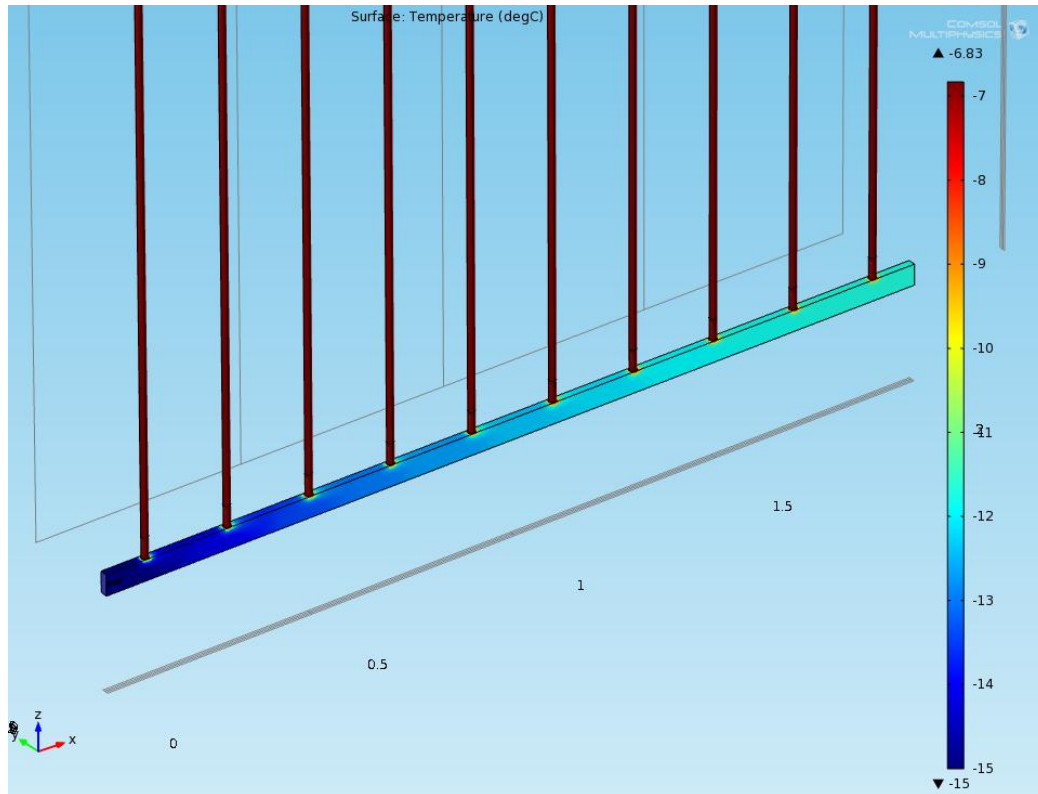
Vapausasteiden lukumäärä: 92020



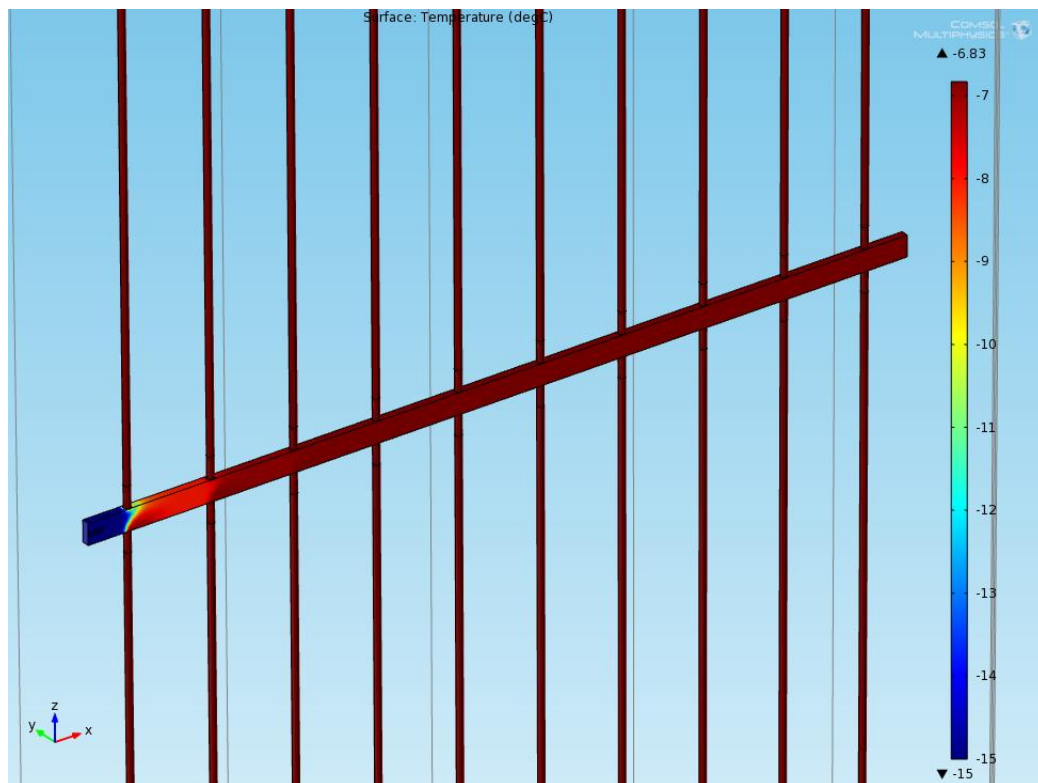
Kuva L5.5 Elementtiverkko lopullisessa mallissa.



Kuva L5.6 Elementtiverkko lopullisessa mallissa. Punaisella maalattu alue = symmetriataso, sinisellä maalattu alue = tulo- ja poistoaukko.



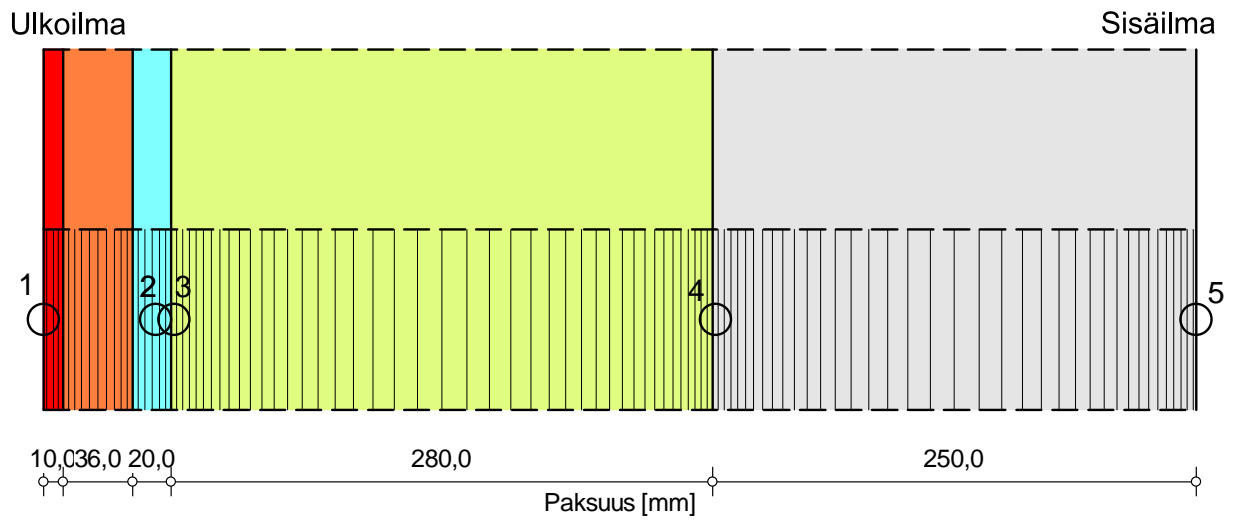
Kuva L5.7 Lämpötilajakauma alimmassa kokoojakanavassa.



Kuva L5.8 Lämpötilajakauma toiseksi alimmassa kokoojakanavassa.

Rakennekerrokset US1

Tapaus: #1



○ - Monitoripisteet

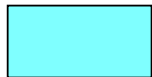
Materiaalit :



- Tiililaatta



- *PUR/EPS (Avoin)



- *Ilmakerros 20 mm (Avoin)

- *Glass wool, max.wc: 45kg/m³ (D1, modified) (unlocked) (Avoin)- Kalkkahiiekkakivi (Tiheys: 1900 kg/m³) (Avoin)

Kokonaispaksuus: 0,6 m

R-arvo: 8,89 m²K/WU-arvo: 0,11 W/m²K

WUFI® Pro 5.1

Reunaehdot

Ulkopuoli (vasen)

Sijainti: Jokioinen_2004_nyky.wac
Ilmansuunta / Kallistuskulma: Pohj. / 90 °

Sisäpuoli (oikea)

Sisäilmasto: EN 13788
Käyttäjän määrittelemä; Lämpötila: 20 °C

Pinnan siirtokertoimet

Ulkopuoli (vasen)

Nimi	Yksikkö	Arvo	Kuvaus
Lämmönvastus	[m ² K/W]	0.04	
Sd-arvo	[m]	----	Ei pinnoitetta
Lyhytaaltainen absorptiokerroin	[-]	0,68	Tiili, punainen
Pitkäaalton säteilyn emissiokerroin	[-]	0,9	Tiili, punainen
Sateen absorptiokerroin	[-]	0,7	Kallistuskulman ja rak.tyypin mukaa

Sisäpuoli (oikea)

Nimi	Yksikkö	Arvo	Kuvaus
Lämmönvastus	[m ² K/W]	0.13	
Sd-arvo	[m]	----	Ei pinnoitetta

Explisiittinen säteilytase

Ulkopuoli (vasen)

Nimi	Arvo
Sallittu	ei

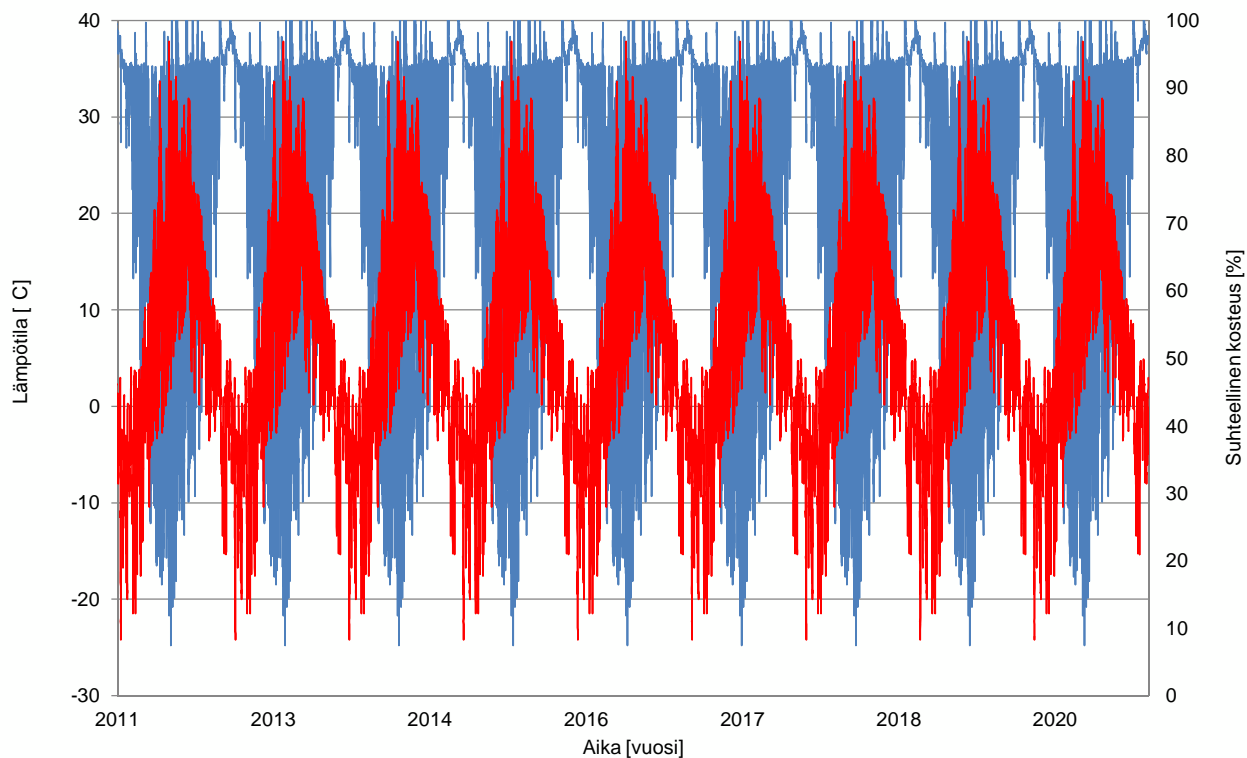
WUFI® Pro 5.1

Lähteet, nielut

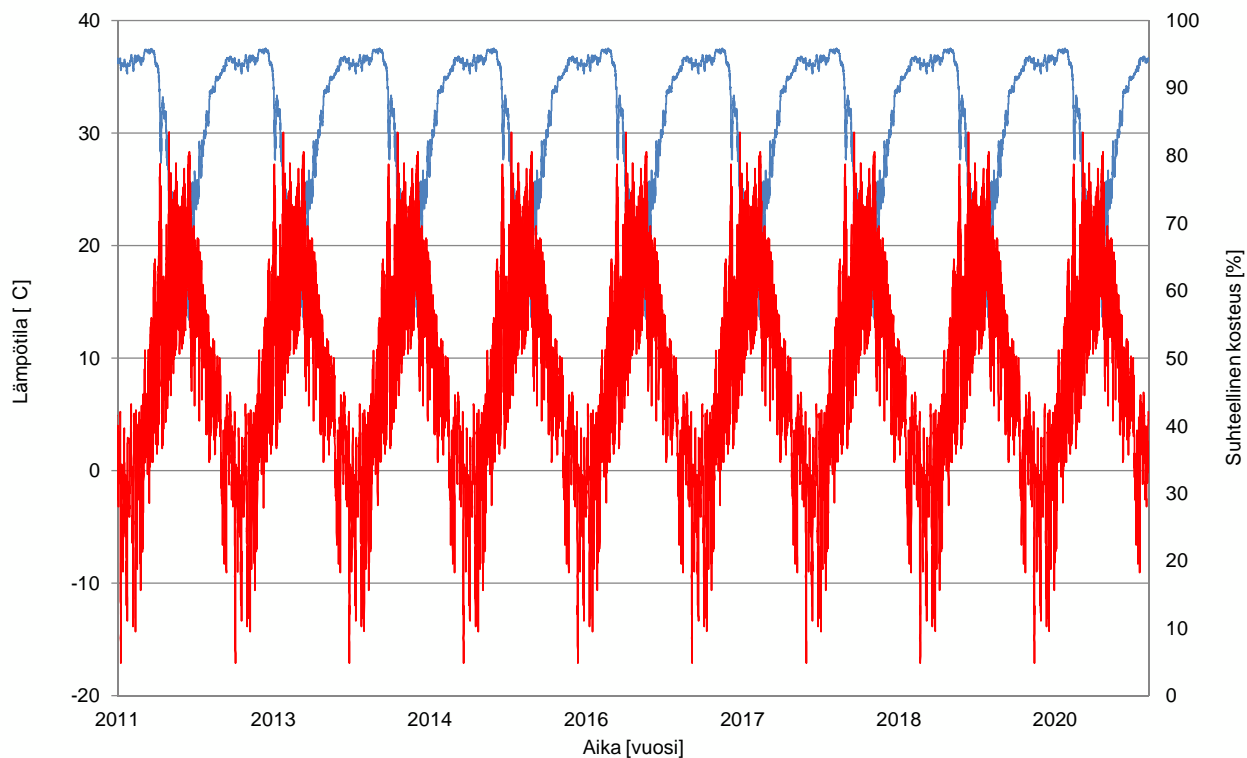
*Ilmakerros 20 mm (Avoin)

Tyyppi	Nimi
Air Change	Lähde1

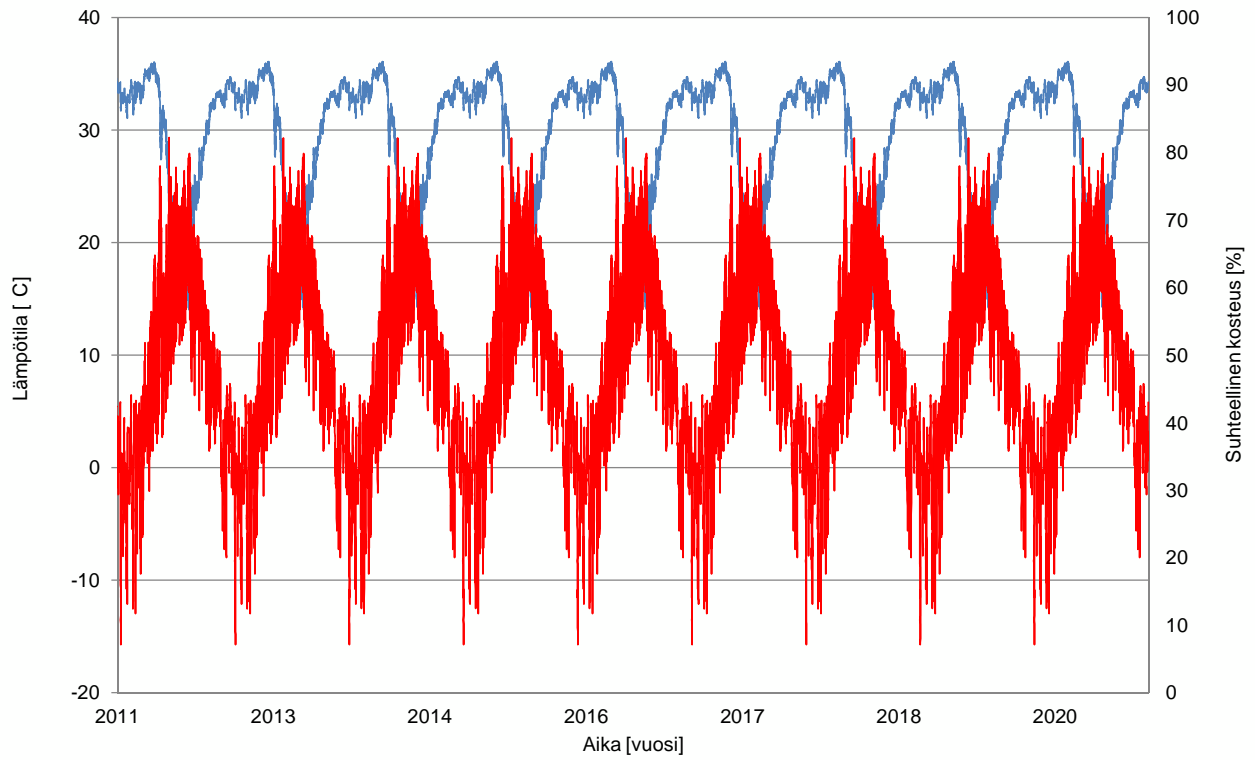
US1 monitoripiste 1, lämpötila ja suhteellinen kosteus



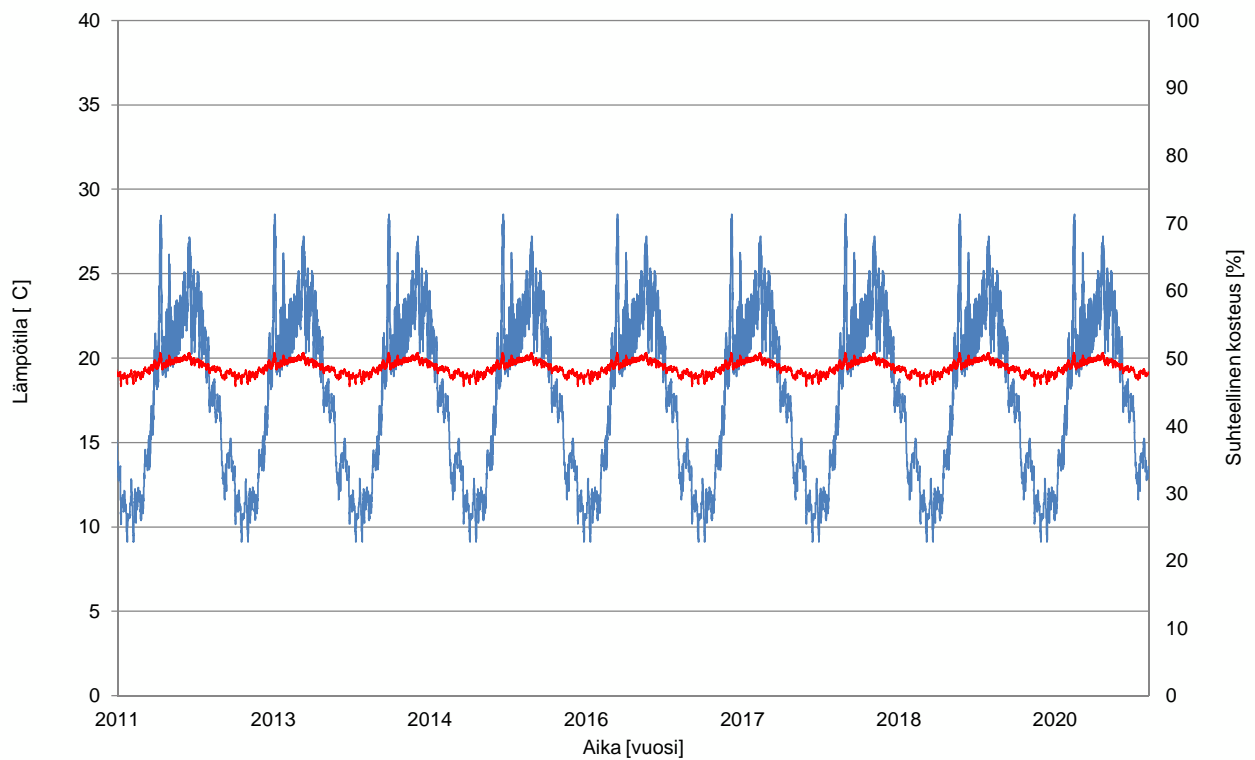
US1 monitoripiste 2, lämpötila ja suhteellinen kosteus

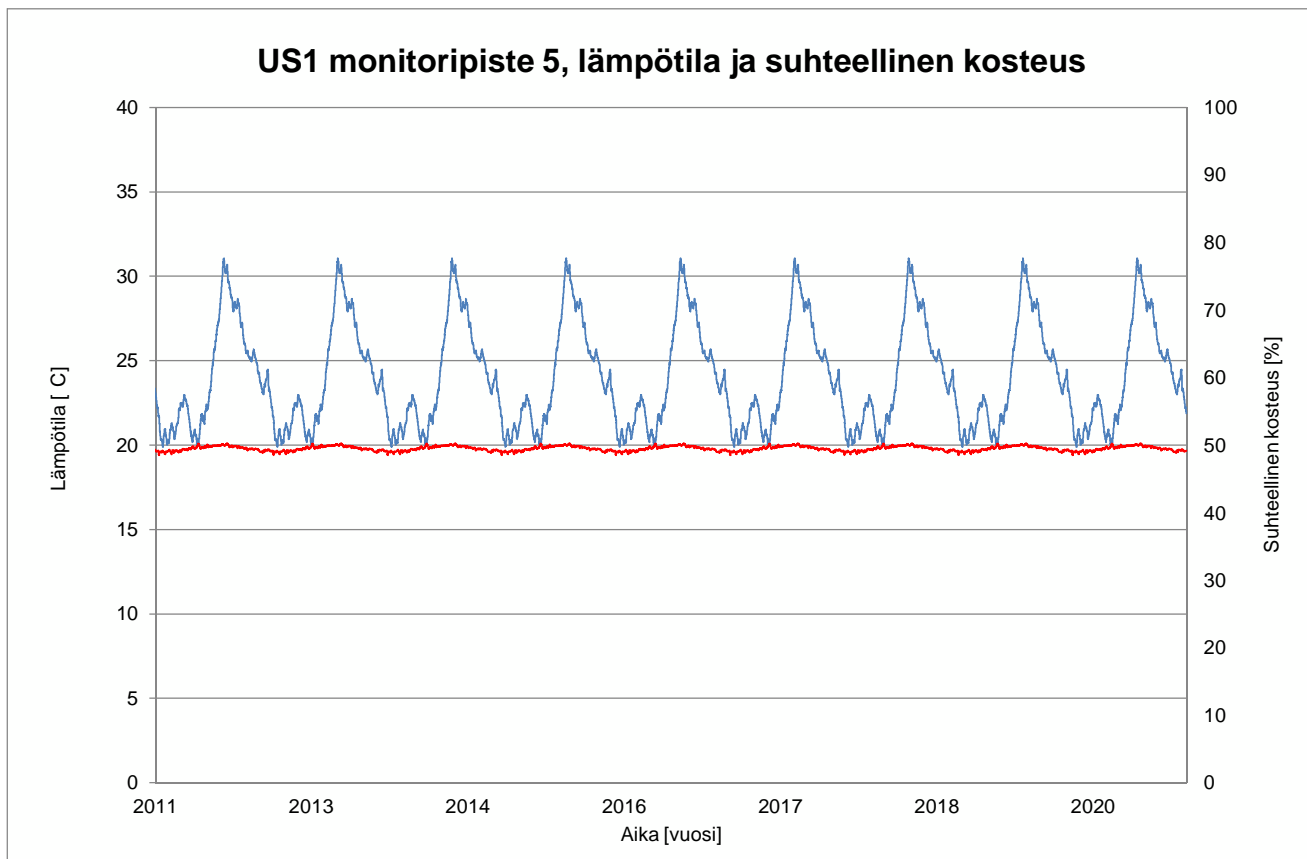


US1 monitoripiste 3, lämpötila ja suhteellinen kosteus



US1 monitoripiste 4, lämpötila ja suhteellinen kosteus





Homeindeksi (US11)

