

PUUKERROSTALON YLÄPOHJAN TUULETUSRAON FYSIKAALISEN TOIMIVUUDEN TARKASTELU

FEM-simuloinnin avulla



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Visamäki, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutus, insinööri AMK

Kevät 2017

Katja Rodionova

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutus, insinööri AMK
Visamäki

Tekijä	Katja Rodionova	Vuosi 2017
Työn nimi	Puukerrostalon yläpohjan fysikaalisen toiminnan tarkastelu FEM-sovellusten avulla	

TIIVISTELMÄ

Puukerrostalorakentaminen on nopeasti kehittyvä ala. Rakennusmääräysten kehityksen myötä pyritään luomaan suotuisat olosuhteet uusiutuvan kotimaisen materiaalin käytölle. Rakennetekniikan osalta kehitystehtäviin kuuluu toimintavarman rakennejärjestelmän suunnittelu. Tähän asti Suomessa rakennetuista puukerrostaloista jokainen on toiminut tuotekehityksen koekappaleena. Taloudelliset puitteet määräävät sen, että rakennejärjestelmän kehityksestä pitää saada lähiaikoina selkeät tulokset, joiden avulla voitaisiin käynnistää puukerrostalojen massatuotanto.

Puun materiaaliominaisuudet tarjoavat erinomaiset puitteet kerrostalorakentamiseen. Kuitenkin altistuminen kosteudelle voi vaurioittaa puurakenteita sekä vaikuttaa negatiivisesti sisätilojen ilmanlaatuun. Näin kosteusrasitusten eliminoinnista muodostuu puurakennesuunnittelun parissa tärkeä tehtävä.

Tässä työssä selvitettiin eri tekijöiden vaikutukset puukerrostalon yläpohjan tuuletusraon toimintaan. Jatkuvan toimintavarman tuulettavuuden päätekijänä todettiin olevan yläpohjan lämmönvuoto, joka on supistunut olennaisesti energiamääräysten myötä ja todennäköisesti tulee supistumaan edelleen. Suurimpana tuulettavasta heikentävänä tekijänä todettiin olevan rakenneosien geometria, etenkin tasakaton räystäsdetaljin koonpano.

Rakenteen toimivuutta testattiin käyttäen kaksi- ja kolmeulotteisia malleja FEM-simulointiohjelman avulla sekä 1d-laskelmia soveltaen. Työn aikana kehitetty työkalusto mahdollistaa yläpohjan ja mm. räystäsrakenteen elementtitekniikan jatkokehityksen. Tällaisen jatkokehityksen tarve voi todennäköisesti syntyä energiamääräysten kiristytessä.

Avainsanat puukerrostalo, puuelementti, yläpohja, tuuletusrako

Sivut 82 sivua, joista liitteitä 34 sivua

Degree programme in Construction Engineering
Visamäki

Author	Katja Rodionova	Year 2017
Subject	Physical performance of a multi-storey, timber element-based roof structure in an apartment building through FEM software	

ABSTRACT

Construction of a multi-storey apartment blocks using wood-based elements is a fast-growing industry. The latest changes in building regulations seek to create favourable conditions for the use of renewable domestic material. At the same time, engineering agencies are facing the task of developing a new structural design code. Until now, every wooden apartment building built in Finland presented a test piece for the ongoing development process. Contemporary market situation, however, demands that a workable design code should be available in the nearest future to launch the mass production of wooden apartment blocks.

The mechanical properties of wood provide an excellent setting for high-rise construction. However, a prolonged exposure to moisture may damage wooden structures and may have a negative impact on indoor air quality. Hence, the elimination of moisture stresses forms an important part of wood construction design.

The purpose of this Bachelor's thesis was to study the effects of various factors on the functioning of a ventilation gap of a timber element-based, multi-storey apartment block. It was found out that the main factor of continuous ventilation is a heat leakage through the roof layers. This factor has decreased substantially due to energy regulations and is likely to further decrease in the future. The main negative factor to decrease the rate of ventilation is the geometry of the ventilation gap, particularly the configuration of a parapet.

The functionality of the structure was tested using two- and three-dimensional models on FEM simulation program and 1-dimensional Mathcad calculations. The tools developed during the study can be used for the ongoing technical development of timber-based roof and parapet elements. The need for such development is likely to appear in case of further tightening of building regulations.

Keywords multi-storey building, wood-based elements, roof structure, ventilation gap.

Pages 82 pages including appendices 34 pages

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	NUMEERISET MENETELMÄT RAKENNUSFYSIKAALISISSA LASKELMISSA.....	3
2.1	FEM-menetelmän kuvaus	3
2.2	Numeeristen ratkaisujen käyttö fysikaalisten prosessien simuloinnissa.....	4
2.3	Elementtiverkon simulointitutkimusjärjestelyt	7
3	KOSTEUSRASITUKSEN TEKIJÄT YLÄPOHJARAKENTEES SA.....	8
3.1	Kriittisten olosuhteiden valinta.....	9
3.2	Kosteuslähteet	10
3.2.1	Normaalikäytön aikainen kosteustuotto.....	10
3.2.2	Rakennusvirhe	13
3.2.3	Ulkoilma kosteuden lähteenä.....	14
3.2.4	Konvektion (höyrynsulun epäjatkuvuuden) aiheuttama kosteusrasitus	15
4	RAKENTEEN TUULETUKSEN ENERGIALÄHTEET JA PROSESSIT.....	16
4.1	Säteily.....	16
4.1.1	Pitkäaaltoinen säteily	16
4.1.2	Auringon säteily (lyhytaaltoinen säteily).....	17
4.2	Lämmön siirtyminen konvektiolla.....	20
4.3	Ekvivalentti ulkolämpötila.....	20
4.4	Lämmön siirtyminen johtumisella.....	21
4.5	Nostevoima	22
4.6	Ilmanvirtaukset rakenteen sisällä	23
4.6.1	Liikkumaton ilma ja ryömivä virtaus.....	28
4.6.2	Laminaarinen ilmanvirtaus	28
4.6.3	Turbulenssi ilmanvirtaus	29
4.6.4	Monifaasivirtaus.....	30
4.6.5	Geometrian aiheuttamat kertavastukset.....	31
4.7	Ulkopuoliset ilmavirtaukset (tuuli).....	33
4.8	Tuuletusraon multifysiikka	34
5	YLÄPOHJARAKENTEEN JA SEN OSIEN KUVAUS.....	37
5.1	Räystäsdetalji ja suuntamuutosdetalji	38
5.1.1	Räystäsdetaljin lämpö- ja kosteustekninen toiminta.....	38
5.1.2	Suuntamuutosdetaljin kitkapainehäviöt	40
5.1.3	Räystäsdetaljin kitkapainehäviöt.....	41
5.2	Vaakasuuntainen tuuletuskaista tasakaton kohdalla	42
5.3	Pystysuuntainen hormi	43
5.4	Tulo- ja poistoilmareitti.....	44
6	TUTKIMUSTULOSTEN TULKINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET	45
	LÄHTEET.....	47

Liitteet

Liite 1. Painovoimaisen tuuletuksen osatekijät. Mathcad-analyysi.

Liite 2. Kosteusvirtaus yläpohjarakenteessa. Mathcad-analyysi.

1 JOHDANTO

Pyrkimys energiakulutuksen optimointiin johtaa siihen, että rakenteiden toimivuuden varmistamiseen on saatavilla rakennuksen elinkaaren aikana yhä vähemmän resursseja. Samalla rakennesuunnittelun tarpeisiin valmistuvat uudet työkalut, joiden avulla voidaan huomioida yhä tarkemmin prosessien osatekijöitä ja saavuttaa aiempaa parempi ymmärrys rakenteiden toimintaperiaatteista. Energian käyttöä pyritään siis korvaamaan älykkäiden ratkaisujen käytöllä; älykkyydellä tarkoitetaan tässä kykyä tunnistaa ja hyödyntää yhä pienempiä eroavaisuuksia.

Tämänkin työn tavoite on saada rakennetun ympäristön kohde toimimaan paremman tasapainottelun avulla luopumalla tietoisesti raajan voiman (energiaa kuluttavien mekaanisten tai lämmityslaitteiden) käytöstä.

Luonnon eri ilmiöitä voidaan kuvata tietyllä tarkkuudella yhtälöiden avulla. Yhden tai usean ilmiön vaikutukset voidaan arvioida yhdistämällä eri ilmiöitä kuvaavat yhtälöt yhtälöryhmiin. Tuntemattomat suureet saadaan sitten yhtälöryhmää ratkomalla. Analyytinen ratkaisu on saavutettavissa silloin, kun tuntemattomien suureiden määrä on pienempi kuin yhtälöiden määrä eikä yhtälöissä ole keskinäisesti riippuvaisia suureita. Tosielämän tilanteissa analyytinen ratkaisu on kuitenkin harvoin saavutettavissa. Tällöin voidaan käyttää ja yhdistellä eri menetelmiä epävarmuustekijöiden poistamiseksi:

- Ilmiöpohjaista analyysia käyttäen pyritään arvioimaan, millaisilla muuttuvilla tekijöillä on vähiten vaikutusta lopputulokseen, ja tehdään fysikaalisia olettamuksia poistamalla näiden tekijöiden vaikutukset ongelmakentästä.
- Matemaattisia työkaluja käyttäen luodaan suppenevat likiarvoisten ratkaisujen sarjat, joissa edellistä ratkaisua käytetään seuraavan ratkaisun pohjana. Iteratiivisen menetelmän esimerkkinä voidaan pitää kylmäsiltojen vaikutuksen yläraja–alaraja-menetelmää.
- Suunnittelutyökaluja käyttäen voidaan eliminoida suurinta epävarmuutta aiheuttavia rakenneteknisiä tekijöitä.

Näiden menetelmien yhdistelmästä muodostuu tuotekehitysprosessi, joka itsessään on iteratiivinen luonteeltaan.

Tietoteknisten sovellusten, kuten Comsol Multiphysicsin, avulla voidaan toteuttaa tuotekehitysprosessi porrastetusti ja suorittaa suuri määrä välikokeita ennen fyysisen koe-rakenteen kokoonpanoa. FEM-ohjelmistoon sisäänrakennettu kaavakokoelma helpottaa myös tiedon kulkua erikoisalojen kärkitutkimuslaitoksista eri ammattialojen käytännön sovelluksiin. Näin poistuu käsilaskutarkastusten aiheuttama ajanhukka ja toisaalta liiallisen yksinkertaistamisen välttämättömyys. Kantavien rakenteiden suunnittelussa tämä suuntaus on kehittynyt jo hyvin pitkälle. Rakennusfysiikan sovellusten laskutehotarve on suurempi, joten Comsolin ja vastaavien tehokkaiden laskutyökalujen käyttö ei ole vielä yleistynyt.

Rakennusfysiikka, kuten muutkin fysiikan osalajit, käsittelee energian siirtymistä ja varastoitumista eri muodoissa. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa keskitytään lämmön ja massan siirtymiseen ja varastoitumiseen ”normaaleissa” eli ihmisen elinympäristön olosuhteissa.

Massan siirtymisellä tarkoitetaan aineen partikkeleiden siirtymistä pisteestä A pisteeseen B. Rakennusfysikaalisissa ongelmissa massan siirtyminen rajoittuu pääosin ilman ja (höyry- tai nestemäisen) veden siirtymiseen.

Lämmön siirtymisellä tarkoitetaan sellaista molekyylien liike-energian siirtymistä (johtuminen ja konvektio) tai aaltoliikkeen välityksellä tapahtuvaa energian siirtymistä, jota ei voi havaita silmämääräisesti, mutta joka voidaan tunnistaa välillisesti lämpötilamuutoksen avulla.

Yläpohjan tuuletusraossa tapahtuu sekä massan että lämmön siirtyminen. Massan siirtyminen sisällyttää ilman liikkumisen ilmaraossa ja huokoisessa eristekerroksessa nostevoiman ja tuulen vaikutuksesta sekä vesihöyryn siirtymisen rakenteessa paine-erojen vaikutuksesta. Lämpö siirtyy yläpohjassa sekä johtumisen, konvektion että säteilyn myötä. Yläpohjan tuuletusraon toiminnan erikoisuutena mainittakoon, että massan siirtyminen tuuletusraossa muodostaa ei-lineaarisen ongelman.

Toisin sanoen, tuuletusraossa tapahtuvien prosessien tekijät ovat voimakkaasti riippuvaisia myös keskenään. Ainakin seuraavien mekanismien ymmärtäminen on tärkeää:

- Sekä laminaarisella että turbulenssivirtauksella on ominaispiirteet, joiden vaikutus rakenteiden toimintaan on varsin suuri. Kanavamutkissa muodostuneiden vastavirtojen sekä turbulenssin synnyttämän kitkan ansiosta pakotetun ilmanvaihdon energiakulutus kasvaa, ja luonnollisen ilmanvaihdon tasapaino muodostuu melko matalalla tasolla.
- Monifaasivirtaus on virtaus, jossa on mukana kaksi tai useampaa ainesta tai sama aines eri muodoissa. Eri approksimaatiotasolla voidaan aineiden pitoisuussuhteen ja faasimuutosten vaikutukset huomioida tai jättää huomiotta. Tämän esimerkkinä mainittakoon vesihöyrypitoisuuden kasvun vaikutus ilman tiheyteen ja sitä kautta nostevoimaan.
- Lämpövirtaukset rakenteessa voidaan myös huomioida eri tarkkuustasoilla. Perustasolla (hetkellisen luokan käsilaskulla) ei yleensä huomioida rakenneosien lämpökapasiteettia, nostevoiman aiheuttamaa lämpöliikettä tuuletusraon ylä- ja alapintojen välissä sekä ilman lämpötilalaajenemista (vrt. Hagentoft 2001, 185). Nämä tekijät ovat riippuvaisia keskenään ja vaikuttavat voimakkaasti myös massavirtauksiin. Tarkemmin tässä mainitut ilmiöt ja niiden vuorovaikutukset esitetään tämän työn luvussa 4.

Laskumenetelmän valinnalla on suuret vaikutukset laskennan tuloksiin ja virhearvoihin. Käsilaskulla voidaan järkevän työajan sisällä suorittaa lähinnä useiden hetkellisten tilan-

teiden tarkastelut 1–5 elementin jaolla. Tällaisen tarkastelun epävarmuus on käytännössä samaa luokkaa tai jopa suurempi kuin rakenteessa kriittisissä olosuhteissa todennäköisesti tapahtuva ilmavirtaus.

Laajojen mallien simuloinnissa voidaan käyttää porrastettua mallinnusta. Yksittäisten pienosien toimintaperiaatteet selvitetään erikoismalleja käyttäen ja saadut tulokset yhdistetään yleismallissa, jossa pienjakoiset osat korvataan toimintaperiaatteeltaan vastaavilla, mutta geometrisesti yksinkertaisimmilla elementeillä. Tämä julkisivurakenteiden analysoinnin työtapana on kuvattu esim. lähteessä (Hand 2015). Järkevän työajan sisällä voidaan näin ollen tarkastella n. 10 000 elementistä koostuvia, 2–3 ilmiökenttää yhdistäviä malleja 3 %:n tarkkuudella. Kattorakenteen tuuletuskaistan mittakaavassa se tarkoittaa, että massa- ja lämmönvirtausten vektorit voidaan määrittellä 1...8 cm:n kokoisille elementeille. Numeerisen menetelmän periaatteet esitetään tämän työn luvussa 2.

Tämä työ pohjautuu selvittelyyn, joka oli suoritettu Sweco Rakennetekniikka Oy:n toimeksiannosta ja joka on toiminut osana 8-kerroksisen puukerrostalon suunnitteluprosessia. Osaksi kyseisen rakennuksen periaateratkaisut ja suunnitteluprosessin havainnot sekä mietinnöt mahdollisista tuotekehityssuunnista on esitetty tämän työn luvuissa 5. Projektiin liittyvä aineisto on saatavilla Sweco Rakennetekniikka Oy:ltä.

2 NUMEERISET MENETELMÄT RAKENNUSFYSIKAALISISSA LASKELMISSA

2.1 FEM-menetelmän kuvaus

Termi elementtimenetelmä (finite element method, FEM) esiintyi ensimmäisen kerran noin vuonna 1960. "Elementtikäsittelyä" eli rakenteen jakamista pienempiin tarkasteltaviin osiin oli kokeiltu 1950-luvun alusta mm. palkkielementtien parissa sekä lentokoneiteollisuudessa. (Hakala 1997, 13.) Menetelmän käyttöalueen määräävänä tekijänä on alusta lähtien ollut tietoteknisten työkalujen laskuteho. Tietokonetekniikan kehityksen mukaan menetelmän kattavuus laajeni sauvarakenteista palkki-, 2d- ja 3d-elementteihin. Kaikissa näissä tapauksissa menetelmä perustuu diskreetointiin eli tutkittavan systeemin jakautumiseen äärellisiin osa-alueisiin, joita mallinnetaan elementtien avulla. Elementit liittyvät toisiinsa tietyissä pisteissä, joita kutsutaan solmuiksi. Näin muodostuneen elementtiverkon avulla saadaan likimääräiset ratkaisut, jotka lähestyvät oikeaa ratkaisua tarkkuustason kasvaessa.

Elementtimenetelmän alkukehitysvaiheessa tutkimuksen kohteina olivat diskreetit ongelmat, joissa elementtimäärä on äärellinen ja elementtijako hyvin selkeä. Tietokonetekniikan kehittyessä kyseeseen tulleet ongelmat, esim. massiivirakenteiden tai tässä työssä käsitellyt rakennusfysikaalisen toiminnan simuloinnit, ovat luonteeltaan jatkuvia. Jatkuvilla ongelmilla yksittäisen elementin tilan kuvaus vaatii matemaattisen infiniteesimaalin pienen alueen/tilavuuden soveltamista. Tästä johtuen elementtimäärä on potentiaalisesti ääretön. Suoran menettelyn käyttöalue on siis lähinnä marginaalinen ole-massa olevan ongelmakenttään verrattuna. Kuitenkin diskreettien ongelmien parissa

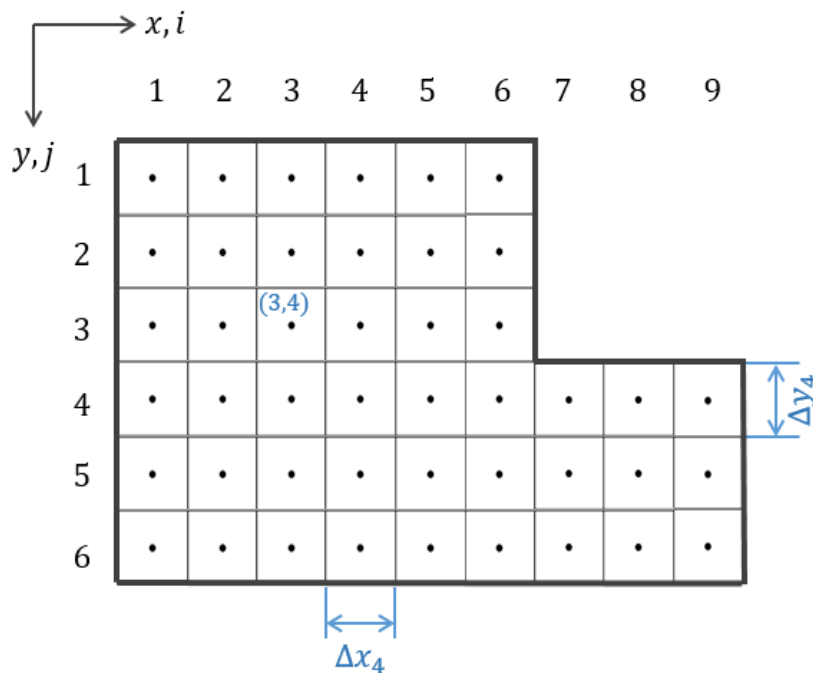
kehitetty periaate soveltuu hyvin likimääräismenetelmän perustaksi. Diskretoinnin kohteena on tällöin kontinuumin malli, joka on luotu matemaattisin työkaluin.

2.2 Numeeristen ratkaisujen käyttö fysikaalisten prosessien simuloinnissa

Rakennusfysikaalisten ja lujuusopillisten ongelmien FEM-mallinnuksessa on paljon yhteisiä piirteitä. Erot ilmestyvät vasta edistyneemmällä tasolla ja liittyvät elementtiverkon määrittelyyn ja numeeristen menetelmien valintaan, kuten on esitetty esim. teoksessa (Zienkiewicz ja Taylor 2000). Tässä esitetty rakennusfysikaalisten laskelmien periaatteellinen kulku on kuvattu lähteessä (Lewis et. al. 2004, 40) ja vastaa mm. teoksessa (Hakala 1997, 470–476) esitettyä ja statiikan ongelmista tuttua periaatetta.

Esimerkkinä tutkitaan 2-ulotteinen alue, jossa on olemassa energia- tai massavirtaus ϕ jonkun tilan (kappaleen) läpi.

Kontinuumin diskretoinnin vaiheessa tutkittava alue jaetaan erillisiin alueisiin.



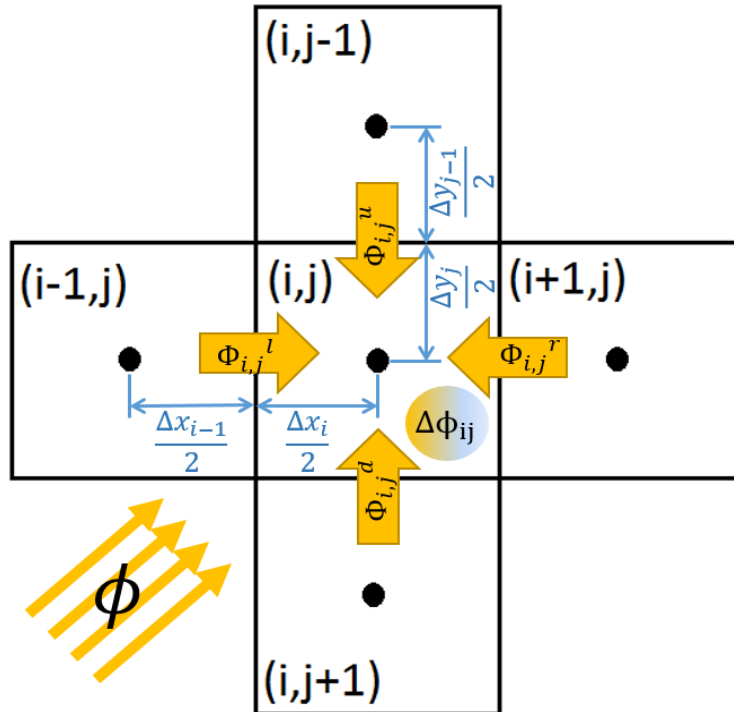
Kuva 1. Yksinkertaisen elementtijaon esimerkki ja numerointiperiaate.

Toisessa vaiheessa valitaan elementtien muotofunktiot. Kuvassa 1 esitetyt neliönmuotoiset alueet mallinnetaan neliönmuotoisina elementteinä, joten alueiden keskipisteiden ja elementtien keskipisteiden määrien suhde on 1. Jos elementin muodoksi valittaisiin kolmio, elementtien keskipisteiden lukumäärä olisi siis lähes kaksinkertainen alueiden keskipisteiden lukumäärän verrattuna. Yleisimmin käytettävät vaihtoehtoiset elementtimuodot ja niiden valintaperiaatteet ovat esitetty osiossa 2.3.

Elementit numeroidaan käyttäen esimerkiksi muotoa (i, j) ao. kuvan mukaisessa järjestyksessä. Yksittäisen elementin (i, j) kokoa kuvaavat tässä tapauksessa mitat Δx_i ja Δy_j . Elementin mitat valitaan riittävän pieniksi niin, että elementin sisällä olosuhteet voidaan

olettaa olevan tietyllä tarkkuustasolla yhdenmukaisia. Alueen rajat on merkitty kuvassa 1 paksulla mustalla viivalla.

Vaiheessa kolme muodostetaan elementtien yhtälöt.



Kuva 2. Yhden elementin tasapainoehdon tekijät.

Tutkittavan alueen rajoille merkitään rajaehdot, jotka kuvaavat ulkoisten tekijöiden vaikutukset alueella tapahtuviin prosesseihin. Jokaiselle elementille määritellään myös lähtöarvot, jotka kuvaavat elementin tilaa laskennan alkuhetkellä $t_0 = 0$.

Jokaisen elementin osalta sisään tulevien ja poistuvien energiavirtojen ja elementissä varastoituneen energian summan on oltava nolla (energian säilymislaki). Vastaavasti noudatetaan myös massan säilymislakia.

Elementin (i, j) tulevaa energiaa/massaa merkitään $\Phi_{i,j}^{\text{suunta}}$, jossa suunnat merkitään kirjaimilla l (vasemmalta), r (oikealta), u (ylhäältä), d (alhaalta). Varastoitunutta energiaa/massaa merkitään $\Delta\phi_{ij}$.

Tällöin diffuusioilmiöiden tapauksissa on voimassa ehto (Hagentoft 2001, 177), joka esittää esim. Fourierin (lämmön diffuusio) tai Fickin (vesihöyryn diffuusio) lakia:

$$\Delta t * \sum \Phi_{i,j}^{\text{suunta}} = \Delta\phi_{ij} * \Delta x_i * \Delta y_j \quad (1)$$

Fluidin virtausta kuvaa Navierin-Stokesin differentiaaliyhtälöryhmä (ks. osio 4.6).

Vaiheessa neljä muodostetaan matriisit, jotka kuvaavat systeemin tasapainotilannetta hetkellä t. Tällöin jokaisen elementin matriisisolujen arvot on yhdistetty globaaleissa

matriiseissa niin, että globaali matriisi kuvaa koko tutkittavaa alueetta. 3-vaiheen yhtälöiden matriisyhtälöiden yleismuoto diffuusio-ongelmissa on:

$$\{f\} = [K]\{T\} \quad (2)$$

Tässä:

- $[K]$ on globaali jäykkyyismatriisi,
- $\{f\}$ on globaali kuormitusvektori,
- $\{T\}$ on globaali tuntematon vektori.

Diffuusion ja luonnollisen konvektion yhdistetyn ongelman globaalien matriisien muodostumisen kulku on esitetty esimerkiksi lähteessä (Lewis et. al. 2004, 187–200).

Vaiheessa viisi sovelletaan iteratiivista menetelmää yhtälöryhmän ratkaisun löytämiseksi.

Kuudennessa vaiheessa määritellään päämuuttujista riippuvaiset toissijaiset muuttujat. Esimerkiksi lujuusopillisissa tehtävissä lasketaan solmuvoimien perusteella jännitykset ja lämmönjohtavuustehtävissä määritellään elementtien väliset lämpövirrat elementtien lämpötilojen funktioina.

Dynaamisissa tehtävissä yllä kuvattu mallinnusprosessi toistuu n kertaa niin, että jokaisen vaiheen tulokset käytetään seuraavan vaiheen lähtöarvoina. Tarkastelujakson aikaväli on tällöin:

$$\Delta t = \frac{t_{\text{loppu}} - t_0}{n} \quad (3)$$

Tässä n on tarkasteluvaiheiden määrä, tarkastelun aloitushetki on t_0 ja loppuhetki on t_{loppu} .

Aikavälin valinnassa on suuri merkitys mallin toimivuuden kannalta. Liian ison aikavälin valinta johtaa siihen, että yhden tarkastelujakson aikana varastoituneen energian laskennallinen arvo kasvaa epärealistiseksi ja yksittäisten elementtien ratkaisut eivät konvergoi. Käytännön sovelluksissa tarkastelun aikaväli määräytyy laskennan aikana automaattisesti joko koko järjestelmän tasolla tai paikallisesti, tällöin tarkastelujaksot voivat vaihdella elementtitasolla (Zienkiewicz ja Taylor 2000, 78). Sovelluksen käyttäjän tehtävä on tällöin antaa ”varmalla puolella” olevan arvion aikavälin suuruudesta, joka ei aiheutaa ongelmia laskennan alkuvaiheessa eli ennen automaattisen säätötoiminnon käynnistymistä.

Raja-arvot välivaiheissa voidaan määrittellä olemaan riippuvaisia laskennan tuloksista, ympäristön olosuhteista tai molemmista tekijöistä.

2.3 Elementtiverkon simulointitutkimusjärjestelyt

Luvussa 2.2 tutustuttiin rakennusfysikaalisen prosessin mallintamisen periaatteisiin neliöistä koostuvan elementtiverkon esimerkillä. Käytännön ongelmissa kuitenkin käyte- tään mitä monenlaisimpia elementtimuotoja ja niiden määrittelytapoja. Elementtiver- kon ”laatu” on tulosten käyttökelpoisuuden kannalta ratkaiseva tekijä. Laadulla tarkoi- tetaan sitä, että riittävän tarkat tulokset ovat saatavilla järkevillä laskutehoresursseilla. Resurssitehokkuus tarkoittaa, että elementin on oltava mahdollisimman iso. Tarkkuus- vaatimus on, että elementtien mitat ovat pienet verrattuina elementtien välisiin muut- tujien gradientteihin. Toimivan mallin rakentaminen vaatii siis käyttäjällä kykyä hahmot- taa etukäteen tutkittavassa kohteessa tapahtuvat prosessit.

Tutkittavan prosessin muuttujien määrä ja epälineaarisuus rajoittavat myös mallin ko- koa. Esimerkiksi lämmönjohtavuusongelman solmumuuttujamäärä on 1 ja laminaarisen virtauksen tutkimuksessa vastaava luku on 4. Näin lämmönjohtavuusongelmaa voidaan mallintaa tarkemmalla, 10-solmuisista parabolisista tetraedrielementeistä koostuvalla verkolla. Yhden elementin vapausastemäärä on tällöin 10. Virtaustutkimuksista jo kar- keamman 4-solmuisen lineaarisen tetraedrielementin vapausasteluku on 16. (Karvinen 2016).

Tässä asiayhteydessä kannattaa mainita yleiset elementtILAATUVAATIMUKSET:

- Kolmio- tai tetraedrimuotoisilla elementeillä voidaan elementtiverkko rakentaa täysin automaattisesti. Laskennan kannalta suunnilleen tasa- sivuinen muoto on suotuista ja yleinen laatuvaatimus on, että sisä- kulma $30^\circ < \alpha < 120^\circ$. Muissa tapauksissa interpoloinnilla saadut muuttujien arvot elementtien pinnoilla ovat hyvin kaukana tarkoista arvoista. (Durbin ja Medic 2013, 75–76.) Lineaariset kolmio-/tetraedrielementit sietävät huonosti jyrkkiä gradientteja, mutta parabo- liset elementit konvergoivat hyvin (Onate 2009, 206–208).
- Neliö- tai tiilielementtien sallittava sivusuhte on n. 100 (Durbin ja Me- dic 2013, 75–76). Tämän ansiosta ne soveltuvat kolmioelementtien pa- remmin esim. verkon rakentamiseen fluidivirtauksen rajan tuntu- massa. Neliö- tai tiilielementit konvergoivat kolmio-/tetraedriele- menttejä nopeammin. Elementtiverkon rakentaminen on kuitenkin hankalampaa ja monissa tilanteissa käytännössä mahdotonta. Tämän tyyppin parabolisten elementtien parissa havaitaan esim. epäasialliset jännitysten oskillaatiot, joiden eliminointi on käsiteltävä erikseen.
- Monitahokkaista koostuvat elementtiverkot konvergoivat useimmiten hyvin nopeasti ja tulosten tarkkuustaso on korkea. Tällaisen verkon ra- kentaminen muodostaa kuitenkin vaativan tehtävän.

Nykyaikaiset sovellukset, kuten Comsol Multiphysics, tarjoavat automatisoidut työkalut verkon rakentamiseen. Sovellus ehdottaakin oletuksena tietynlaiset parametrit perus- tuen mallin geometriaan ja tutkittavan ilmiöön. Automaattisen verkon parametrit voi muuttaa tai verkkoa voi viimeistellä lisätoimintojen avulla:

- ”Boundary layers”-toiminto rakentaa useita suorakaide- tai kiilaele- menttikerroksia (vastaavasti 2d- ja 3d- malleissa) valittujen rajapinto-

jen tuntumassa. Tämä mahdollistaa suuremman sivusuhteen kuin kolmion (tetraedrin) tapauksessa ja näin keventää laskutehotarvetta. Rajapinnan tuntumassa olevien elementtien rooli on kuvattu RANS-virtausmallien yhteydessä tämän työn luvussa 4.6.

- ”Corner refinement”-toiminto käynnistää elementtikoon skaalausta valittujen pintojen leikkauskohdan tuntumassa. Sen avulla voidaan optimoida laskutehokkuutta ongelmassa, joissa muuttujien gradientit odotetaan olevan suurimmillaan geometrian epäjatkuvuuden pisteissä.
- ”Mesh control domain”- ja ”mesh control faces” (vastaavasti 2d- ja 3d-malleissa) -toimintojen avulla voidaan määritellä erilaiset verkon ominaisuudet virtuaalisen rajan eri puolilla. Esimerkiksi ulkoseinän suoran osuuden ja nurkan alueella ja kylmäsilan tuntumassa voidaan olettaa lämpötilagradienttien olevan erilaisia.

Verkon parametrit voi myös määritellä alusta lähtien elementtien geometriaa ja elementtijakoa sääteleviä toimintoja käyttäen:

- ”Mapped”-toiminto mahdollistaa säännöllisen verkon rakentamisen. Säännöllisellä verkolla elementit voidaan numeroida (i,j) tai (i,j,k) ja se koostuu suorakaide- tai tiilielementeistä. Toiminnon avulla voidaan määritellä sekä tasaista että analyyttisesti määriteltyä elementtija-kaumaa.
- ”Triangular”- ja ”Tetrahedral”-toiminnot mahdollistavat (vastaavasti 2d- ja 3d- malleissa) epäsäännöllisen eli kolmioista tai tetraedreistä muodostuvan verkon rakentamisen.
- ”Swept”-toiminto mahdollistaa säännöllisen ja epäsäännöllisen verkkojen yhdistämisen 3d-mallissa. Tällöin elementtiverkko voi koostua kiila- ja tiilielementeistä.

Elementtiverkon analyysi-toiminto mahdollistaa rakennetun verkon laadun tarkastelun. Tulokset esitetään värigradienttina. Huononlaatuisten elementtien määrästä ja sijoittelusta päätellen voidaan verkkoa optimoida paikallisesti tai esimerkiksi luoda uusi verkko skaalaamalla olemassa olevan verkon kaikki toiminnot.

3 KOSTEUSRASITUKSEN TEKIJÄT YLÄPOHJARAKENTEES SA

Homekasvuston kehittymisen sekä rakenteellisten vaurioitumisen kannalta kriittinen tekijä on kosteuden tiivistyminen ja etenkin keski- ja pitkäaikainen varastoituminen rakenteissa.

Rakenteen ollessa sateelta yms. nestemäisen veden lähteiltä suojattu pääasialliset vaaratekijät ovat

- normaalin kosteustuoton pitkäaikainen varastoituminen rakenteessa tuuletuksen ollessa jatkuvasti riittämätön
- asennustyön aikana rakenteeseen päätyneet kosteus nestemäisessä muodossa

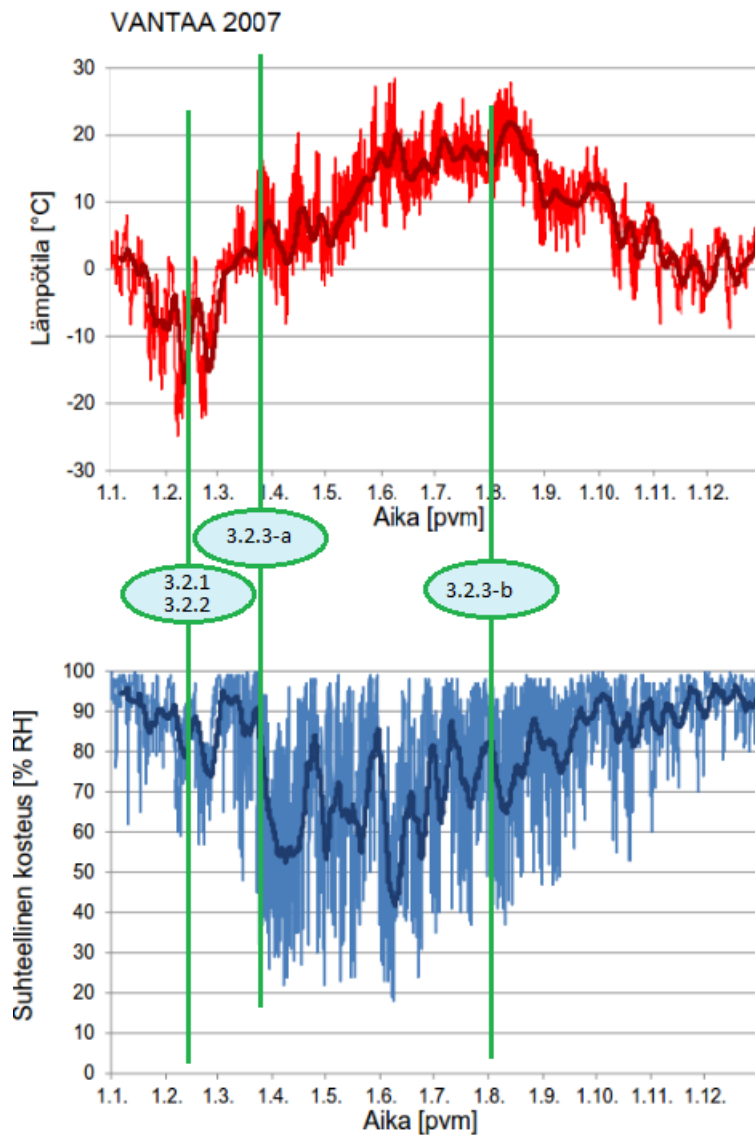
- yläpohjan kosteusvuodot
- ulkoilman vesihöyryn tiivistyminen rakenteeseen eri tilanteissa.

Alla kuvataan mahdolliset kosteusriskit ja niihin liittyvien kriittisten olosuhteiden sekä ratkaisujen/varoitustoimenpiteiden kuvaus. Käyttötilanteessa mahdollisesti ilmestyvien vaaratekijöiden yhdistelmät otetaan myös huomioon.

Tuuletusraon alapuolella sijaitsevat asunnot sekä hissi ja talotekniikkatilat. Sisäilman lämpötilan osalta näiden talo-osien olosuhteet ovat vastaavia. Kosteuslisän arvo vaihtelee tilan käyttötarkoituksen mukaan.

3.1 Kriittisten olosuhteiden valinta

Kriittiset tekijät määriteltiin RIL 255-1-2014 3.2.4:n mukaan. Laskennassa määriteltiin eri tilanteiden kriittiset ulko- ja sisäolosuhteiden kombinaatiot ja vertailtiin niiden todennäköisyyden Vantaa-2007-testivuoden tietojen perusteella (ks. Kuva 3 alla). Kriittisten olosuhdekombinaatioiden perusteella määriteltiin tuuletusraon riittävät ilmanvaihtuvuuden arvot.



Kuva 3. Tarkastelussa käytetyt sääolosuhteiden tapaukset Vantaa 2007-säädatakannasta:

- (3.2.1) Normaalikäytön aikainen kosteusrasitus
- (3.2.2) Rakennusvirheen seuraamukset
- (3.2.3) Ulkoilma kosteuslähteenä

3.2 Kosteuslähteet

3.2.1 Normaalikäytön aikainen kosteustuotto

Käyttötilanteen tavanomainen kosteusrasitus on vesihöyryn siirtyminen sisätilasta ulospäin diffuusiona. Tällöin oletetaan, että höyrinsulkukerrokset ovat toteutettu virheettää ja höyrinsulun ulkopuolisissa rakenteissa ei ole kosteuslähteitä. Tilanteissa, joissa kosteuslähde sijaitsee höyrinsulun yläpuolella, sen vaikutus on määräävä ja kosteusliikettä sisätilasta höyrinsulun läpi ei tapahdu.

Käyttötilanteen tavanomaisen kosteusrasituksen äärimmäistapaus on pakkaskeli, jolloin ulkoilman vesihöyrypitoisuus on vähäinen ja näin vesihöyryn osapaine-ero on suurimmillaan. Käyttötilanteen rasitus voi kasvaa asukkaiden toiminnan myötä. Tässä yhteydessä sisäilman olosuhteina valittiin seuraavasti:

- $T_s = 22\text{C}$ on sisäilman lämpötila
- $RH_s = 50\%$ on voimakkaan kosteuslähteen, esim. ilmakehän kostuttimen avulla, saavutettu sisäilman suhteellinen kosteus
- $v_{s_a} = 9,7 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ on sisäilman vesihöyrypitoisuus asuntojen puolella
- v_{s_tekn} on sisäilman vesihöyrypitoisuus teknisen tilan puolella, joka määräytyy ulkoilman kosteuspitoisuuden ja RIL 255-1-2014:n kuvan 2.9 mukaisen kosteuslisän ($3 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$) mukaan.

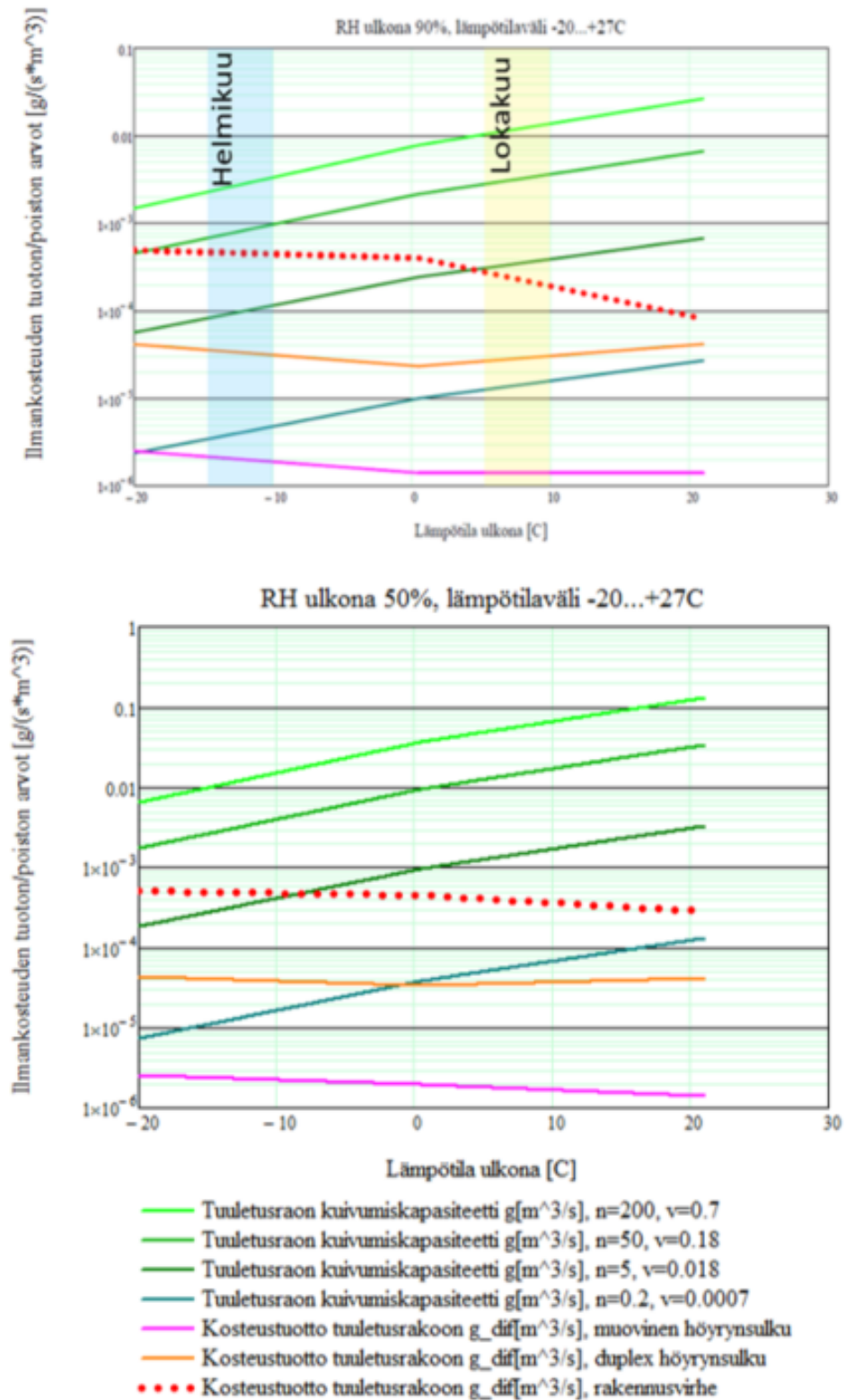
Ulkoilman olosuhteet määritellään Vantaa-2007-testivuoden helmikuun tilastodatan perusteella:

- $T_u = -20\text{C}$ on ulkolämpötila
- $RH_u = 90 \%$ on ulkoilman suhteellinen kosteus
- $v_u = 0,835 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ on ulkoilman vesihöyrypitoisuus.

Normaalikäytön tarkastelussa vertailtiin mm. muovisen höyrynsulun ja Isover Duplex -höyrynsulun vaikutukset. Isover Duplexin käytöllä ei ole normaalikäytön tilanteessa positiivista merkitystä. Koska sen vesihöyryvastus laskee RH:n kasvaessa, tuuletusrakoon voi esim. tutkitussa normaalikäytön äärimmäistilanteessa ($RH_s = 50\%$) diffundoitua talven aikana likaa kosteutta. Tämä liiallinen kosteus kondensoituu ilmasulkupaperin alapintaan, mikäli ilmasulkupaperia käytetään rakenteessa.

Mikäli rakenteessa ei käytetä ilmasulkupaperia eristekerroksen ja tuuletusraon rajan tuntumassa, Isover Duplexin käyttö on turvallinen tutkitussa normaalikäytön äärimmäistilanteessa ($RH_s = 50 \%$).

Normaalikäytön tapauksessa riittävä ilmanvaihtuvuus raossa eri ulko-olosuhteissa on esitetty ao. kuvassa. Kuva perustuu liitteessä 2 esitettyyn laskentaan.



Kuva 4. Kosteustuotto tuuletustilaan ulkoilman RH:n ollessa 90% ja 50% ja tuuletustilan kuivumiskapasiteetti eri ilmanvaihtoluvuilla. $T_s=22\text{C}$. Kosteuslisä $5\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ tai $\text{RH}_s=50\%$, suurempi näistä.

3.2.2 Rakennusvirhe

Rakennusvirheen seuraamuksena kosteuden oletettiin kertyvän nestemäisessä muodossa höyrönsulun päällä. Tällöin kuivuminen käytännössä tapahtuu molempiin suuntiin. Rakennusvirheen vaikutukset tutkittiin valitsemalla samat olosuhteet kuin normaaliikäytön tapauksessa:

- $T_s = 22\text{C}$ on sisäilman lämpötila
- $RH_s = 50\%$ on voimakkaan kosteuslähteen, esim. ilmastokonein avulla, saavutettu sisäilman suhteellinen kosteus
- $v_{s,a} = 9,7 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ on sisäilman vesihöyrörypitoisuus asuntojen puolella
- $v_{s,tekn}$ on sisäilman vesihöyrörypitoisuus teknisen tilan puolella, joka määräytyy ulkoilman kosteuspitoisuuden ja RIL 255-1-2014 kuvan 2.9 mukaisen kosteuslisän ($3 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$) mukaan

Ulkoilman olosuhteet määritellään Vantaa-2007 testivuoden helmikuun tilastodatan perusteella:

- $T_u = -20\text{C}$ on ulkolämpötila
- $RH_u = 95 \%$ on ulkoilman suhteellinen kosteus.

Rakennusvirheen tapauksessa höyrönsulun ominaisuudet eivät vaikuta tuuletusrakoon diffuusiolla pääsevän vesihöyrön määrään. Kuitenkin höyrönsulun valinnalla voidaan vaikuttaa höyrönsulun päällä olevan kosteuden kuivumisen nopeuteen. Tarkasteltavan rakenteen tapauksessa Isover Duplexin kyky eliminoida rakennusvirheen seuraamukset siirtämällä kosteus lämpimään tilaan on rajoitettu, koska ko. materiaalin lisäksi höyrönsulkuna toimii 25 mm:n LVL. Kuivumisen nopeus kasvaa kuitenkin n. 25–35 % sisäilman olosuhteista riippuen.

Taulukko 1. Rakennusvirheen kuivumiskapasiteetti kuukaudessa neljänmetrin alueelta, ulkosääolosuhteet 2.2.1. Tuuletusraon kuivumiskapasiteetti riittävä siihen diffuusiolla päässeeseen kosteuden poiskuljetukseen.

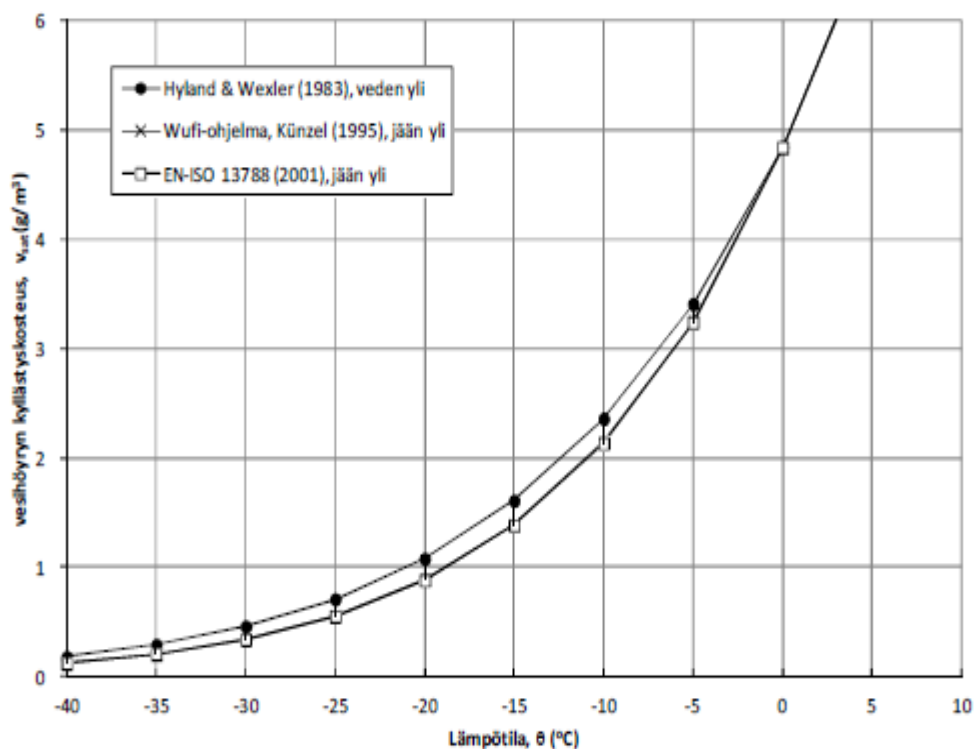
Muovinen höyrönsulku, asunnot ja tekninen tila	Isover Duplex, tekn. tila	Isover Duplex, asunnot RH50 %	Isover Duplex, asunnot RH30 % (kosteuslisä $5 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$)
1.25 ℓ	1.8 ℓ	1.55 ℓ	1.7 ℓ

Tuuletusraon tarvittavan kuivumiskapasiteetin kannalta riittävä ilmanvaihtuvuus raossa eri ulko-olosuhteissa on esitetty kuvassa. Tiedot perustuvat liitteessä 2 esitettyyn laskentaan.

3.2.3 Ulkoilma kosteuden lähteenä

Ulkoilma voi toimia kosteuslähteenä tapauksissa 3.2.3-a ja 3.2.3-b. Näitä tapauksia yhdistää se, että tuuletusraon ilmanvaihdon tehostamisen myötä rakenteisiin kohdistuva kosteusrasitus kasvaa.

Tapauksessa 3.2.3-a tarkastellaan vastasäteilyn vaikutuksia talvenajan kirkkaina öinä. Tällöin kattopinnan viilentäminen ulkoilman lämpötilaa alemmaksi voi aiheuttaa sen, että ulkoilman kosteus tiivistyy tuuletusraon pintoihin. Talvenajan vastasäteilyn tapauksessa tilanteen vaikutusta ei voida arvioida yksittäiseksi tilanteeksi, minkä vaikutus eliminoidaan päivänäkaisen tuuletuksen myötä. Sen sijaan kosteusrasitus määräytyy kaikkien pakkasjakson kirkkaiden öiden yhteenlaskettuna vaikutuksena, koska kondensoitunut kosteus jäätyy tuuletusraon pintoihin. Tässä on huomioitava, että veden kemiallisista ominaisuuksista johtuen vesihöyry härmistyy helpommin jääkiteisiin kuin tiivistyy pisaroihin. Tämän takia veden kyllästyskosteus nollan alapuolisissa lämpötiloissa on veden suhteen suurempi kuin jään suhteen. (Mäkitalo 2012, 26.)



Kuva 5. Vesihöyryn kyllästyspitoisuuden muuttuminen lämpötilan funktiona veden ja jään suhteen (Vinha 2007).

Pakkasjakson päättyessä ja ulkolämpötilan noustessa yli 0 C:n tuuletusraossa kerääntynyt kosteus voi rakenneratkaisusta riippuen

- kerääntyä alakaton pinnalla, josta poistuminen määräytyy tuuletusraon kuivumiskapasiteetin ja höyrystymisen nopeuden mukaan
- päästä eristetilaan, jolloin siirretään tilanteeseen 3.2.2.

Tapauksen 3.2.3-a tutkimuksessa käytettiin tuulen nopeuden arvona $U=1$ m/s. Selvitte-
lyn tulokset on esitetty rakenneosakohtaisesti luvussa 5.

Tapauksessa 3.2.3-b tarkastellaan asuntokohtaisen ilmastoinnin mahdollisia vaikutuksia
kosteassa kesäilmastossa. Tällöin asunnon sisäilmaa on viilennetty sen verran, että il-
man kyllästymisvesihöyrypitoisuus höyrynsulun yläpinnan tuntumassa laskee ulkoilman
vesihöyrypitoisuuden alemmaksi. Vantaa-2007-testivuoden tilastoissa tällaisen tilan-
teen vaikutuksen tärkeys on marginaalinen, koska ulkolämpötila ei nouse yli 30 C:n ja
näin riittävän korkeita ulkoilman kosteuspitoisuuksia ei saavuteta.

3.2.4 Konvektion (höyrynsulun epäjatkuvuuden) aiheuttama kosteusrasitus

Konvektion aiheuttama kosteusrasitus on suurimmillaan silloin, kun paine-ero tiiviin ra-
kenteen eri puolilla on suuri.

Höyrynsulun vahingoittuessa asuntojen puolella voidaan varautua suuren kosteusvahin-
gon varalta varmistamalla, että tuuletusraon koneellisen tuuletuksen aiheuttama ali-
paine on pienempi kuin asuntokohtaisen ilmanvaihdon suunniteltu alipaine. Asuntokoh-
taisen LTO:n painesuhteet on tällöin selvitettävä erikseen.

Konvektion aiheuttaman kosteusvahingon riski on näin ollen suurimmillaan teknisen til-
lan puolella. Vaikka teknisen tilan kosteuslisä on pienempi, korkean tilan katon tuntu-
massa ilmestävän suuren ylipaineen vaikutuksesta ilmavirta höyrynsulun epäjatkuvu-
den kohdalla voi olla varsin suuri. Tuuletusraon alipaineistaminen voi kasvattaa paine-
eroa entisestään.

Konvektion aiheuttaman kosteusvahingon mittausolosuhteet määritellään tapauksen
3.2.1 mukaan:

- $T_s = 22$ C on sisäilman lämpötila
- $RH_{s_tekn} = 50$ %
- $v_{s_a} = 9,7 \frac{g}{m^3}$ on sisäilman vesihöyrypitoisuus asuntojen puolella
- v_{s_tekn} on sisäilman vesihöyrypitoisuus teknisen tilan puolella, joka
määräytyy ulkoilman kosteuspitoisuuden ja RIL 255-1-2014:n kuvan
2.9 mukaisen kosteuslisän ($3 \frac{g}{m^3}$) mukaan.

Ulkoilman olosuhteet määritellään Vantaa-2007-testivuoden helmikuun tilastodatan
perusteella:

- $T_u = -20$ C on ulkolämpötila
- $RH_u = 95$ % on ulkoilman suhteellinen kosteus
- $v_u = 0,835 \frac{g}{m^3}$ on ulkoilman vesihöyrypitoisuus.

Talotekniikkatilan puolella konvektion aiheuttama kosteustuotto ylittää painovoimaisen
tuuletuksen kapasiteettia. Etenkin talotekniikka-/hissikuilun puolella höyrynsulun jatku-
vuus on ehdottomasti varmistettava työmaateknisin keinoin.

4 RAKENTEEN TUULETUKSEN ENERGIALÄHTEET JA PROSESSIT

Tässä luvussa esitetyn yläpohjarakenteen tuulettavuuden arvioinnin perusteita kuvataan jakamalla osatekijät kahteen ryhmään: energialähteet ja energiaa kuluttavat prosessit.

4.1 Säteily

Säteilyssä energia siirtyy sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä valon nopeudella. Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollan yläpuolella, emittoivat säteilyä. Energian siirtyminen säteilynä ei vaadi väliaineen läsnäoloa. Eniten säteilyä emittoinns. musta kappale, jonka kokonaissäteily on (Björkholtz 1997, 12):

$$Q_m = \sigma T^4 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (4)$$

Tässä:

- $\sigma = 5,76 * 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$ on Stefan-Boltzmannin vakio, ja
- T on kappaleen lämpötila [K].

Todellisten pintojen ominaisuudet poikkeavat mustan kappaleen ominaisuuksista. Emissiviteetti ε kuvaa kappaleen säteilytehon Q ja mustan kappaleen säteilytehon Q_m suhdetta:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_m} \quad (5)$$

Tämän tutkimuksen yhteydessä käytettiin puupintojen emissiviteettinä $\varepsilon_p = 0,85$ ja bitumikermin emissiviteettinä $\varepsilon_k = 0,93$.

4.1.1 Pitkäaaltoinen säteily

Pitkäaaltoisen säteilyn myötä energia siirtyy rakenteen sisällä, kuten tuuletusraon pintojen välisessä tilassa sekä eristeessä. Kahden samansuuntaisten pintojen välissä pitkäaaltoisen säteilyn myötä tapahtuvan energiavirtauksen lämmönsiirtokerroin lasketaan kaavalla (Hagentoft 2001, 52)

$$a_r = 4\varepsilon_{12}\sigma\bar{T}_{1,2}^3 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}\right] \quad (6)$$

$$\frac{1}{\varepsilon_{12}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1$$

$$\bar{T}_{1,2} = \frac{T_1 + T_2}{2} \text{ [K]}$$

Tässä:

- ε_{12} on pintojen emissiviteeteistä riippuva kerroin, ja
- T_1 ja T_2 ovat pintojen lämpötilat [K].

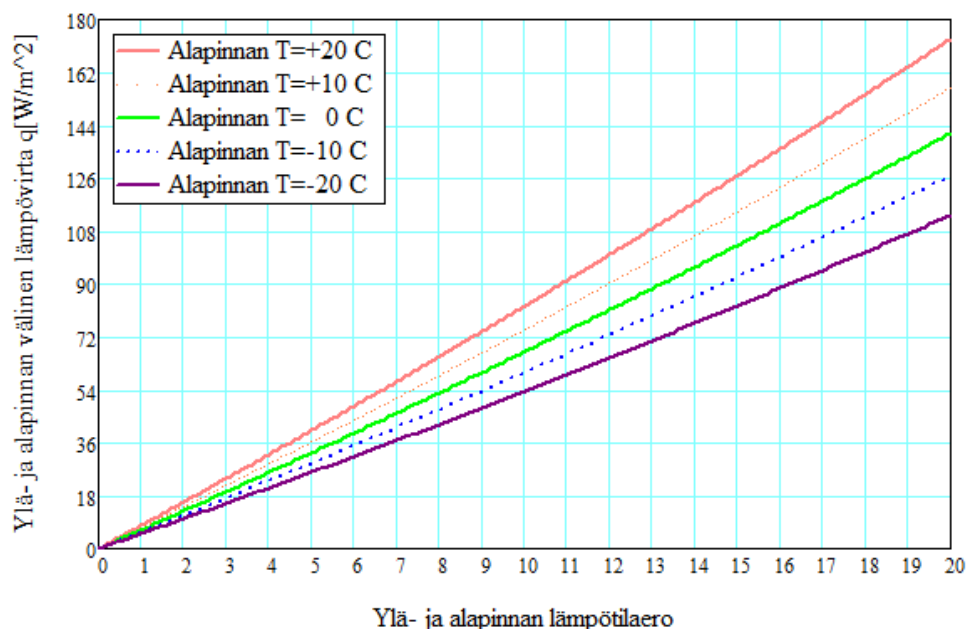
Tuuletusraon vaakasuuntaisten ylä- ja alapintojen välisen lämpövirtauksen arvo kasvaa suoran auringonsäteilyn ajanjaksoina. Suoran auringonsäteilyn jaksot eivät kuitenkaan ole kriittisiä tuuletusraon toimivuuden kannalta.

Hajasäteilyn (pilvisuus) ja yön aikoina tämän mekanismin vaikutus tuuletusraon toimintaan on vähäinen lämpötilaeron ollessa pieni.

Olettaen normaalivektori $\hat{n} = 1$ voidaan kahden pintojen välinen lämpövirta arvioida kaavasta (Hagentoft 2001, 246):

$$q_r = a_r * (T_1 - T_2) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (7)$$

Pitkäaaltoisen säteilyn lämpövirran suuruuden riippuvuus alapinnan lämpötilasta ja pintojen välisestä lämpötilaerosta on esitetty ao. kuviossa (perustuu liitteessä 1 esitettyyn Mathcad-laskentaan).



Kuva 6. Tuuletusraon ylä- ja alapinnan välinen pitkäaaltoisen säteilyn lämpövirta pintalämpötilojen funktiona.

4.1.2 Auringon säteily (lyhytaaltainen säteily)

Suora auringonsäteily ja pilvisinä päivinä vallitseva hajasäteily on olennaisin tekijä yläpohjarakenteen painovoimaisen tuulettuvuuden varmistamisessa. Auringon lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokerroin (Hagentoft 2001, 46):

$$\alpha_{sol} = \varepsilon \quad (8)$$

Absorboitu auringonsäteilyn lämpövirta lasketaan kaavalla (Hagentoft 2001, 46)

$$q_{\text{sol}}(t) = \alpha_{\text{sol}} * I^0_{\text{sol}}(t) * \cos(\theta(t)) \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (9)$$

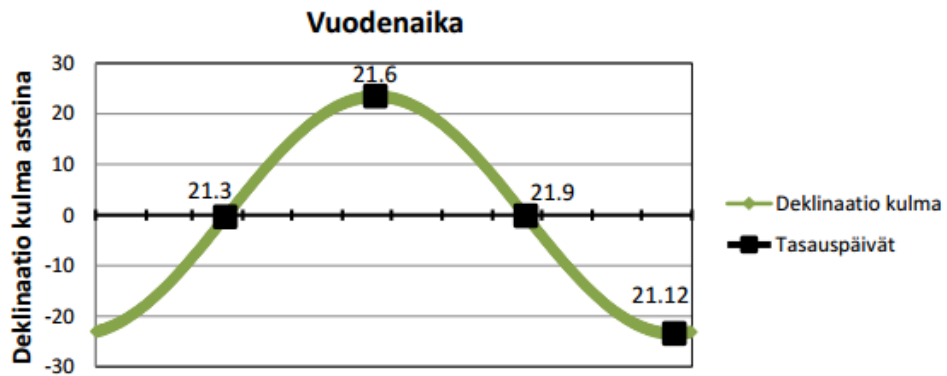
Tässä:

- $I^0_{\text{sol}} \text{ [W/m}^2\text{]}$ on auringon säteilyteho säteilysuuntaan kohtisuoralla pinnalla, ja
- $\theta = \alpha + \beta \text{ [ast]}$ on sädesuunnan ja pinnan välinen kulma, missä
- $\beta \text{ [ast]}$ on kattokaltevuus (pinnan kaltevuus), ja
- $\alpha(t)$ on sädesuunta kellonajan funktiona.

$$\alpha(t) = \text{asin}(\sin\phi * \sin\delta + \cos\phi * \cos\delta * \cos(15 * (t - 12))) \text{ [ast]} \quad (10)$$

Sädesuunnan kaavassa:

- $\phi \text{ [ast]}$ on paikkakunnan leveyspiiri (Helsingissä $\phi = 60,18^\circ$),
- $\delta \text{ [ast]}$ on auringon deklinaatiokulma, joka vaihtelee arvojen $23,5^\circ$ (kesäkuun 21. pv) ja $-23,5^\circ$ (joulukuun 21. pv) välissä ao. kuvion mukaisesti (Duffie et.al., 1991).



Kuva 7. Auringon deklinaatiokulma eri vuodenaikoina.

Comsol Multiphysics -sovelluksella voidaan suorittaa tarkastelut käyttäen ASRAE-tietokantaa. Helsingin seudulla käytetään silloin Vantaan sääaseman dataa. Auringon sijainti ja säteilyteho voidaan hakea tietokannasta kolmeulotteisia malleja käyttäen. Tällöin mallin ilmansuunnat on asetettava rakennuskohteen maatiieteellisen sijainnin mukaisesti.

Auringon säteilytehon ja sijainnin tietoja ei ole mahdollista käyttää 2-ulotteisessa mallissa. Mikäli käytössä on kaksiulotteinen malli tai halutaan tarkastella rakenteen toimivuus tietyissä kriittisissä olosuhteissa, voidaan määrittellä sääolosuhteet numeerisesti. Pilvisyys sekä muut ympäristön vaikutukset (mm. varjostus) voidaan myös määrittellä numeerisesti rakenteen pinnalla lisäehtoja käyttäen.

$$I^0_{\text{sol}}(I_0, t) = \begin{cases} 0, t < [t_{\text{nousu}}] \\ I_0 * \left[\frac{1 + \cos\left[2\pi \frac{t - t_{\text{keskipäivä}}}{t_{\text{sol}}}\right]}{2} \right], t_{\text{lasku}} > t > t_{\text{nousu}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \\ 0, t > [t_{\text{lasku}}] \end{cases} \quad (11)$$

Tässä:

- $I_0 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ on kalenteripäivän ja paikkakuntaakohtainen päivän auringonsäteilyn maksimiteho,
- $t = 0 \dots 24[h]$ on vuorokauden kellonaika
- $t_{\text{nousu}}, t_{\text{keskipäivä}}, t_{\text{lasku}} [h]$ vastaavasti auringon nousuhetki, keskipäivän ajankohta ja laskuhetki säätietokannasta,
- $t_{\text{sol}} [h]$ on auringonpaisteen aika tunnissa, $t_{\text{sol}} = t_{\text{lasku}} - t_{\text{nousu}}$.

Yo. kaava perustuu vuorokausilämpötilakuvaajaan (Hagentoft 2001, 13), joka kannattaa mainita tässä sääolosuhteiden mallinnuksen asiayhteydessä:

$$T_{\text{vuorokausi}} = T_{\text{kausi}} + \frac{dT}{2} * \cos\left(\frac{\pi(t_h - 12)}{24}\right) [K] \quad (12)$$

Tässä:

- t_h on tuntimäärä, $t_h = 0$ vastaa puoliyön aikaa,
- T_{kausi} on paikkakuntaakohtainen kauden keskilämpötila ja
- dT on ulkolämpötilan vuorokausivaihtelu.

Auringon säteilyn lämpöenergia tehostaa tuuletusraon toimintaa välittömästi sekä varastoituu rakenteissa, jolloin sen vaikutus säilyy tietyllä viiveellä varsinaisen vaikutusajan jälkeen. Tuuletusrakoa ympäröivien rakenteiden ja etenkin vesikatteen terminen diffusiviteetti vaikuttaa siis olennaisesti rakenteen toimintaan. Terminen diffusiviteetti kuvaa materiaalikerrosta läpäisevän ja siinä varastoituvan energian suhdetta:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} [m^2/s] \quad (13)$$

Tämän työn luvussa 5 kuvatun puurakenteisen yläpohjan tapauksessa rakenteiden terminen diffusiviteetin ansiosta lämpötilamuutokset tuuletusraossa ovat jonkin verran taasoittuneet, ja lähes 0-virtausjaksot ovat siirtyneet aikajanalla eteenpäin.

Kesän ajan ulkopuolella tuulettavuuden kannalta epäedullisin tilanne syntyy pilvisenä aamupäivänä klo 6–12. Tällöin edellisen päivän aikana varastoitunut energia on jo poistunut rakenteesta ja ulkoilma lämpiää kylmien rakenteiden ympäröimää tuuletusraon ilmaa nopeammin. Materiaalien lämpötekniset ominaisuudet kannattaa siis huomioida tietoisesti tuuletusraon virtauslaskelmissa.

Tarkastelumenetelmän valinnan kannalta voidaan todeta, että ajasta riippuvainen dynaamisen tarkastelun ja hetkellisen tilanteen tarkastelun erot ovat olennaisia. Tämän takia ainakin vuorokauden pituisen jakson kattava tarkastelu on tarpeellinen. Varmempi ratkaisu on käyttää kolmen vuorokauden pituiset tarkastelujaksot, koska ensimmäisen vuorokauden aikana mittaustuloksiin voi vaikuttaa alkuarvojen epätarkkuus (vrt. tämän työn luku 2).

4.2 Lämmön siirtyminen konvektiolla

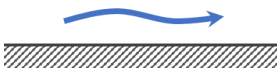
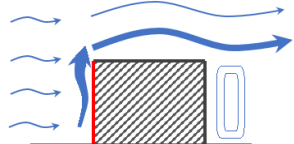
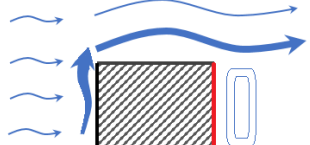
Konvektiolla tarkoitetaan täällä fluidin (ilman) ja kiinteän aineen välistä lämmön siirtoa, joka tapahtuu massavirran mukaan. Luonnollinen konvektio perustuu nostevoiman vaikutukseen. Pakotetun konvektion tapauksessa massavirtausta aiheuttavat ulkoiset voimat kuten tuuli tai koneellinen ilmanvaihto. Konvektion aiheuttamaa lämpövirtaa saadaan kaavasta (Hagentoft 2001, 43):

$$\vec{q}_{\text{konv}} = \alpha_{\text{konv}}(T_{\text{pinta}} - T_{\text{ilma}}) \quad (14)$$

Tässä:

- T_{pinta} [K] on pinnan lämpötila
- T_{ilma} [K] on ympäröivän ilman lämpötila
- α_{konv} on konvektiolämmönsiirron kerroin, joka muodostuu pinnan geometrian ja ilmavirran ominaisuuksien perusteella. Teoksessa (Hagentoft 2001, 43) kerroimen likimääräiset arvot on esitetty seuraavasti:

Taulukko 2. Konvektiolämmönsiirron kerroin ilmavirtauksen suunnan ja suuruuden (u) funktiona.

Arvo	Tapaus
$\alpha_{\text{konv}} = \begin{cases} 6 + 4u, & u \leq 5\text{m/s} \\ 7,41 * u^{0,78}, & u \geq 5\text{m/s} \end{cases}$	Pakotettu konvektio 
$\alpha_{\text{konv}} = 5 + 4,5u - 0,14u^2, \\ u \leq 10\text{m/s}$	Tuulen puoleinen ulkoseinä 
$\alpha_{\text{konv}} = 5 + 1,5u, \\ u \leq 8\text{m/s}$	Tuulesta suojattu ulkoseinä 

4.3 Ekvivalentti ulkolämpötila

Ulkopuolisiin pintoihin kohdistuvan säteilyn lämpötila voi poiketa ulkoilman lämpötilasta. Ulkopinnan lämpötilan T_{ue} laskelmissa käytetään ulkoilman lämpötilaa T_{u} ja taivaan lämpötilaa T_{r} . Niistä viimeinen on riippuvainen pinnan suuntauksesta, vuorokausiajasta sekä pilvisyydestä. Lähteessä (Hagentoft 2001, 54) esitetyt seuraavat taivaan lämpötilan kaavat korreloivat myös lähteessä (Björkholtz 1997, 31) esitetyn kaavion kanssa:

Taulukko 3. Taivaan lämpötilan laskukaavat

$T_r = T_u$	Pilvisuus
$T_r = 1.2T_u - 14$	Vaakapinnat, poutaa
$T_r = 1.1T_u - 5$	Pystypinnat, poutaa

Ulkopinnan ekvivalentti lämpötila T_{ue} määräytyy kaavasta (Björkholtz 1997, 31):

$$T_{ue}(t) = T_u(t) + \frac{q_{sol}(t) + q_{konv}(t)}{\alpha_{sol} + \alpha_{konv}} \quad [K] \quad (15)$$

4.4 Lämmön siirtyminen johtumisella

Edellisessä luvussa esitettiin jaksottaisten tilanteiden huomattava vaikutus etenkin yläpohjan tuuletusraon toimintaan. Tässä luvussa käsitellään lämmön johtumisen arvioinnin menetelmiä vuorokauden pituisessa, ajasta riippuvaisessa tarkastelussa. Koska olosuhteet vierekkäisissä kaistoissa ovat samanlaiset, voidaan keskittyä pääosalta yksiulotteisen ja nurkka-alueilla kaksiulotteisen lämpöliikkeen tarkasteluun. Koska lämmön varastoituminen aineessa on sen massan funktio $\sim \rho V$, kolmeulotteisen tiilielementin tapaus on tässä luontevin esimerkki.

Olkkoon dx , dy ja dz elementin sivumitat ja dV sen tilavuus. Tarkastelun kohteena olevan tiilielementin mitat valitaan siis niin, että olosuhteet sen sisällä sekä materiaaliominaisuudet ovat isotrooppiset. Näin lämpöenergian diffuusiovirtaus elementin läpi muodostuu Fourierin lain mukaan eli:

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T = -\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad \left[\frac{W}{m^2}\right] \quad (16)$$

Olettaen että tutkittavaan elementtiin ei ole erikseen määrätty lämmitys- tai jäähdytyslähteitä, siihen tulevan ja siitä poistuvan energiavirran ero Q_{net} on yhtä suuri kuin elementissä saman ajanjakson sisällä varastoituvan energian määrä Q_{var} :

$$Q_{net} = \nabla \vec{q} * dV = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) dV + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) dV + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) dV \quad [W],$$

$$Q_{var}(t) = mc \frac{\partial T}{\partial t} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV \quad [W],$$

$$Q_{net} = Q_{var}$$

$$-\nabla \vec{q} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x}, \frac{\partial q_y}{\partial y}, \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad \left[\frac{W}{m^2 * m}\right], \quad (17)$$

Tässä c on aineen lämpökapasiteetti ja ρ sen tiheys; m on elementin massa.

Yhden akselin suunnassa elementtiin tulevan ja poistuvan energian ero määräytyy kaavasta:

$$Q_{i,\text{net}}^k = Q_i^k - Q_{i+1}^k \text{ [W]} \quad (18)$$

Tässä

- Q_i^k on elementistä (i-1) elementtiin (i) siirtynyt lämpömäärä,
- Q_{i+1}^k on elementistä (i) elementtiin (i+1) siirtynyt lämpömäärä,
- $k = x, y, z$
- i on elementin indeksi kyseisen akselin suunnassa.

Jos elementtiin ei ole erikseen määrätty lämmitys- tai jäähdytyslähteitä,

$$Q_i^k = K_i(T_i - T_{i-1}) \text{ [W]} \quad (19)$$

missä kahden elementin välinen lämmönjohtavuus on:

$$K_i = \frac{1}{\lambda_i \frac{dk_i}{2} + \lambda_{i-1} \frac{dk_{i-1}}{2}} \quad (20)$$

tai, kun elementin r-pinnalla sijaitsee alueen raja:

$$K_i = \frac{1}{\lambda_i \frac{dk_i}{2} + R_{\text{pinta}}} \quad (21)$$

Virtausalueen reunaehdot voidaan määrittellä seuraavasti:

- Dirichlet'n reunaehto määrää pinnalle lämpötilan $T_s = T(x, y, z, t)$
- Neumannin reunaehto määrää pinnalle lämpövirran $q_x n_x + q_y n_y + q_z n_z = -q_s$
- Cauchyn reunaehto määrää pinnalle konvektiolämpövirran $q_x n_x + q_y n_y + q_z n_z = \alpha_{\text{konv}}(T_{\text{pinta}} - T_{\text{ilma}})$

Tässä $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)^T$ on kyseisen ulkopinnan ulkoapäin suunnattu normaalivektori.

4.5 Nostevoima

Arkimedeen lain mukaan fluidiin (ilmaan, veteen, jne.) upotettuun kappaleeseen kohdistuu ylöspäin vaikuttava voima eli noste:

$$F_{\text{noste}} = \rho_f g V \quad (22)$$

Tässä:

- ρ_f on ympäröivän fluidin tiheys
- g on vapaan putoamisen kiihtyvyyttä
- V on kappaleen tilavuus.

Vastakkaissuunnassa eli alaspäin vaikuttava voima on painovoima. Jos fluidiin upotettu kappale ei ole muuten tuettu, sen liikkumisen kiihtyvyyttä määräytyy kaavan mukaan (positiivinen suunta alaspäin):

$$\vec{a}_{\text{kappale}} = \frac{(\rho_k - \rho_f) \vec{g} V}{m_k} = \vec{g} \frac{(\rho_k - \rho_f)}{\rho_k} \quad (23)$$

Tässä m_k ja ρ_k ovat vastaavasti kappaleen massa ja sen tiheys.

Kun $\rho_f \ll \rho_k$, nostevoima ei vaikuta huomattavasti kappaleen liikkumiseen, kuten esimerkiksi Galilein kokeissa. Muulloin nostevoiman vaikutus voi olla huomattava, kuten kuumailmapallon tapauksessa.

Tutkittavassa tilanteessa eli ilmaraossa sekä kappaletta että sen ympäröivää fluidia edustaa sama aines eli $\rho_f \approx \rho_k = \rho_{\text{ilma}}(T, v)$. Tiheyden muutosten tekijät ovat jatkuvasti muuttuvat lämpötilagradientti ja ilman vesihöyrypitoisuus. Tässä työssä keskitytään lämpötilagradientin vaikutuksiin ja vesihöyrypitoisuuden muutokset jätetään tois-taiseksi huomiotta.

Lähteen (Elmarsson ja Nevander 2006, 73.11) mukaan nostevoiman luomaa paine-eroa tuuletusraossa voidaan arvioida kaavalla

$$\Delta p \approx 0,043 * \Delta T * h \quad (24)$$

Tässä:

- h [m] on rakenteen tulo- ja poistoilma-aukkojen korkeusero
- ΔT [K] on ilman lämpötilaero rakenteen ylä- ja poistoilma-aukkojen kohdilla.

Kaavaa sovelletaan simulointitulosten vertailussa.

4.6 Ilmanvirtaukset rakenteen sisällä

Yläpohjan tuuletusraon toiminnan arviointia vaikeuttaa se, että mm. jyrkkien dimensiomuutosten ansiosta rakenteen eri osastoissa havaitaan samanaikaisesti eri virtausmuodot. Lisäksi erityisesti dynaamisessa laskelmassa ilmestyvät jaksot, jolloin faasimuutokset havaitaan yhden osaston sisällä. Tämä kasvattaa laskentavirhemahdollisuuksia ja vaatii laskentatehon kannalta raskaampien menetelmien käyttöä. Näin ollen rakennesuunnittelijoiden tietämyksen parantaminen ja rakennetekninen optimointi ovat tasakattojen yläpohjarakenteiden tapauksessa suurin käyttämätön resurssi.

Tuuletusraossa virtaava ilmakehän ilma, kuten muut nesteet ja kaasut, on fluidi. Fluidin määräävä ominaisuus on heikot molekyylien väliset sidokset. Fluidien käyttäytymisen problematiikalla on yhteisiä piirteitä kiinteän aineen lujuusopillisen käyttäytymisen kanssa. Sekä fluidissa että kiinteässä aineessa ilmenee, ulkoisen voiman vaikutuksesta, jännityksiä ja siirtymiä. Tässä luvussa käytetyillä virtausdynamiikan suureilla löytyvätkin analogit kiinteään aineen elastisen alueen statiikasta (Zienkiewicz ja Taylor 2000, 1–9):

- $\vec{U} = (u, v, w) = u_i$, missä $i = 1, 2, 3$ [m/s] on fluidin virtausnopeuden vektori. Virtausnopeuden vektoria vastaa statiikan ongelmassa siirtymävektori \vec{U} .
- \vec{S} on fluidin venymän muutosnopeuden vektori, joka vastaa statiikan ongelmassa käytettävää infinitesimaalin venymän vektoria.

- $\mu \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}} \right]$ on fluidin dynaaminen viskositeetti, joka kuvaa fluidin kykyä vastustaa virtaamista. Kaavoissa käytetään myös suhdetta $\nu = \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$, jota kutsutaan fluidin kinemaattiseksi viskositeetiksi. Fluidin dynaaminen viskositeetti vastaa statiikan ongelmissa käytettävää leikkausmoduulia μ , joka kuvaa leikkausjännityksen ja leikkausvenymän suhdetta.
- $\kappa \text{ [Pa]}$ on fluidin volumetrinen viskositeetti, jonka analogia statiikan ongelmissa on puristuskerroin K .

Olennainen ero perustuu taas siihen, että – toisin kuin kiinteän aineen elastisen alueen mekaniikassa – virtaavassa fluidissa tangentiaaliset leikkausjännitykset ovat venymän muutosnopeuden funktio (Zienkiewich ja Taylor 2000, 5-9 sekä Durbin ja Medic 2013, 9):

$$\tau_{ij} = \mu \left[\nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T + \delta_{ij} \frac{2}{3} \nabla \vec{U} \right] \quad (25)$$

Tässä $\nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T = \vec{S}$ on yllä mainittu fluidin venymän muutosnopeuden vektori.

Kokonaisjännitys eli Cauchyn jännitys esitetään siten paineen ja tangentiaalisen jännityksen summana:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (26)$$

Tässä δ_{ij} on Kroneckerin delta, joka on tässä yhteydessä sama kuin yksikkömatriisi I .

Käytännön sovelluksissa tämän eron vaikutukset havaitaan siten, että fluidin mekaaniset ja lämpötekniset ominaisuudet muuttuvat porrasmaisesti sen virtausnopeuden funktiona.

Fluidien virtausta kuvaa Navierin-Stokesin yhtälöryhmä. Sen yhtälöt pohjautuvat energia-, momentti- ja massasäilymisperiaatteisiin. Massan säilymisperiaatteen mukaan fluidin tiheyden muutosnopeus infinitesimaalin pienessä tilavuudessa on yhtä suuri kuin massavirtaus samassa tilavuudessa (Zienkiewich ja Taylor 2000, 8):

$$-\nabla(\rho \vec{U}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (27)$$

Momentin säilymisperiaatetta esittävä yhtälö kuvaa fluidiosasen liikemäärän riippuvuuden paineen ja fluidin sisäisten viskoosien voimien vaihteluista (Zienkiewich ja Taylor 2000, 9):

$$\underbrace{\frac{\partial \Phi}{\partial t}}_1 + \underbrace{\nabla \mathbf{F}}_2 + \underbrace{\nabla \mathbf{G}}_3 + \underbrace{\mathbf{Q}}_4 = \mathbf{0} \quad (28a)$$

Cmsol Multiphysics -simulointiprosessien kuvauksessa yo. kaava on esitetty yksityiskohtaisesti (Cmsol Multiphysics Cyclopedia):

$$\rho \underbrace{\left(\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U} * \nabla \vec{U} \right)}_1 = \underbrace{-\nabla p}_2 + \underbrace{\nabla \left(\mu (\nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \vec{U})_I \right)}_3 + \underbrace{F}_4 \quad (28b)$$

Tässä:

- tekijä (1) kuvaa hitausvoimien vaikutusta ja $\sim (\rho, \vec{U})$
- tekijä (2) kuvaa paineen vaikutusta ja $\sim (\rho, p, \vec{U})$
- tekijä (3) kuvaa viskoosien voimien vaikutusta ja $\sim (\tau)$
- tekijä (4) kuvaa nostevoiman $\rho \vec{g}$ sekä muiden ulkoisten voimien vaikutusta.

Lähteessä (Durbin ja Medic 2013, 8) on esitetty, miten momentin säilymisen yhtälöä voidaan sieventää vastaamaan dynamiikan peruslakia tilavuusmuodossa:

$$\rho \frac{D\vec{U}}{Dt} = \nabla \sigma \left[\frac{N}{m^3} \right] \quad (28c)$$

Energian säilymisperiaatetta esittää yhtälö (Lewis et. al. 2004, 183):

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{U} * \nabla T = a \nabla^2 T \quad (29)$$

Tässä $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ on osiossa 4.1 mainittu aineen termien diffusiviteetti.

Fluidin virtausta kuvaa siis kolmen yhtälön ryhmä, jossa on viisi muuttujaa. Niistä U , p ja T ovat "aidot" muuttujat sekä ρ ja μ ovat käytännössä lämpötilan funktiot, joiden muutokset tekevät ongelmasta yhä voimakkaammin epälineaarisen. Eri tarkkuustasot ja oletukset sovelletaan, jotta laskennat voitaisiin suorittaa mahdollisimman tehokkaasti. Tällöin keskinäisesti riippuvaisten muuttujien määrä Navierin-Stokesin yhtälöissä pienenee ja laskenta-aikaa voidaan supistaa. Alla esitetään approksimaatiotasot niiden käyttämän laskutehon järjestyksessä.

Virtauksen voidaan olettaa olevan kokoonpuristamaton. Tämän ehtona on, että tiheyden muutos paineen muutoksen johdosta on niin pieni, että tiheyden voitaisiin olettaa olevan vakio eli $\Delta \rho \ll \rho_0$. Lisäksi virtauksen pitää olla isoterminen. Näillä ehdoilla voidaan hyvin kustannustehokkaasti mallintaa "ryömivät" ja laminaariset virtaukset.

Seuraavaa approksimaatiotasoa edustaa lievästi kokoonpuristuva virtaus. Sitä käytetään, kun nostevoimasta muodostuu virtauksen energiatasapainon kannalta olennainen tekijä, mutta tiheyden muutokset ovat riittävän pieniä eivätkä muuten vaikuta virtauskenttään. Tällöin sovelletaan ns. Boussinesquin approksimaatiota ja oletetaan aineen tiheyden olevan vakio koko yhtälössä nostevoimaa kuvaavaa jäsentä lukuun ottamatta. Lievästi kokoonpuristuvaa virtausmallia sovelletaan usein rakennusfysikaalisissa ongelmassa, mm. luonnollisen ilmanvaihdon simuloinneissa sekä laminaarisella että turbulenssilla alueella. Tämä approksimaatiotaso astuu voimaan, kun tiheyden muutoksia paineen funktiona ei voida enää siivuttaa, ja/tai kun virtaus ei ole isoterminen. Soveltuvuuden ehtona on, että Machin luku $M < 0.3$.

RANS-malleja sovelletaan turbulenssin ilmavirtauksen laskelmissa. Turbulenssin virtauksen luonteesta johtuen mielivaltaiset pienehköt virtaussuunnan ja paineen muutokset tapahtuvat erittäin nopeasti. Näiden tarkka mallintaminen on laskutehon kannalta epäedullinen. Ratkaisuna käytetään funktion tasoitusta, jolloin tarkkojen arvojen sijaan käytetään tietyn aikavälin keskiarvoja. RANS-tasointa voidaan suorittaa usealla eri tarkkuustasolla ja oikean mallin valinnan on vastattava tutkittavan tilanteen luonnetta. Puhtaasti turbulenssien virtausten simuloinneissa voidaan laskutehoa säästää käyttämällä $k - \varepsilon$ -perusmallia. Mallin avulla pyritään ennustaa dynaamisen viskositeetin $\nu = \mu/\rho$ jakautumista mallintamalla kineettisen energian k ja sen hajauttamisnopeuden ε alueellista ja ajallista jakautumista (Durbin ja Petterson 2010, 16, 122–123). Laskentaa kevennetään mallintamalla kanavan seinämien vieressä tapahtuva virtaus tilastollisen funktion avulla. Tilastollisen funktion käyttö esittää lisävaatimukset virtausalueen elementtijaolle. Seinämän viereisen elementin koon on oltava pienempi kuin funktion kattaman kerroksen paksuus. Seuraavat ehdot tulevat näin voimaan:

$$\delta < \frac{L}{\sqrt{\text{Re}}} \text{ ja } \delta < \frac{L}{\sqrt[4]{\text{Ra}}} \quad (30)$$

Tässä:

- δ [mm] on elementin minimikoko poikittaissuunnassa kanavan reunaan
- L [mm] on kanavan halkaisija ko. suunnassa
- Re on Reynoldsin luku
- Ra on Rayleighin luku.

Tuuletusraon virtausnopeuksissa (ja tavanomaisen työaseman laskuteholla) luotettavin malli on matalan Reynoldsin luvun $k - \varepsilon$ -malli ("kaksikerroksinen $k - \varepsilon$ -malli"), joka mahdollistaa sekä turbulenssin että laminaarisen alueen painehäviöiden huomioimisen (Karvinen 2016). Tällöin tilastollista funktiota ei käytetä täysin erikseen. Sen sijaan virtaus käsitellään yhtenäisenä ja tilastollinen funktio integroidaan $k - \varepsilon$ -mallin osana (Durbin ja Petterson 2010, 132–136). Kaksikerroksisen mallin vaatima laskuteho on kuitenkin huomattavan suurempi.

Täysin kokoonpuristuvan virtauksen määräävä tekijä on Machin luvun arvo $M > 0.3$. Tällöin paineen, lämpötilan ja tiheyden keskinäiset riippuvuudet ovat suuret ja täysi Navierin-Stokesin yhtälö on ratkaistava. RANS-malleja voidaan soveltaa myös korkean Machin luvun virtauksissa. Tämä virtaustyyppi ilmestyy kuitenkin rakennusfysikaalisissa sovelluksissa harvoin, jos lainkaan.

Reunaehtoien valinnassa hyödynnetään Reynoldsin, Rayleighin ja Machin lukuja (Karvinen 2016). Dimensioton Reynoldsin luku kuvaa fluidiosaseen vaikuttavan hitausvoimien ja viskoosien voimien suhdetta. Kanavavirtaukselle Reynoldsin luku merkitään muotoon:

$$\text{Re} = \frac{\rho |\bar{U}| D_h}{\mu} \quad (31)$$

Machin luku kuvaa fluidin kokoonpuristavuuden:

$$M = \frac{U}{c} \quad (32)$$

Tässä:

- $D_h = \frac{4A}{P}$ [m] on kanavan poikkileikkauksen karakteristinen dimensio
- $c = \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho}}$ [m/s] on äänen nopeus fluidissa
- A [m²] on poikkileikkauksen pinta-ala
- P [m] on poikkileikkauksen piiripituus
- ρ [kg/m³] on fluidin tiheys
- μ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$] on fluidin dynaaminen viskositeetti
- κ on fluidin adiabaattivakio, ilman $\kappa = 1.402$.

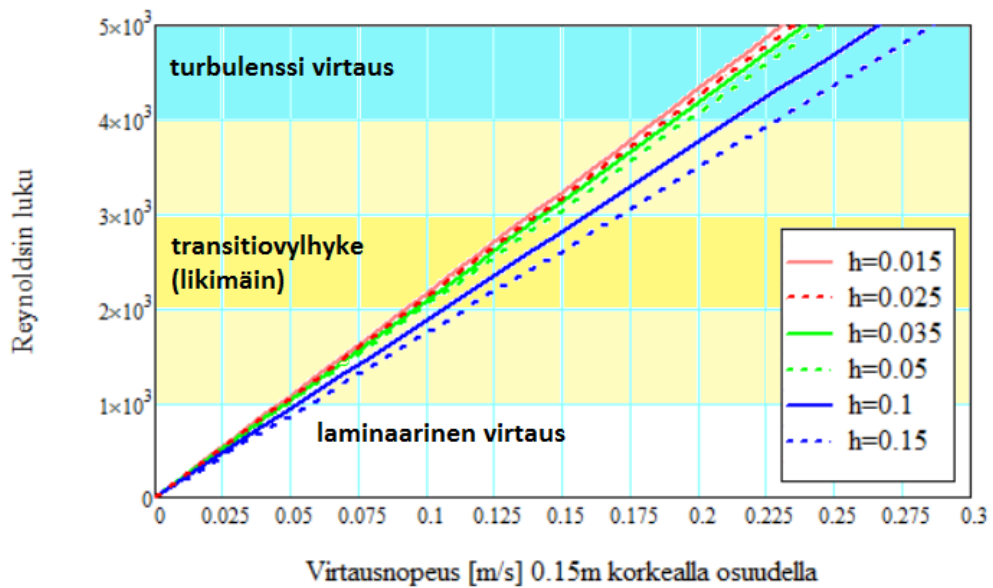
Rayleighin luku kuvaa kanavan karakteristisen alueen pituutta. Tämän alueen sisällä turbulenssi käyttäytyminen (ml. painehäviöt) ilmestyy myös matalan Reynoldsin luvun alueella:

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (33)$$

Tässä:

- g [m/s²] on putoamiskiihtyvyys
- $\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p$ [$\frac{1}{\text{K}}$] on aineen tilavuuslämpölaajenemisen kerroin
- ν [m²/s] on aineen kinemaattinen viskositeetti
- T_s [K] on kanavan pinnan lämpötila
- T_∞ [K] on virtaavan fluidin lämpötila kaukana tutkittavasta pinnasta
- L [m] on karakteristinen pituus.

Kuten ao. kuviosta (perustuu liitteen 1 Mathcad-laskentaan) voidaan huomata, nykytilanteessa tuuletusraon ilmapvirtauksen muoto vaihtelee turbulenssin ja laminaarisen alueiden välissä. Virtausmuodon ja sen ominaisuuksien huomioiminen on keskeinen tekijä, johon yläpohjan tuuletusrakenteiden jatko-optimointi voi nojautua.



Kuva 8. Reynoldsin luku tuuletusraon erikorkuisissa osissa, 0,15 m:n korkuisen osan virtausnopeuden funktiona, $U(h) = U(0.15) \frac{0.15}{h}$. Kokoonpuristuvuutta ei huomioitu.

4.6.1 Liikkumaton ilma ja ryömivä virtaus

Liikkumattomassa tilassa fluidit omaavat vain puristusjännityskestävyyttä. Toisin sanoen ne pystyvät vastustamaan puristusta, mutta eivät muodonmuutoksia.

Ns. ”hiipivän virtauksen” tai matalan Reynoldsin luvun virtauksen tapauksessa muodonmuutosta vastustavat viskoosit voimat ilmestyvät aineessa, mutta konvektiokiihtyvyyden vaikutukset ovat mitättömän pieniä. Perinteisesti tällaisten virtausten ehtona on $0 < Re \ll 1$, mutta käytännön sovelluksissa voidaan matalan Re-luvun approksimaatiot soveltaa tapauksissa, joissa $Re \sim 1$ (Durbin ja Medic 2013, 108).

Sekä liikkumattoman fluidin että hiipivän virtauksen laskelmissa voidaan soveltaa kiinteän aineen elastisen alueen mekaniikan perusyhtälöitä. (Zienkiewich ja Taylor 2000, 1.)

4.6.2 Laminaarinen ilmanvirtaus

Lähteen (Seppänen 1996, 95) mukaan suljetun kanavan sisällä laminaarisen virtauksen alue sijaitsee alueella $1 < Re < 2320$ ja transitiovyöhyke sijaitsee alueella $2320 < Re < 4000$. Simuloinnin kannalta tärkeät erot ilmestyvät jo kuitenkin Reynoldsin luvun arvoilla $Re > 1000$, ja sitä on huomioitava simuloinnin mallin valinnassa (Karvinen 2016).

Laminaarisen virtauksen kehitysvaiheessa, eli esim. kanavan tuloaukon lähellä, virran käyttäytyminen lajittelee turbulenssia. Muutoin laminaarisen virtauksen ominaispiirre on samansuuntaisuus. Eri ”virrat” eivät sekoitu sivusuunnassa keskenään. Tästä johtuu se, että poikittaissuunnassa laminaarisen virtauksen suuntaan nähden tapahtuvaa lämmön- ja partikkelisiirtoa voidaan tarkastella liikkumattoman ilman periaatteella (Durbin

ja Petterson 2010, 4). Toisin sanoen, kun tasakaton tuuletusraossa vallitsee laminaarinen ilmanvirtaus, raon ylä- ja alapinnan lämpötilagradientti määräytyy liikkumattoman ilmakerroksen U -arvon perusteella ja vesihöyrypitoisuuksien ero liikkumattoman ilmakerroksen diffuusiovastuksen perusteella (ka. myös osio 4.8). Riittävän pitkässä tuuletusraossa muodostuu näin lämpötilagradientti, joka omalla vuorollaan käynnistää nos-tevoimaliikettä tuuletusraon pystysuunnassa.

Laminaarisen virtauksen tapauksessa painehäviö kanavassa löytyy (Lewis et. al. 2004, 22) Hagenin-Poiseuillen yhtälöstä:

$$\Delta p = 32 \frac{\mu L V}{D_h^2} \quad (34)$$

Tässä:

- μ on fluidin dynaaminen viskositeetti,
- L [m] on kanavan pituus,
- $V = Q/A$ [m/s] on ilmanvaihtomäärän ja kanavan poikkipinta-alan suhde eli virtausnopeus kanavan pituussuunnassa,
- D_h [m] on kanavan karakteristinen halkaisija.

4.6.3 Turbulenssi ilmanvirtaus

Virtaus muuttuu laminaarisesta turbulenssiksi, kun viskoosivoimat eivät enää pysty vastustamaan pyörteiden ilmestymistä. Turbulenssilla on sekä positiiviset että negatiiviset vaikutukset rakenteen toimintaan. Kun virtaus on turbulenssi, lämmön siirto ja partikkelipitoisuuksien tasoittaminen tapahtuvat paljon tehokkaammin kuin laminaarisessa virtauksessa. Toinen tärkeä ominaispiirre on turbulenssin virtauksen kyky muuntaa virtauksen kineettistä energiaa viskooseihin jännityksiin. Isoimpien pyörteiden energialähde on tällöin virtauksen kineettinen energia. Isomman pyörteen kineettinen energia siirtyy samalla periaatteella yhä pienempiin pyörteisiin, ja pienimmät pyörteet sulauttavat viskoosiin voimiin. (Durbin ja Petterson 2010, 6.) Näin muodostuu turbulenssin virtauksen sisäinen energiavirta (Durbin ja Petterson 2010, 16), joka kuluttaa siivun tuuletuksen energialähteistä. Käytännön rakennusalan sovellusten kannalta erittäin monimutkaisen turbulenssivirtauksen tarkka simulointi on lähinnä tarpeetonta. Sen sijaan sen aiheuttaman energiahäviön luotettava arviointi on tärkeää.

Darcyn-Weisbachin kaavan (mm. Lewis et. al. 2004, 24) avulla voidaan arvioida painehäviön suuruus olettaen virtaava fluidi kokoon puristamattomaksi:

$$\Delta p = f \frac{L \rho V^2}{2 D_h} \quad (35)$$

Tässä:

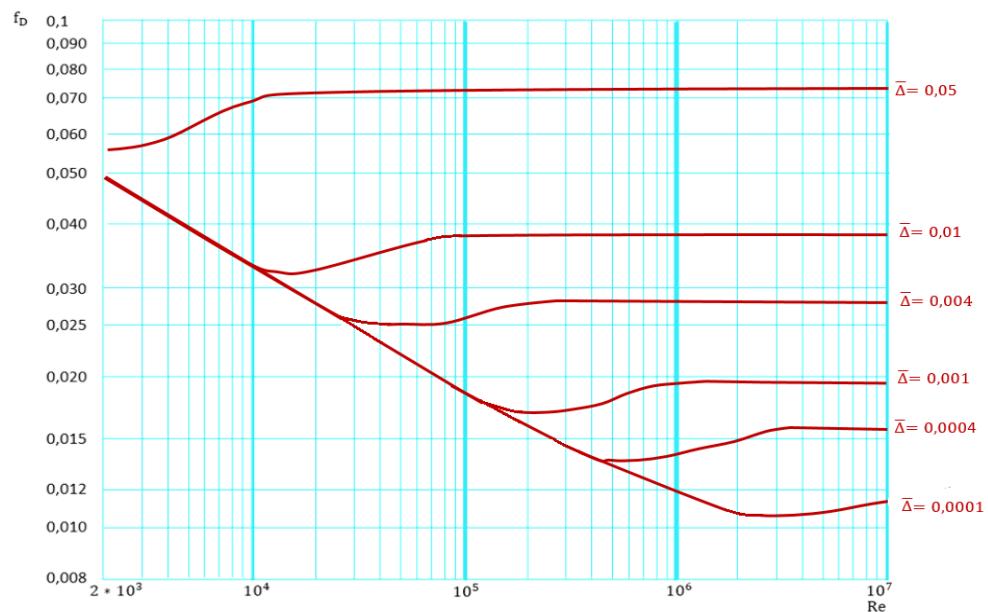
- f_D on Moodyn kitkakerroin, joka on Reynoldsin luvun ja kanavan seinämien pintojen karheuden funktio (ks. alla). Joissakin lähteissä, kuten esimerkiksi (Idelchik 1986), tämän kertoimen merkintään on käytetty λ -kirjainta.

- L [m] on kanavan pituus,
- ρ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$] on virtaavan fluidin tiheys,
- $V = Q/A$ [m/s] on ilmanvaihtomäärän ja kanavan poikkipinta-alan suhde eli virtausnopeus kanavan pituussunnassa,
- D_h [m] on kanavan karakteristinen halkaisija.

Alla olevassa taulukossa on esitetty yläpohjarakenteen materiaalien kitkakertoimien arvot. Tässä $\bar{\Delta} = \Delta/D_h$ ja Δ [mm] on viiluseinämän karheus. $\Delta_{\text{viilu1}} = 0,04$ mm, kun viilu on samansuuntainen virtauksen kanssa ja $\Delta_{\text{viilu2}} = 0,12$ mm, kun viilu on poikittaissuuntainen. Mineraaliviilan karheus on valittu vastaamaan keskikarheen betonipinnan karheutta, eli $\Delta_{\text{min.viila}} = 3$ mm. (Idelchik 1986, 61–64).

Taulukko 4. Samasta aineesta koottujen kanavien suhteellinen karheus.

Tuuletusraon korkeus,m	h	0,015	0,025	0,035	0,050	0,100	0,150
Karakteristinen dimensio,mm	Dh	29	48	66	92	169	236
Suhteellinen karheus, viilukanava viilun suuntainen virtaus	$\bar{\Delta}_1$	0,00137	0,00084	0,00061	0,00044	0,00024	0,00017
Suhteellinen karheus, viilukanava viilun suuntaa poikittaissuunt. virtaus	$\bar{\Delta}_2$	0,00411	0,00251	0,00182	0,00131	0,00071	0,00051
Suhteellinen karheus, mineraaliviilupintainen kanava	$\bar{\Delta}_3$	0,10272	0,06272	0,04557	0,03272	0,01772	0,01272



Kuva 9. Kitkakerroin f_D Reynoldsin luvun ja kanavan geometrian funktiona (Idelchik 1986, 61–68).

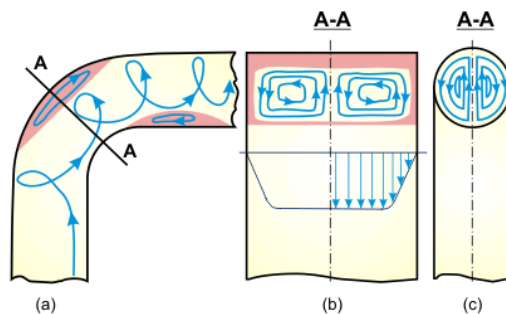
4.6.4 Monifaasivirtaus

Turbulenssin virtauksen jaksoina tuuletusraon virtauksessa vallitsee dispersiomalli, jolloin veden partikkelit on hyvin sekoitettu toisen aineen (ilman) massaan ja kulkevat sen virtaussuuntaa noudattaen.

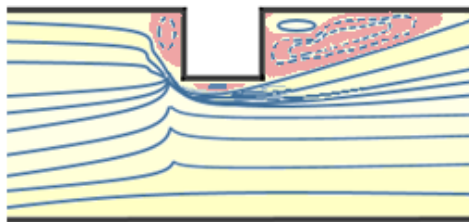
Eristekerroksen sisällä ja laminaarisen virtauksen jaksoina vesihöyryn diffuusioliikkeen suunta ei noudata ilman virtaussuuntaa. Vesihöyrypitoisuus nostevoiman osatekijänä vaikuttaa omalla vuorollaan virtauksen ominaisuuksiin. Lisäksi monifaasivirtaustapauksissa molekyylien massojen erot korostavat seuraavassa osiossa kuvattua virtausten erottamista. Näin ollen monifaasivirtaus on olennainen tekijä rakenteen toiminnassa, mikä kannattaa jatkossa ottaa tarkemmin huomioon. Tämä johtuu siitä, että tutkittavien kohteiden koko estää monissa tapauksissa luotettavien laboratoriokokeiden järjestämisen. Monifaasivirtausten tutkimus on pohjautunut jo pitkään teoreettisiin ja numeerisiin mallinnuksiin (Brennen 2005, 20), eli rakenteiden toiminnan jatkotutkimukseen on olemassa vankka teoreettinen pohja. Kuitenkin multifasivirtausten mallinnus on ongelmana voimakkaasti ei-lineaarinen, ja kun yksi tai molemmat virtauksen faasit ovat turbulenssialueella, arviointiin tarvittava laskuteho on suurin tässä työssä esitetyn ongelman mittakaavassa. Kolmen ilmiön eli lämmönsiirron, diffuusion ja turbulenssin virtauksen yhdistämistä samassa mallissa ei nykyhetkellä voida vielä suorittaa tavanomaisen tehotyöaseman laskutehoresursseilla.

4.6.5 Geometrian aiheuttamat kertavastukset

Painehäviöt, joiden tekijänä on kanavan geometrian kertavastukset, voivat ilmestyä kaikissa virtausmuodoissa, vaikka myös Reynoldsin luku vaikuttaa kertavastuksen suuruuteen. Kanavan mutkassa fluidin partikkeleihin vaikuttaa keskipakoisvoima. Tämän vaikutuksesta virtaukset erottuvat toisistaan, ja syntyvien vastavirtojen vaikutukset ovat monessa tapauksessa energiahäviön ratkaiseva tekijä.



Kuva 10. Pyöreän kanavan mutkassa ilmestyvien kierre- ja vastavirtausten kuvaus (perustuu lähteeseen Idelchik 1986, 191).



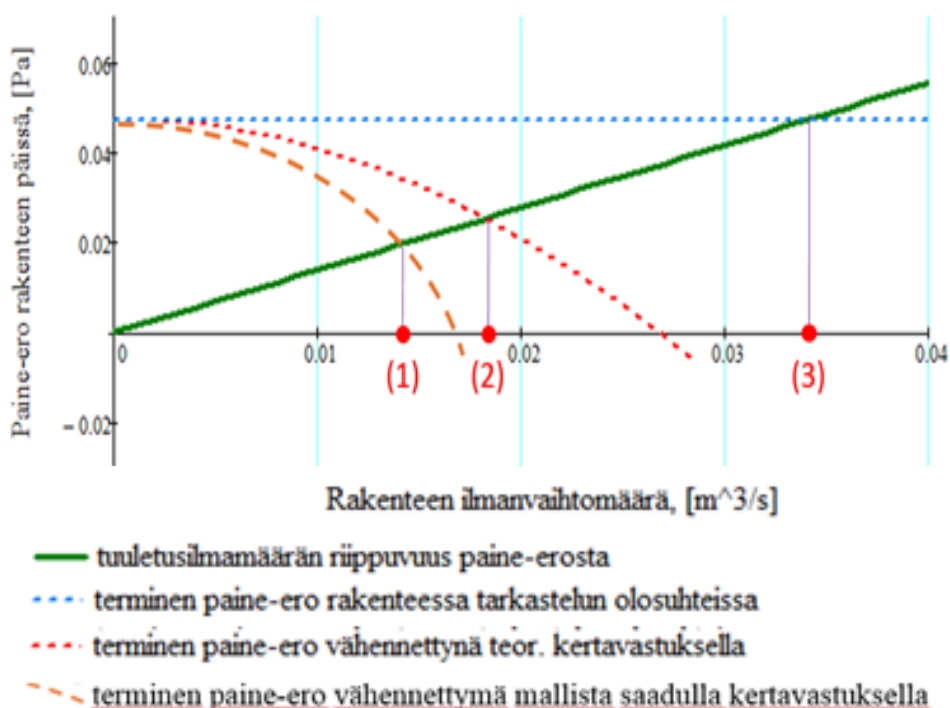
Kuva 11. Seinämän ulokkeen vieressä ilmestyvien vastavirtausten kuvaus (perustuu lähteeseen Durbin ja Petterson 2010, 205).

Rakennusosan yksityiskohtaisen mallinnuksen avulla voidaan rakennusosan painehäviön laboratoriokokeet jäljitellä riittävällä (muutamien prosenttien) tarkkuudella. Tällöin rakennusosan aiheuttaman painehäviön riippuvuus virtausnopeudesta voidaan useimmiten esittää analyyttisesti, esimerkiksi (noin) toisen asteen yhtälöä käyttäen eli muodossa

$$\begin{aligned}\Delta p &= a_1 u^2 + a_2 u, \\ \Delta p &= a u^n, n \approx 2\end{aligned}\quad (36)$$

Mallista saadut tulokset osoittautuivat ainakin toistaiseksi olemaan ”varmalla puolella” laskennallisiin tuloksiin verrattuna. Alla olevassa kuvassa

- tapaus (1) esittää esimerkkirakenteen ilmanvaihtomäärän, kun kertavastusten arvot haetaan FEM-mallista
- tapaus (2) esittää esimerkkirakenteen ilmanvaihtomäärän, kun käytetään teoreettisia suorakaide- tms. kanavien kertavastusten arvoja
- tapaus (3) esittää esimerkkirakenteen ilmanvaihtomäärän, kun kertavastukset jätetään huomiotta.



Kuva 12. Painovoimaisen tuuletuksen ilmamäärien tasoittaminen kertavastusten myötä (kaavaan (24) perustuva laskenta on esitetty Liitteessä 1).

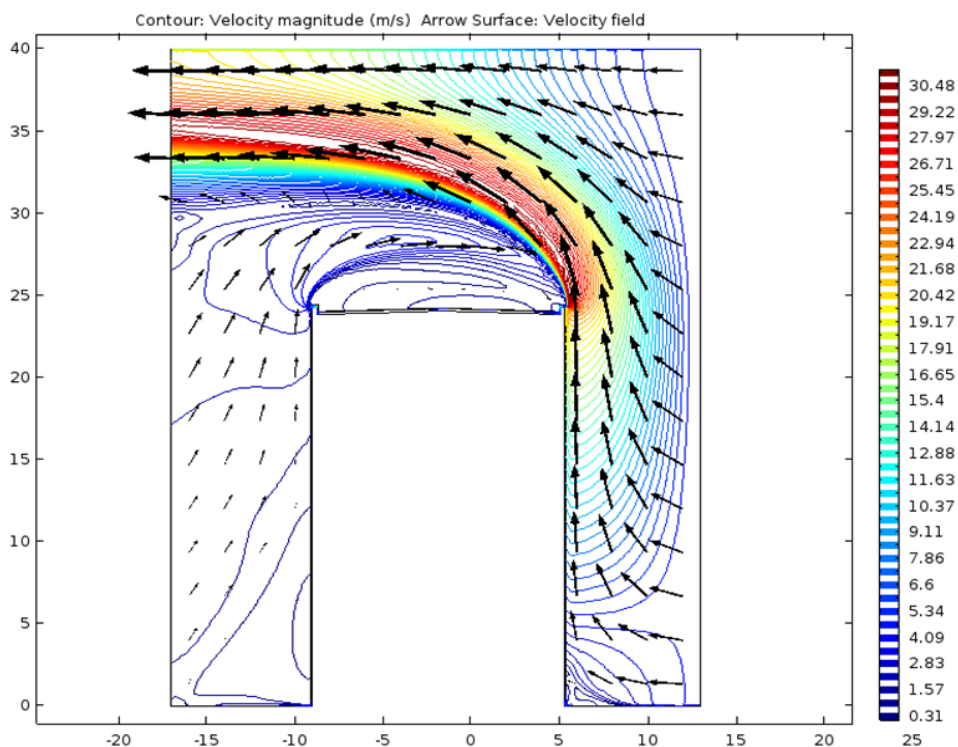
Laajasta valikoimasta kerta- ja metrikohtaisia vastuksia on olemassa laajat laboratoriokokeisiin perustuvat tilastot. Koetuloksiin perustuva tieto on kuitenkin luotettavin tiedon lähde silloin, kun vastaavan rakenteen mittaustulokset ovat saatavilla. Rakenne-

suunnittelun yhteydessä on huomioitava, että toisiaan lähellä olevien, kertahäviötä aiheuttavien osien kokoonpano ei välttämättä toimi samalla lailla kuin vastaavat osat yksitellen.

4.7 Ulkopuoliset ilmavirtaukset (tuuli)

Tuulen osuessa kohtisuorassa tai lähes kohtisuorassa rakennuksen julkisivua kohti muodostuu rakennuksen keskiosassa voimakas ylöspäin suunnattu ilman virtaus. Pitkän rakennuksen keskiosassa virtausnopeus voi olla monikertainen vaakasuuntaisen tuulen nopeuteen verrattuna. Seinää pitkin virtauksen vaakakomponentti kasvaa ja pystykomponentti pienenee nurkka-alueilla. Tätä virtausta voidaan hyödyntää tuuletusraon tuuletuksessa normaaleissa olosuhteissa, ja toisaalta se voi aiheuttaa kosteusrasituksen kasvua vastasäteilyn tilanteissa.

Tasakaton yläpuolella ja tuulelta suojatun seinän puolella ilmestyy tuulen vaikutuksesta alipainealue, ja tämä ilmiö pitää huomioida tuuletusraon suunnittelussa.

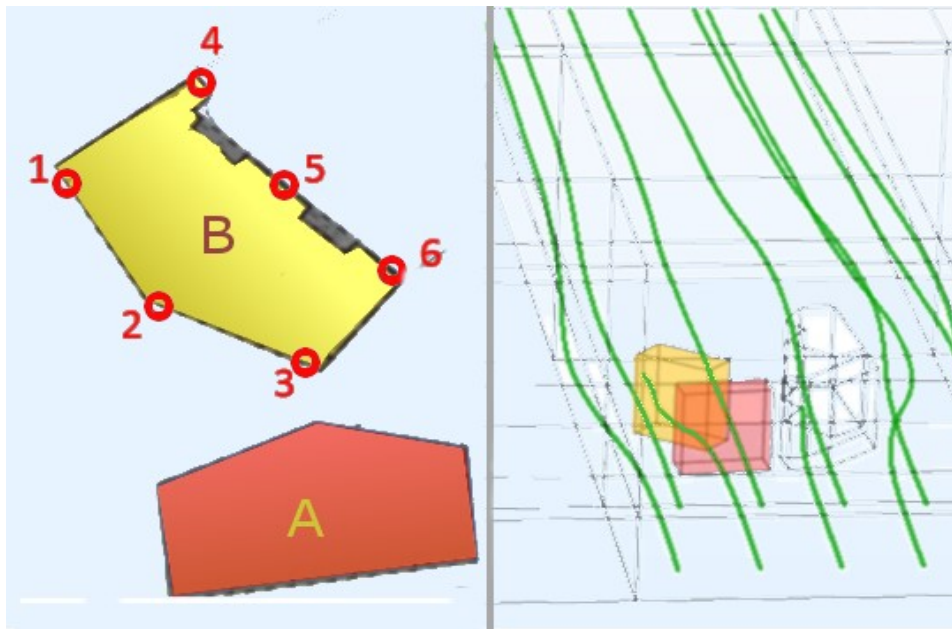


Kuva 13. Tuulen virtaus pitkän rakennuksen keskiosan kohdalla, kun ympäristön tuulinopeus (oikealta) on 5 m/s. Musta nuoli kuvaa ilman tuulen virtausnopeutta mittakaavassa.

Hyödynnettävissä olevia ilmamääriä määrittelevät ainakin seuraavat parametrit:

- vallitsevat tuulen suunnat ja nopeudet
- ympäristön (rakennukset, maaston muodot, kasvusto jne.) vaikutukset
- rakennuksen arkkitehtoniset ominaisuudet ja rakenneratkaisut, mm. ulokkeet, räystäiden geometria jne.

Tästä johtuen tuulen vaikutuksen mahdollisesti aiheuttamat vaaratilanteet on pakko huomioida ja eliminoida rakennusfysikaalisen suunnittelun aikana. Toisaalta tuulen huomioiminen edullisena tekijänä on hyvin epävarmaa, joten tuuletuksen toimivuus on voitava varmistaa muilla keinoilla. Esimerkiksi alla esitetyssä kuvassa talo B sijaitsee talon A takana muodostuneessa alipainealueessa, ja merkittävä pystysuuntainen ilmavirtaus räystään kohdalla voidaan havaita vain mittauspisteessä (1).

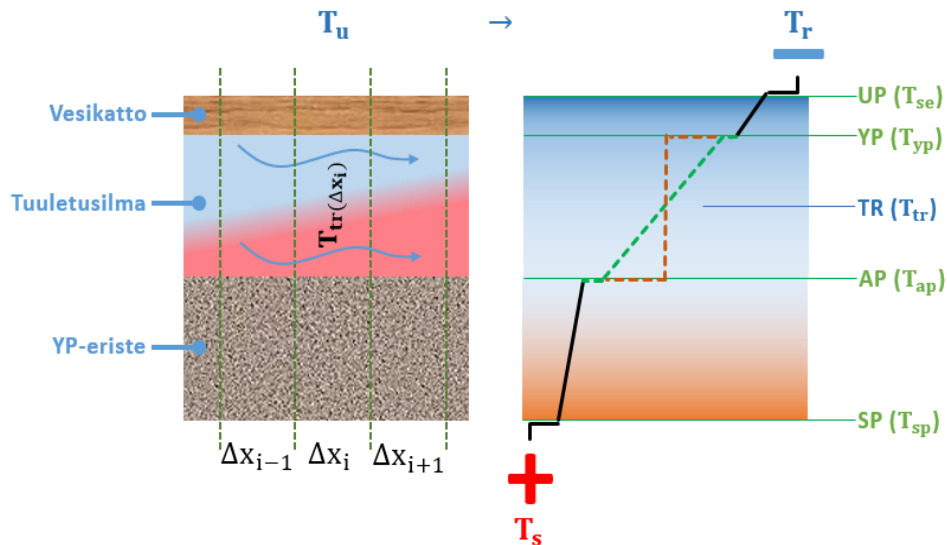


Kuva 14. Visualisointi tuulen vaikutusten tarkastuksesta. Rakennuksen B räystäään tasolle sijoitetut mittauspisteet on esitetty tasokuvassa.

Tuulen aiheuttamalla konvektiolämmönsiirrolla on olennainen rooli rakenteen lämpöteknisessä toiminnassa (ks. 4.4). Aurinkoisen päivän aikana voimakas tuuli tehostaa tuuletuksraon ilmanvirtausta, mutta samalla viilentää kattopintaa pienentämällä nostevoiman vaikutuksesta tapahtuvaa tuuletusta. Vastasäteilyn jaksoina konvektiolämpövirta on suunnattu ulkoilmasta rakenteeseen, mutta tuuletuksraon ilmavirtauksen kasvaessa kasvaa myös kosteusrasitus.

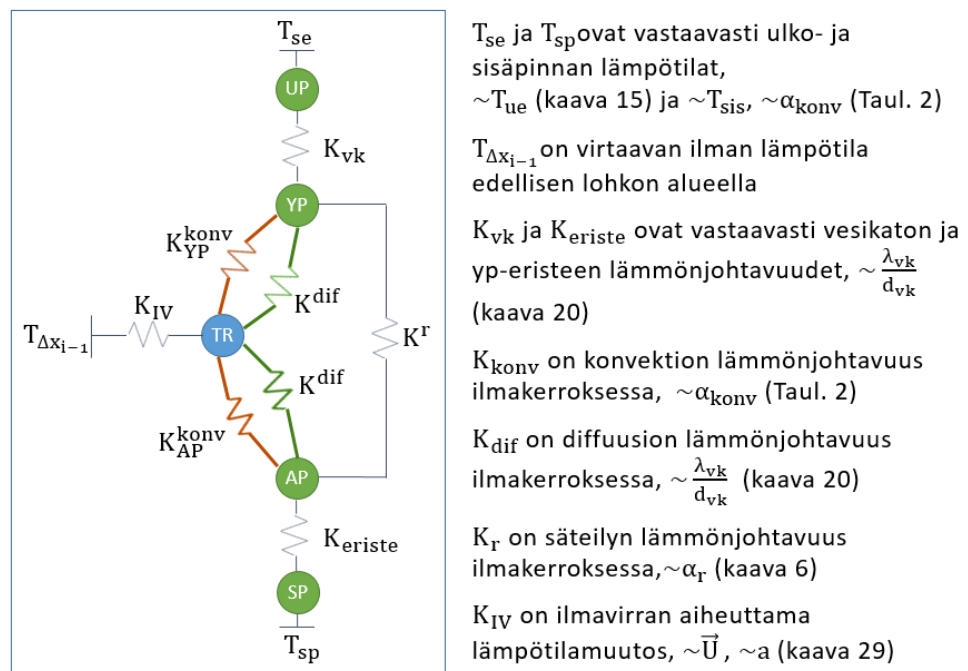
4.8 Tuuletuksraon multifysiikka

Käyttäen lähteessä (Hagentoft 2001, 30) esitettyä graafista notaatiota voidaan (lähes) vaakasuuntaisen tuuletuksraon rakennusfysikaalinen toimintaperiaate esittää seuraavasti. Olkoon tuuletuksraon poikkileikkauksen mitat b (korkeus) ja d (leveys). Tuuletuksraon läpi liikkuu U m/s -nopeudella ilmavirta. Pintojen merkinnät on esitetty alla (Kuva 15).



Kuva 15. Tuuletusraon lämpöteknisen toiminnan kuvaus ja virtausmuodosta riippuvat lämpötilagradientin vaihtoehdot: turbulenssivirtaus esitetty oransilla ja laminaarinen virtaus vihreällä katkoviivalla.

Tällöin rakenteen energijakaumaa pituusyksikön Δx_i alueella voidaan kuvata kuvassa 16 esitetyn kaavion avulla (perustuu lähteeseen Hagentoft 2001, 166, 261–268).

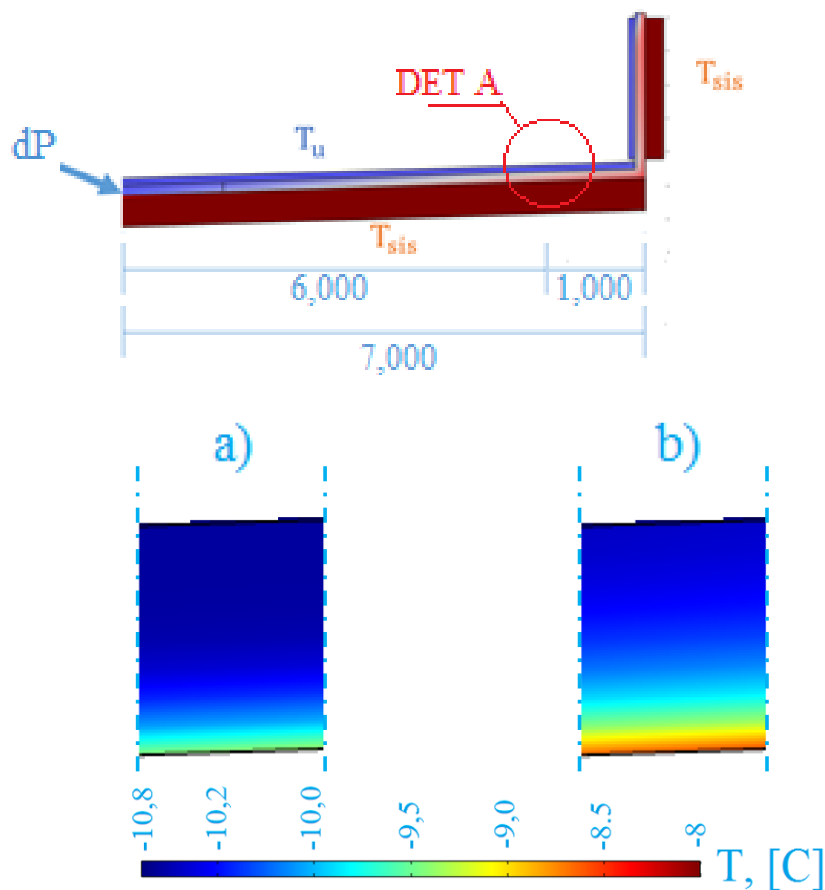


Kuva 16. Tuuletusraon lämpöteknisen toiminnan kaavio esitettyinä lämmönjohtavuuksien avulla.

Kuvasta 16 voidaan nähdä, että tuuletusraon ala- ja yläpinnan lämmönsiirron mekanismit ovat diffuusio-, konvektio- sekä säteilylämmönsiirto. Säteilylämmönsiirto riippuu vain pintojen lämpötilaerosta ja on jatkuvasti mukana energiyhtälössä. Sen sijaan se,

noudattaako lämmönsiirto pääosin diffuusion vai konvektion mekanismia, riippuu tuuletusraossa vallitsevasta virtausmuodosta (vrt. osiot 4.6.2 ja 4.6.3). Toisin sanoen virtausmuodon ollessa turbulenssi tuuletusraon ilman voidaan riittävällä tarkkuustasolla olettaa olevan ”hyvin sekoitettu” eli ominaisuuksiltaan lähes homogeenista. Sen sijaan laminaarisen virtauksen tapauksessa pitää huomioida vallitsevan diffuusiosiiirtymisen mekanismin ansiosta ilmestyvä lämpötilagradientti. Jotta korkea tuuletusrako toimisi tehokkaasti, on näin ollen varmistettava, että rakennneosien aiheuttama painehäviö on riittävän pieni saatavilla oleviin energialähteisiin nähden.

Kuvassa 17 on esitetty 2d-mallin avulla suoritettu vertailulaskenta. Helmikuun ulkolämpötiloissa tuuletusraon alapää mallinnettiin tapauksessa (a) avoimena, jolloin muodostuneen virtauksen nopeus sijaitsi turbulenssialueella. Tapauksessa (b) räystäään kohdalle määrättiin räystäsdetaljin vastaava painehäviö, jolloin virtaus oli laminaarinen.



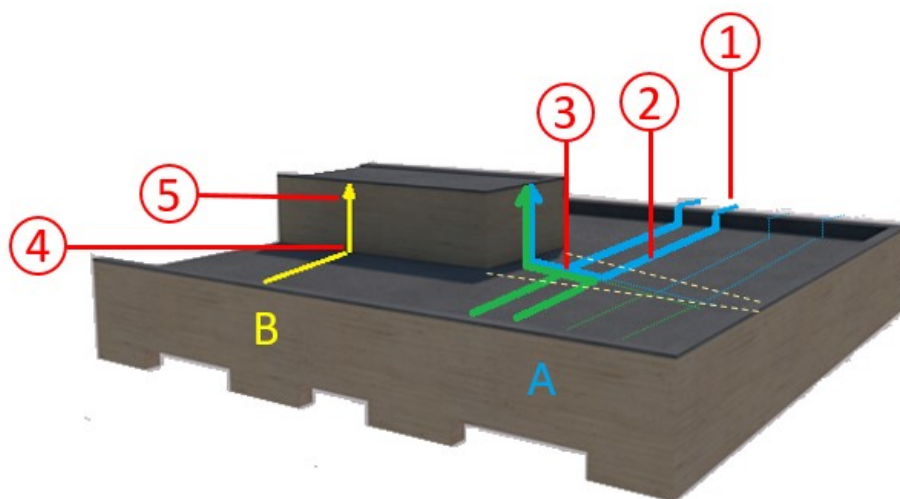
Kuva 17. Lämpötilagradientti 150 mm korkean tuuletusraon kohdassa A. Tapaus (a) esittää turbulenssivirtausta ja tapauksessa (b) virtaus on laminaarinen.

5 YLÄPOHJARAKENTEEN JA SEN OSIEN KUVAUS

Tarkastuksen kohde on 8-kerroksisen kerrostalon puuelementtirakenteisen yläpohjan tuuletusrako. Yläpohjan $U=0.07 \frac{W}{K.m^2}$. Tässä työssä on käsitelty erilaisten höyrinsulkumateriaalien vaihtoehtoiset vaikutukset rakenteen toimivuuteen äärimmäisilanteissa. Muita rakenneratkaisun muutoksia ei ole käsitelty tarkastelun yhteydessä.

Tuuletusraon geometria vaihtelee rakennuksen eri osissa aiheuttaen mm. ilmanliikettä hidastavia kertavastuksia. Geometrian mahdolliset ongelmakohdat määriteltiin laskennan alkuvaiheessa käyttäen kertavastuskertoimien likimääräisiä arvoja ja painehäviökaavoja. Havaittujen ongelmakohtien toimintaa tarkastettiin COMSOL-sovelluksella suoritettulla tutkimuksella.

Rakennussuunnittelutasolla rakennuksen yläpohja koostuu kolmesta lohkoista. Reunimaisia lohkoja (alue A) kutsutaan jäljempänä ”tasakattolohkoiksi”. Talon keskiosassa (alue B) sijaitsevan talotekniikka-/hissikuilun kattotaso on 2,0 m tasakaton harjakohdan yläpuolella.



Kuva 18. Tuuletusreittien ja niiden osien kuvaus.

Tässä tutkimuksessa tarkastelun kohteena olevat yksittäiset rakenteet ovat

1. räystäsdetalji, ”tuloilmareitti”
2. vaakasuuntainen tuuletuskaista asuntojen yläpuolella
3. tasakaton ja hormin välinen suuntamuutosdetalji
4. pystysuuntainen tuuletuskaista talotekniikkatilan seinässä, ”hormi”
5. tulo- ja poistoaukot.

Yksittäiset, jopa eri rakennejärjestelmiin kuuluvat rakenneosat on jaoteltu näihin ryhmiin rakennusfysikaalisen toiminnan perusteella. Jokaista ryhmää kuvaa vallitseva rakennusfysikaalisten prosessien yhdistelmä, ja toiminnan optimoinnin toimenpiteet eroavat mahdollisesti toisistaan.

Pääperiaatteena voidaan kuitenkin huomata, että räystäsdetaljin, suuntamuutosdetaalin sekä tulo- ja poistoilmareitin alueilla ei tapahdu tuuletuksen tehostamisen kannalta oleellisia prosesseja, mutta sen sijaan niiden jarruttava vaikutus on suuri. Näiden osien optimointikapasiteetti sijaitsee pääosin kitkan pienentämisen ja virtauksen optimoinnin alueella. Tämän tutkimuksen yhteydessä havaittiin kuitenkin myös räystään tyyppirakenteeseen liittyvät kosteustekniset riskit.

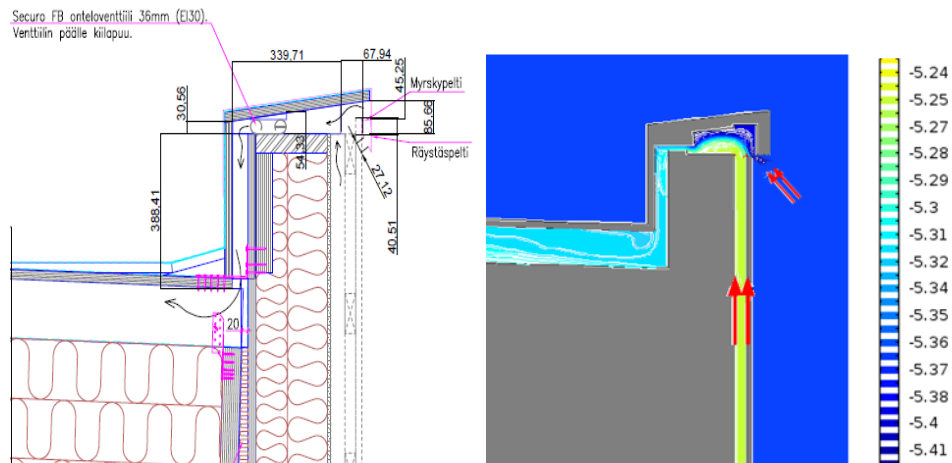
Tuuletuksen tehostamisen kannalta tärkeät prosessit tapahtuvat siis pääosin tasakaton ja hormin osuudella. Sen sijaan kitkan vähentämisen vaikutus olisi hyvin pieni. Tässä rakenteen pääasialliset parannusmahdollisuudet liittyvät sen lämpötekni- sän toiminnan optimointiin. Seuraavassa kuvassa on esitetty tuuletusilman virtausnopeuden ja tuuletusilman lämpenemisen välinen likimäinen riippuvuus.

5.1 Räystäsdetalji ja suuntamuutosdetalji

Räystäsdetaalin ja suuntamuutosdetaalin olennaisin vaikutus rakenteen toimintaan perustuu niiden aiheuttamaan painehäviöön. Suuntamuutosdetaalin kohdalla rakenteen lämpö- ja kosteustekninen toiminta vastaa periaatteessa tasakaton osuuden toimintaa, mutta vähäisen pinta-alan takia vaikutus on vähäinen. Räystäsdetaalin kohdalla havaittiin omaperäiset lämpö- ja kosteustekniset riskit, joita kuvattiin osiossa 5.1.1.

5.1.1 Räystäsdetaalin lämpö- ja kosteustekninen toiminta

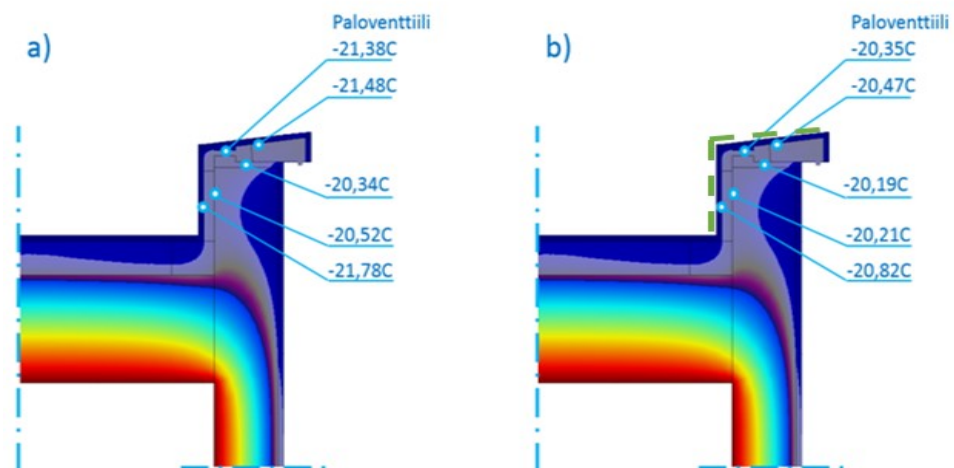
Tarkastelun ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin seinätuuletuksen poistoreitin ja katto- tuuletuksen tuloilmareitin yhdistämisen seuraamuksia. Yhdistetyn ratkaisun tavoitteena oli ulkoilmaan rajoittuvien aukkojen ja näin viistosateen potentiaalisesti aiheuttaman kosteusrasituksen vähentäminen. Tarkastelussa havaittiin kuitenkin että, tuulen nopeuden ollessa riittävä viistosaderasitusten kannalta, aiheuttaa tuulen paine myös seinä- tuuletuksen kostean ilman tunkeutumista räystäsdetaalin kautta kattorakenteeseen. Lisäksi seinässä lämmenty ilma viilentyy lämmittämättömän räystään kohdalla aiheuttaen kosteuden kondensoitumisen riskin (ks. kuva alla). Kerätyn tiedon perusteella oli tehty päätös räystäsdetaalin kokoonpanon muutoksesta. Seinän ja katon tuuletusreitit erotettiin toisistaan. Jatkotutkimuksessa havaittiin, että ilmanottoaukkojen keskinäinen sijoittelu vaikuttaa olennaisesti etenkin kattorakenteen tuulettavuuteen. Tähän jatkotutkimukseen liittyviä tietoja esitetään osiossa 5.1.2.



Kuva 19. Alkuperäinen räystäärakenne ja tuuletusraon lämpötilajakauman simulointitulokset.

Räystäärakenteen toimivuutta kosteusrasitustilanteessa 3.2.3-a eli talviajan vastasäteilyjaksoina tutkittiin myös simuloinnin avulla. Tällöin tuuletusraon ulomman pinnan lämpötilan havaittiin laskevan niin, että vesihöyryn jäätyminen jääkiteisiin oli mahdollista kaikissa mittauspisteissä.

Kriittisimmän tilanteen aiheuttaa kuitenkin 0,5 mm:n metallilangasta valmistettu paloventtiili, jonka silmäkoko on 2 mm. Asennusohje vaatii, että onteloventtiilin on oltava tiiviillä kontaktilla raon ylä- ja alapintoihin. Näin siitä muodostuu jäähdytys-elementin tavalla toimiva rakenneosa, jonka kohdalla ilman ja kylmän pinnan lämmönsiirto on suurimmillaan. Olettaen venttiilin lämpötilaksi tuuletusraon ylä- ja alapinnan keskiarvon voidaan todeta, että yhden 8 tunnin pituisen tarkastelujakson aikana venttiilin pintoihin tiivistyvän jään tilavuus voi olla jopa 20 % verkon vapaan silmäkoon tilavuudesta. Vaaratilanteen mahdollisuutta voidaan eliminoida esimerkiksi lisäeristämällä räystään kansi ulkopuolelta (kuvassa b lisäeristys on esitetty vihreällä katkoviivalla).



Kuva 20. Rakennevaihtoehdot ja lämpötilajakauma räystään kohdalla, kun ulkoilman lämpötila $T_u = -20$ C:
 a) lisäeristämätön räystään kansi
 b) lisäeristetty räystään kansi.

5.1.2 Suuntamuutosdetaljin kitkapainehäviöt

Suuntamuutosdetaljin kokonaispainehäviöt mitattiin painehäviökokeen simuloinnilla. Elementtiverkon vähimmäiskoko valittiin alla kuvatun kokeilun perusteella. Kokeilut suoritettiin hetkellisinä mittauksina.

Taulukko 5. Elementtikoon valinnan perustelut.

Koesimulointi nro	1	2	3	4
Elementin vähimmäiskoko, m	0,0007	0,005	0,009	0,019
Elementin enimmäiskoko, m	0,01	0,02	0,03	0,06
Laskenta-aika, min	40	24	16	4
Mitattu painehäviö (U=0,4m/s), Pa	0,35	0,355	0,355	0,36

Kokeilun perusteella todettiin elementtikoon kasvattamisen olevan laskutehon kannalta kannattavaa. Tarkkuustason lasku oli siedettävä ja tulosten pyöristäminen oli varmalla puolella. Dynaaminen painehäviölaskenta suoritettiin näin karhealla elementtiverkolla (vaihtoehto 4).

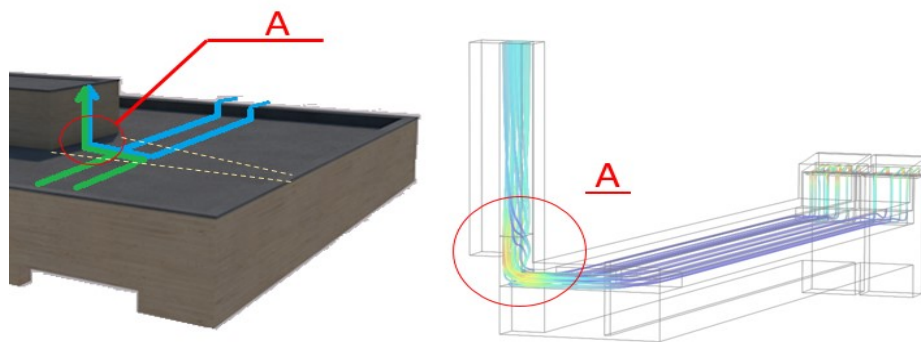
Simuloinnin virtausmallina valittiin matalan Reynoldsin luvun $k - \varepsilon$ -malli, joka mahdollistaa annetun laskutehon raameissa parhaat tulokset laminaarisen ja turbulenssin virtauksen rajan tuntumassa. Virtausnopeudenmuutokset mallinnettiin dynaamisesti eli kasvattamalla virtausnopeus koeajan funktiona. Simuloinnin tuloksina saatiin paineen arvot myrskypellin ja tasakaton tuuletuskaistan kohdalla, vastaavasti p_{tulo} ja p_{kaista} . Koska detaljin sisääntulo ja poisto sijaitsevat eri korkeustasoilla ja ovat myös poikkipinta-aloiltaan erilaisia, räystään sisällä olevan reitin painehäviötä ei voida arvioida perusteella $\Delta p = p_{\text{tulo}} - p_{\text{kaista}}$, vaan on haettava vastaava paineetta Bernoullin kaavan avulla. Bernoullin kaavaa voidaan soveltaa eri tarkkuuksilla. Olettaen virtaavan ilman olevan kokoonpuristamaton ja painehäviön ollessa nolla on voimassa seuraava yhtälö:

$$\frac{v_{\text{tulo}}^2}{2} + \frac{p_{\text{tulo}}}{\rho} = \frac{v_{\text{kaista}}^2}{2} + gh + \frac{p_{\text{kaista}_0}}{\rho} \quad (37)$$

Tässä:

- ρ [kg/m³] on ilman tiheys mittaustilanteessa
- v_{tulo} ja v_{kaista} [m/s] ovat vastaavasti virtausnopeudet myrskypellin ja kaistan kohdalla
- p_{tulo} [Pa] on mitattu paine myrskypellin kohdalla
- p_{kaista_0} [Pa] on p_{tulo} :n arvoa vastaava paineen arvo kaistan kohdalla
- h [m] on myrskypellin ja tuuletuskaistan välinen korkeusero
- g [m/s²] on putoamiskiihtyvyys.

Silloin kun tasakaton osuus on suhteellisen pitkä, muodostuu kokoojakanavan virtausnopeus korkeaksi. Tällöin suuntamuutosdetaljin painehäviö voi kasvaa koko rakenteen toiminnan kannalta ratkaisevaksi tekijäksi. Kitkan vähentämiseksi kokoojakanavaa voidaan esim. laajentaa ilmamäärien kasvaessa (keltainen katkoviiva).



Kuva 21. Tasakaton osuuden suuntamuutosdetaljin kohdalla ilmestyvä pyörre sekä virtausnopeuden kasvu kokoojakanavassa.

5.1.3 Räystäsdetaljin kitkapainehäviöt

Vaikka ilmvirtaus raossa olisi Reynoldsin luvun perusteella laminaarinen, se muuttuu turbulenssiksi paloventtiin vaikutuksesta. Verkon sijoittaminen poikittaissuunnassa virtaussuuntaa nähden onkin yleisin tapa turbulenssin muodostamiseen laboratoriokeissa (Durbin ja Petterson 2010, 5). Verkon, rei'itetyn levyn tai arinan läpi tapahtuvassa virtauksessa syntyvän turbulenssin tarkka mallintaminen on lähes mahdotonta, koska virtauksessa tapahtuvien kaottisten pienliikkeiden määrä on erittäin suuri. Sen sijaan käytetään funktiota, joka kuvaa turbulenssialueen pituuden verkon jälkeen. Comsol-ohjelmistoa käyttäen tätä funktiota voidaan soveltaa Screen-toiminnon avulla. Valmistaja antaa vaihtoehtoiset ohjeet venttiin vaikutusten arvioimiseksi, jonka periaate on virtausalueen poikkipinta-alan kahdenkertainen vähennys. Valmistajalta saatiin myös onteloventtiin laboratoriokeiden tulokset.

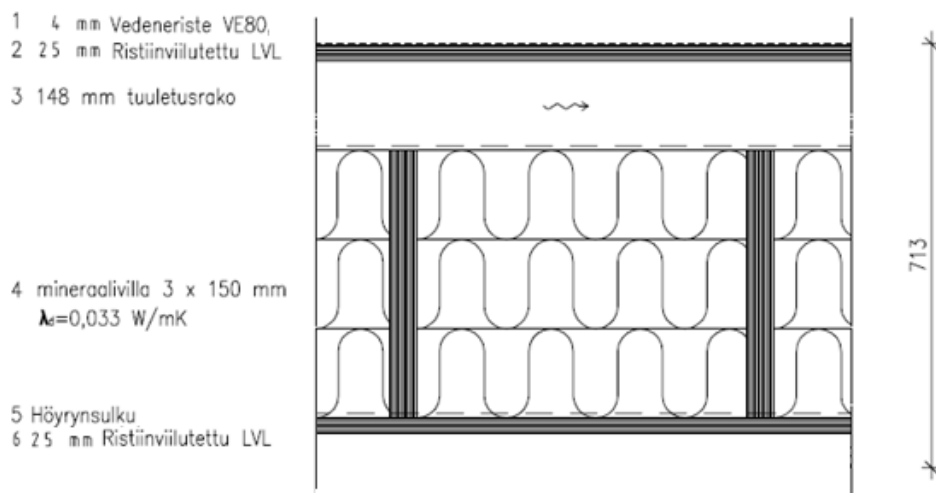
Räystäsdetaljin kokonaispainehäviöt mitattiin painehäviökoetta simuloimalla. Elementtiverkon vähimmäiskoko valittiin osiossa 5.1.2 esitetyn esiselvityksen perusteella kuitenkin niin, että seinämien välinen elementtimäärä olisi jokaisessa poikkileikkauksessa vähintään 5 kpl. Tästä johtuen aikaansaatu elementtijako oli tiheä ja simuloinnin aika oli noin 23 t. Kuitenkin elementtijako on ratkaiseva tekijä tarkkuuden kannalta, ja elementtimäärän ollessa alle 3 virtauksen mallinnus ei ole luotettava (Karvinen 2016). Näin ollen havaittiin, että räystäsdetalji on myös olennainen tekijä kokonaislaskennan laskutehokulutuksen kannalta.

Simuloinnin virtausmalliksi valittiin matalan Reynoldsin luvun $k - \epsilon$ -malli, joka mahdollistaa annetun laskutehon raameissa parhaat tulokset laminaarisen ja turbulenssin virtauksen rajan tuntumassa.

Kokoonpuristamattoman virtauksen Bernoullin kaava sekä pinnan karheuden likimainen huomioiminen ovat tämän laskennan virhetekijöitä ilmiöiden kuvaamisen osalta. Numerisen simuloinnin laskutehon säästösyistä määrätty virhe-arvo on 3 %.

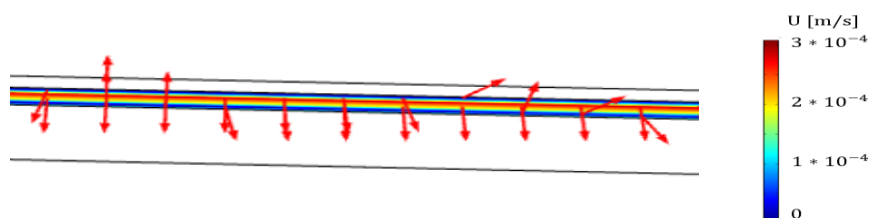
5.2 Vaakasuuntainen tuuletuskaista tasakaton kohdalla

Osiassa 4.6.3 esitetyn tiedon perusteella voidaan päätellä, että tasakaton kohdalla kitkan vaikutus on olennainen vasta, kun virtausnopeudet saavuttavat arvon 5 m/s. Tutkitavan rakenteen tapauksessa voidaan näin ollen päätellä, että tasakaton rooli tuuletusprosessissa on energian siirto saatavilla olevista lähteistä ilmaan niin, että muodostunut virtaus olisi hyödyllinen tuuletuksen kannalta.



Kuva 22. Rakenteen periaateleikkaus tasakaton kohdalla.

Tällä tarkoitetaan, että esimerkiksi tuuletusraon kylmän yläpinnan ja lämpimämmän alapinnan välissä tapahtuva suljettu virtaus ei ole tuuletuksen kannalta hyödyllinen. Tämän esimerkkinä alla olevassa kuvassa on esitetty ilman virtaussuunnat ja -nopeudet tuuletusraossa tilanteessa, kun hyödyllinen virtaus on nolla.



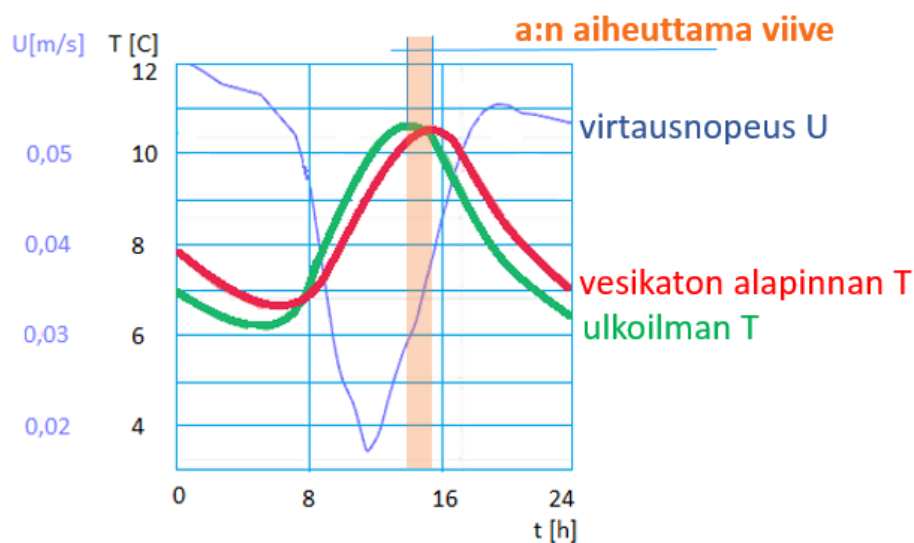
Kuva 23. Paikalla pysyvät konvektiopyörteet tasakaton kohdalla, kun tuuletavuus on nolla. Punaiset nuolit esittävät ilman virtaussuuntaa.

Tuuletuskaistan hyötysuhteella on kolme pääasiallista tekijää:

- Kattokulman kasvattamisen myötä nostevoiman vaikutuksesta syntyvän liike-energian suurempi osuus hyödynnetään tuuletuksessa.
- Kattopinnan suuntautuminen ja kattokulman optimointi aurinkoenergian vastaanottamisen kannalta mahdollistaa ainakin jaksottaisen tuuletuksen tehostamisen.
- Vesikattorakenteen kokoonpanon aiempaa tarkemman suunnittelun myötä voidaan tehostaa myös lähes tasaisten kattojen toimintaa.

Tutkittavan kohteen tapauksessa näiden tekijöiden yhteisvaikutus oli tuuletuksen varmistamisen kannalta riittämätön ainakin kriittisissä mittaustilanteissa, joten tuuletuksen tehostamiseksi otettiin hyötykäyttöön teknisen tilan seinä.

Auringon säteilyenergian keräämisen kannalta optimoitu 45 asteen kattokulma ei ole aina mahdollinen esimerkiksi arkkitehtonisista syistä. Näin ollen jatkokehityksen kannalta vesikattorakenteen rakennusfysikaalinen optimointi on siten yleisin tapa, jonka avulla voidaan parantaa sekä uusien että korjattavien kohteiden tuulettuvuutta. Jatko-optimoinnin yhteydessä on huomioitava, että katteen tai sen osien lisäeristämällä sekä katemateriaalin termisellä diffusiviteetilla voi olla sekä positiivinen että negatiivinen vaikutus rakenteen toimintaan. Tällöin korostuu dynaamisen simuloinnin rooli rakenteen toiminnan tarkastelussa (ks. esimerkki alla).



Kuva 24. Paksun puupohjaisen vesikatteen termisten ominaisuuksien vaikutus dynaamisen tarkastelun esimerkillä. Tarkastelun lämpötilat ovat datakannasta haetut lokakuun alun keskilämpötilat.

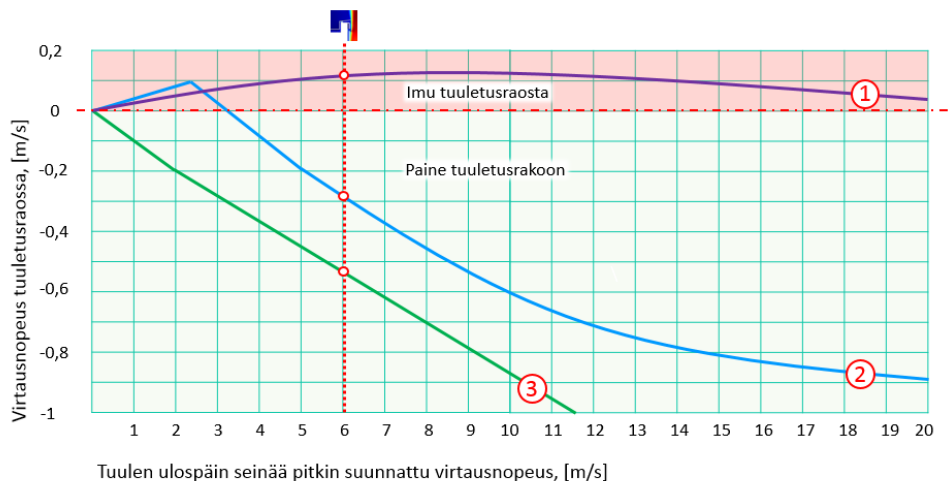
5.3 Pystysuuntainen hormi

Pystysuuntaisen, talotekniikkatilan seinässä sijaitsevan hormin rooli kattotuuletuksessa on toimia tuuletuksen energialähteenä. Tässä olennainen tekijä on ulkoseinän pienempi U-arvo. Hormin lisääminen malliin edesauttoi tuuletuksen riittävän toimivuuden pääasiassa varmistamista myös kriittisissä olosuhteissa. Jatkotutkimuksen kannalta olennaiset selvityskohdat ovat

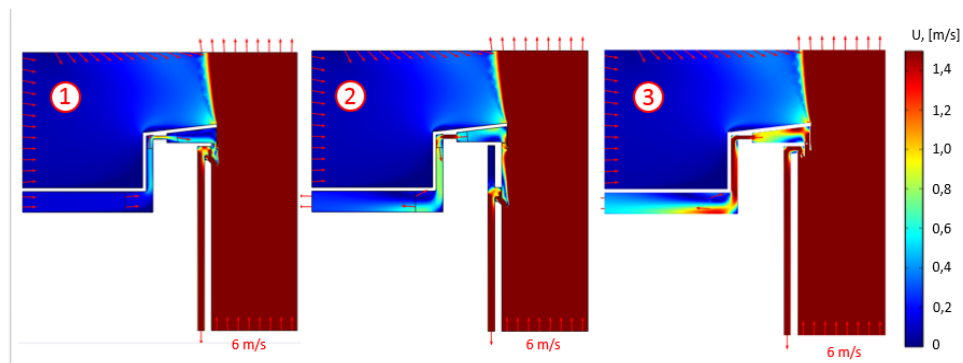
- hormin toiminnan rakennusfysikaalinen optimointi edellisessä osiossa kuvatuin keinoin
- ”ilmaisen” energian, kuten esimerkiksi ilmanvaihdon poistoilman, hyötykäyttö tuuletuksen energialähteenä etenkin talven aikana.

5.4 Tulo- ja poistoilmareitti

Tulo- ja poistoilmareittien kokoonpano ja sijoittelu on painehäviön tärkeä tekijä. Pelti- tms. osien geometriaa säätämällä voidaan edistää hyödyllisiä ja hidastuttaa epäedullisia virtauksia. Tämän tutkimuksen raameissa tutkittiin lähinnä olemassa olevan rakenteen vaikutusta tuulen tarjoaman lisätehon vastaanottamisen kannalta. Osiossa 5.1.1 kuvattu seinä- ja kattotuuletuksen peltien keskinäisen sijoittelun vaikutus esitetään alla.



Kuva 25. Räystäsdetaljin kokoonpanon vaikutus tuulen hyödyntämisen mahdollisuuksiin (negatiivinen y-suunta esittää hyödyllistä virtaussuuntaa).



Kuva 26. Virtausnopeudet tuuletusraossa tuulen aiheuttaman virtauksen ollessa 6 m/s.

Etenkin räystäiden kohdalla aukkojen sijoittelua ja kokoonpanoa muokkaavat usein myös muut kuin rakennetekniset vaatimukset, kuten esimerkiksi ulkonäkö ja paloturvallisuus. Verkon sijoittelu tuuletusraon päihin on välttämätöntä myös pieneläinten ja lintujen pääsyn estämiseksi. Tuotekehityksen kannalta tärkeä suunta on rakenteen, etenkin hienojakoisten verkkojen, huolettavuus. Nykyaikaisten tyyppirakenteiden kuntoa ei ole mahdollista tarkastella muuten kuin purkamalla räystään kantta.

6 TUTKIMUSTULOSTEN TULKINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Suoritettujen simulointimittausten avulla todettiin, että tutkittu rakenne todennäköisesti toimii painovoimaisesti riittävän monissa tapauksissa niin, että mahdollisten kosteusvahinkojen seuraamukset pystytään sen avulla eliminoimaan. Lämpö- ja virtausteknisen analyysin myötä saavuttiin myös lievät säästöt tuuletuksen poistoaukkojen määrässä.

Tutkimuksen aikana suoritettiin lisäselvityksiä, esimerkiksi tarkistettiin tuuletusraon toimintaa eri vuosien U-arvoilla. Lisäselvitysten myötä saatiin selville, että tasakaton tuuletusraon toiminta on monimutkaistunut energiamääräysten kiristyessä. Tarpeellisen tuuletuksen varmistamiseen on hyvä varata riittävät suunnitteluresurssit sekä varmistaa projektin alkuvaiheessa riittävä arkkitehtoninen joustavuus etenkin silloin, kun pyritään lähes 0-energiakulutukseen.

Yksittäisistä tuulettavuutta heikentävistä tekijöistä räystäsdetaljin vaikutus on suurin. Räystäsdetaljin suurin yksittäinen painehäviön tekijä on, suurella todennäköisyydellä, paloturvallisuusvaatimusten määräämä onteloventtiili. Rakenneosien aiheuttaman painehäviön negatiivinen merkitys perustuu siihen, että niiden ansiosta virtausnopeudet tasaantuvat hyvin matalalla tasolla heikentämällä olennaisesti rakenteen riskisietokykyä. Rakenteet, joissa pyritään käyttämään tuulivoimaa virtauksen tehostajana, ovat riskialttiita vastasäteilytilanteiden aiheuttaman kosteusrasituksen kannalta. Tasakaton kohdalla oleva alipainealue lisää kosteusrasituksen määrää verrattuna harjakaton tapukseen. Sen sijaan niiden edullinen vaikutus on jaksottainen ja monissa tilanteissa epävarma.

Tutkimuksen yhteydessä todettiin, että nykyinen tutkimustaso ja etenkin saatavilla oleva ohjeistus on riittämätöntä. Etenkin yläpohjan tuuletusrakenteille esitetyt toiminnalliset vaatimukset ovat korkeat. Sitä huolimatta luotettavaa, koetuloksiin perustuvaa eri tyyppirakenteiden tilastollista dataa ei ole saatavilla. Tässä tutkimuksessa kehitettiin tilastollisen datan korvikkeeksi yksittäisten rakenneosien painehäviökaavat ja todettiin, että niiden avulla haetut virtausnopeuden suuruudet korreloivat riittävän hyvin koko rakenteen simuloinnin tulosten kanssa.

Toimintavarmuustason parantamista ei välttämättä kannattaa aloittaa olemassa olevien rakenteiden koestuksesta. On olemassa selkeät kohdat, joissa toimintavarmuuden parannus olisi saavutettavissa suhteellisen pienillä elementtiteknisillä muutoksilla. Simulointityökalut antavat mahdollisuuden vertailla eri vaihtoehtoisia rakenneratkaisuja ja suorittaa suurimman osan optimointiprosessista virtuaalisessa ympäristössä. Luonnollisen tuuletuksen kannalta optimoidun rakenteen tulisi vasta ainakin seuraaviin kriteereihin:

- sileäpintainen
- mutkien määrä mahdollisimman pieni
- pyöristetyt kulmat, suurin mahdollinen säde
- poikkipinta-alan muutokset hyvin harkittu ja toteutettu optimoidusti virtauksen stabiiliuden kannalta
- suurin mahdollinen tulo- ja poistoilma-aukkojen välinen nousu

- lämmityslähteet maksimoitu, lämmönhukka minimoitu (kaikissa ulko-olosuhteissa)
- huolettavuus ja etenkin verkkojen puhdistettavuus
- toivotut ja ei-toivotut virtaussuunnat säädetty esim. listojen avulla
- ulko-olosuhteet tulo- ja poistoilma-aukkojen kohdalla määrätty suunnitelmallisesti.

Etenkin räystäärakenteiden osalta on havaittu selkeä tuotekehitystarve sekä optimointipotentiaali.

Tämän työn tuloksia voidaan hyödyntää jatkotutkimuksissa sekä tuotekehityksessä että olemassa olevien rakenteiden toimintavarmuuden tarkastuksissa. Tyyppirakenteiden simuloinnin painehäviökaavasto mahdollistaa jatkossa olennaiset työajan ja laskutehon säästöt. Työn teoreettista osuutta voidaan käyttää suunnitteluohjeen luonnoksena, jota voidaan kehittää sekä myös käyttää sellaisenaan päivittäisissä suunnittelutehtävissä.

Simulointimittausten kulku ja tulokset sekä tutkimuksen yhteydessä kehitetyt simulointityökalut ja suunnitteluohjeet ovat saatavilla Sweco Rakennetekniikka Oy:ltä.

LÄHTEET

Björkholtz, D. (1997). *Lämpö ja kosteus. Rakennusfysiikka*. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Brennen, E. (2005). *Fundamentals of Multiphase Flow*. Pasadena: California Institute of Technology.

Comsol Multiphysics Cyclopedia. *Navier-Stokes Equations*. Haettu 8.12.2016 <https://www.comsol.com/multiphysics/navier-stokes-equations>

Duffie, J.A. & Beckman, W.A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd edn*. J.Wiley and Sons, New York.

Durbin, P., Medic, G. (2013). *Fluid Dynamics With a Computational Perspective*. Cambridge: Cambridge University Press

Durbin, P., Petterson Reif B. (2010) *Statistical Theory and Modelling for Turbulent Flows*. Cambridge: Wiley.

Elmarsson, B., Nevander, L.-E. (2006) *Fukthandbok. Praktik och teori*. Stockholm: Svensk Byggtjänst.

Hagentoft, C-E. (2001). *Introduction to Building Physics*. Lund: Studentlitteratur.

Hakala, M. (1997). *Lujuusopin elementtimenetelmä*. Espoo: Otavatieto.

Hand, J. (2016.) Optimizing the Performance of Complex Building Facades. *Comsol News 2015*. Haettu 29.11.2016 https://www.comsol.com/story/download/309771/Newtecnic_CN2015.pdf

Idelchik, I.E. (1986). *Handbook of Hydraulic Resistance. Coefficients of Hydraulic Resistance and of Friction*. Washington: National Science Foundation.

Karvinen, T. (2016). *Turbulence flow modelling in building physics applications*. Luento 6.11.2016, Ilmalanportti 2, Helsinki.

Kauppila, A. (2014). *Matalaenergiakerrostalon ulkoseinien lämpö- ja kosteustekninen toiminta*. Insinööriyö. Metropolia ammattikorkeakoulu.

Lewis, R., Nithiarasu, P., Seetharamu, K.N. (2004). *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*. Cambridge: Wiley.

Mäkitalo, M. (2012). *Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa*. Diplomityö. Tampereen Teknillinen Yliopisto.

Oñate, E. (2009). *Structural Analyses with the Finite Element Method. Linear Statics. Volume 1. Basis and Solids*. Barcelona: CIMNE.

RIL 255-1-2014 (2014). *Rakennusfysiikka I. Osa 1: Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset*. Helsinki: Rakennusinsinöörien liitto.

Vinha, J. (2007). *Hygrothermal Performance of Timber-Framed External Walls in Finnish Climatic Conditions: A Method for Determining the Sufficient Water Vapour Resistance of the Interior Lining of a Wall Assembly*. Tampere: Tampere University of Technology.

Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. (2000.) *The Finite Element Method. Volume 3: Fluid Dynamics*. 5. painos. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. (2005.) *The Finite Element Method. Its Basis and Fundamentals*. 6. painos. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.

Painovoimaisen tuuletuksen osatekijät. Mathcad-analyysi.

Palvelusivu

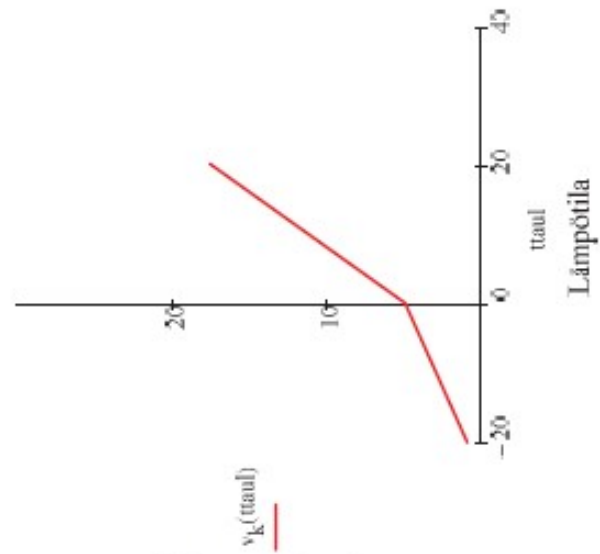
Ilman kylästyvesihöyrypitoisuus lämpötilan funktiona, $\left[\frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right]$

$$v_k(t) := 4.85 + 3.47 \cdot \left(\frac{t}{10} \right)^2 + 0.945 \cdot \left(\frac{t}{10} \right)^3 + 0.158 \cdot \left(\frac{t}{10} \right)^4 + 0.0281 \cdot \left(\frac{t}{10} \right)^5 \quad \text{RatNet Kosteus K3.3}$$

ttaul := -20, 0, 1 .. 40 [C], kaavassa käsitelty lämpötilakaista kaaviota varten

t (°C)	v _s (g/m ³)	p _s (Pa)	t (°C)	v _s (g/m ³)	p _s (Pa)	t (°C)	v _s (g/m ³)	p _s (Pa)	t (°C)	v _s (g/m ³)	p _s (Pa)
-20	0,88	102	1	5,21	658	22	19,40	2640	43	59,41	8663
-19	0,95	111	2	5,58	708	23	20,54	2805	44	62,40	9128
-18	1,04	122	3	5,98	762	24	21,74	2979	45	65,62	9614
-17	1,14	135	4	6,40	818	25	23,00	3162	46	68,77	10122
-16	1,25	149	5	6,84	878	26	24,32	3355	47	72,15	10653
-15	1,38	164	6	7,31	941	27	25,71	3559	48	75,67	11207
-14	1,52	181	7	7,80	1008	28	27,17	3773	49	79,33	11786
-13	1,67	200	8	8,32	1079	29	28,70	3999	50	83,14	12390
-12	1,83	221	9	8,87	1154	30	30,31	4237	51	87,10	13020
-11	2,01	243	10	9,45	1234	31	31,99	4487	52	91,21	13677
-10	2,20	266	11	10,06	1318	32	33,75	4750	53	95,48	14362
-9	2,40	292	12	10,71	1408	33	35,60	5027	54	99,92	15075
-8	2,61	319	13	11,39	1502	34	37,54	5317	55	104,52	15818
-7	2,84	348	14	12,10	1603	35	39,56	5622	56	109,30	16592
-6	3,08	379	15	12,86	1708	36	41,68	5943	57	114,25	17397
-5	3,33	412	16	13,65	1820	37	43,90	6279	58	119,39	18234
-4	3,60	447	17	14,49	1939	38	46,21	6631	59	124,72	19105
-3	3,89	485	18	15,37	2064	39	48,63	7001	60	130,24	20010
-2	4,19	524	19	16,30	2197	40	51,16	7398	61	135,95	20951
-1	4,51	566	20	17,28	2337	41	53,79	7793	62	141,87	21928
0	4,85	611	21	18,31	2484	42	56,54	8218	63	147,99	22943

Ilman kylästyvesihöyrypitoisuus



Lämpötila

2. TUULETUKSEN TOIMIVUUS

Sisäilman olosuhteet

$$\begin{aligned} T_s &:= 22 \\ RH_s_asunnot &:= 0.5 \\ v_s &:= v_k(T_s) \cdot RH_s_asunnot = 9.699 \\ v_s_tekniila &:= v_u + 3 = 3.832 \end{aligned}$$

Lämpötekniset ominaisuudet

katteen U-arvo (ei lumen/säteilyn vaikutusta!)

YP-rakenteen U-arvo

Konetilan US-rakenteen U-arvo

$$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \rho_{\text{kk}} := 1000 \frac{\text{J} \cdot \text{kg}}{\text{C}}$$

ilman tiheys ja ominaislämpö

$$\begin{aligned} v_{k_tr} &:= v_k(T_{tr}) = 0.912 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \\ U_{yp} &:= 0.072 \end{aligned}$$

$$(\Delta v := v_{k_tr} - v_u = 0.08 \frac{\text{g}}{\text{m}^3})$$

kosteuspitoisuusarvot
(käsin syöttö)

$$f \quad \xi_{\text{dif_m2}} := 2.46 \times 10^{-6} \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

kosteustuotto asuintiloista huomioidaan vain A_{yp1} puolella

kosteustuotto rakennusvirheen seurauksena

$$\xi_{\text{rakv_m2}} := 4.894 \times 10^{-4} \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

$$\xi_{\text{rakv_kaista}} := \xi_{\text{rakv_m2}} \cdot A_{yp1} \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

kosteustuotto sekunnissa kaistan alueella (rak. virhe)

$$\eta := (17.1 + 0.0049 \cdot T_{tr}) \cdot 10^{-6} = 1.7 \times 10^{-5} \quad \text{ilman viskositeetti (Bjorkholtz 6.19)}$$

$$\xi_{\text{dif_kaista}} := \xi_{\text{dif_m2}} \cdot A_{yp1} \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

kosteustuotto sekunnissa kaistan alueella (diffuusio)

Tuuletusraon olosuhteet (arvaus)

$$\begin{aligned} T_{tr} &:= -19.5 \\ \Delta T_1 &:= T_s - T_{tr} \quad C, \text{ sisätilan ja tuuletusraon välinen lämpötilaero} \\ \Delta T' &:= T_{tr} - T_u = 0.5 \quad C, \text{ lämpötilaero tuuletusraon päissä} \\ v_{tr} &:= v_u \end{aligned}$$

Geometria (yksikkö 1m)

d := 0.552 tuuletusraon pituus

b₁ := 0.15 tuuletusraon leveys (korkeus) yläpohjan kohdalla
(alustavasti oletetaan koko rakenteen leveydeksi)

b₃ := 0.1 tuuletusraon leveys (korkeus) US-rakenteen kohdalla

L₁ := 7.3 tuuletusraon kaistapituus asuintilojen yläpuolella

L₂ := 3.5 tuuletusraon kaistapituus konetilan yläpuolella

L₃ := 1.85 tuuletusraon kaistapituus konetilan US kohdalla

h := 2.75 tuuletusraon päiden korkeusero

$$A_{yp1} := d \cdot L_1 \quad A_{yp2} := d \cdot L_2 \quad A_{us} := d \cdot L_3$$

$$A_{\text{kk}} := L_1 + L_2 + L_3 = 12.65 \text{ tuuletusraon kokonaispituus}$$

$$V_{\text{kk}} := (A_{yp1} + A_{yp2}) \cdot b_1 + A_{us} \cdot b_1 \quad \text{tuuletusraon kokonaistilavuus}$$

Riittävän tuuletuksen ehto kaistalla (diffuusio)

$$Q_{\text{tarv_dif}} := \frac{g_{\text{dif_kaista}}}{\Delta v} = 1.242 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_{\text{h_tarv_dif}} := Q_{\text{tarv_dif}} \cdot 3600 = 0.447 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$n_{\text{tarv_dif}} := \frac{Q_{\text{h_tarv_dif}}}{V} = 0.427 \frac{1}{\text{h}}$$

$$v_{\text{tarv}} := \frac{Q_{\text{tarv_dif}}}{d \cdot b \cdot l} = 1.5 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Riittävän tuuletuksen ehto kaistalla (rakennusvirhe)

$$Q_{\text{tarv_rakv}} := \frac{g_{\text{rakv_kaista}}}{\Delta v} = 0.025 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_{\text{h_tarv_rakv}} := Q_{\text{tarv_rakv}} \cdot 3600 = 88.977 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$n_{\text{tarv_rakv}} := \frac{Q_{\text{h_tarv_rakv}}}{V} = 84.949 \frac{1}{\text{h}}$$

$$v_{\text{tarv_rakv}} := \frac{Q_{\text{tarv_rakv}}}{d \cdot b \cdot l} = 0.299 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

tarvitavat tuuletusilmamäärät sekunnissa ja tunnissa, jotta tuuletusilma pystyy sitomaan määräävän kosteustilanteen kosteustuottoa

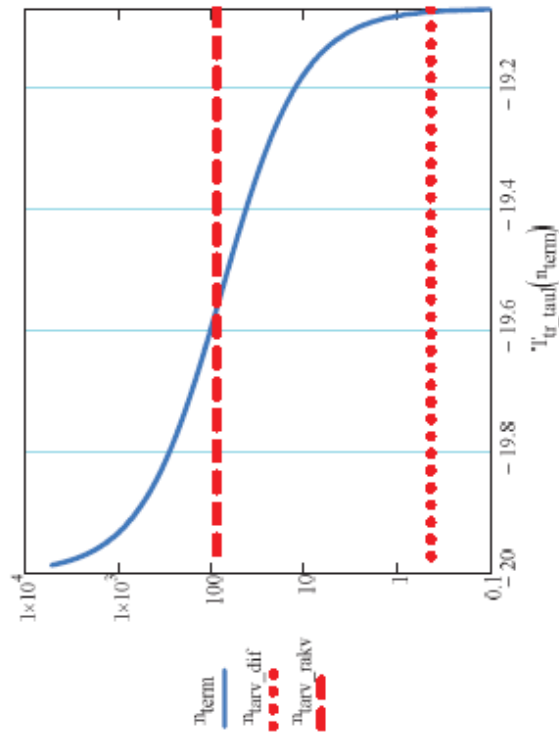
tarvitavaa tuuletusilmamäärää vastaava ilmanvaihtoluku

ilman riittävä liikkumisnopeus yläpohjan kohdalla

$$T_{\text{tr_taul}}(n_{\text{term}}) := \left[\frac{U_{\text{vk}} \cdot (A_{\text{yp1}} + A_{\text{yp2}} + A_{\text{us}}) + \frac{\rho \cdot c \cdot n_{\text{term}} \cdot V}{3600} \cdot T_{\text{u}}}{1 + \frac{U_{\text{yp}} \cdot (A_{\text{yp1}} + A_{\text{yp2}}) + U_{\text{us}} \cdot A_{\text{us}}}{U_{\text{vk}} \cdot (A_{\text{yp1}} + A_{\text{yp2}} + A_{\text{us}}) + \frac{\rho \cdot c \cdot n_{\text{term}} \cdot V}{3600}}} \right] \quad (\text{Björkholtz 3.15})$$

$n_{\text{term}} := 0,01 \dots 50000 \frac{1}{\text{h}}$ ilmanvaihtuvuuden tarkastusalue

Kaavio 1



Kaavio 1 selitys:

y-akseli on tuuletusraon ilmavaihtoluku $n = \frac{Q}{V}$

x-akseli on lämpötila tuuletusraossa $T_{\text{tr_taul}}$

Sininen viiva esittää ilmavaihtuvuuden n_{term} ja tuuletustilan lämpötilan $T_{\text{tr_taul}}$ keskinäisen riippuvuuden jota saadaan kaavasta (Björkholtz 3.15)

Punainen pisteiviiva esittää sisätiloista diffuusiolta kulkeutuvan (normaali käyttötilanne) kosteuden määrää nähden riittävä tuuletustaso.

Punainen katkoviiva esittää höyrynsulun pinnasta rakennusvihtilanteessa (diffuusiolta) kulkeutuvan kosteuden määrää nähden riittävä tuuletustaso.

Selvitettävä: painovoimainen tuuletus VS "kanaviston" paine-häviöt

"Kertavastusten aiheuttamien painehäviöiden laskeminen teoreettisesti on hankalaa. Usein joudutaan turvautumaan kokeisiin."

Laskennan epävarmuustekijät

- Painovoimaisen tuuletuksen vaihtelut
- kattopinnan säätelyämitys
 - kattopinnan eristystaso (lumpelton vaihtelut)
 - tuulensuunnat

Kanaviston paine-häviöt

- kasvaa jyrkästi ilman liikkumisnopeuden kasvaessa
- turbulenssialueilla (mm. mutkien alueilla) pinnan karheuden vaikutus pelaa
- "kanaviston" suoran osuuden paine-häviöt (oletettu 0...)

Esim. LINDAB ilmastointikanava 150*600 **Tekn.esite**

Vastaava halkaisija $d_0 := 0,31$ m (ilmamäärän määräämä)

Hydraulinen halkaisija $d_h := 0,24$ m (ilmavirran nopeuden määräämä)

Painehäviöläskelmissä määritellään kertavastukset käyttäen suurempaa laskennallista nopeutta kaavasta

$$v = \frac{Q_d}{A_{\text{(kaistan_poikkileikkaus)}}} = \frac{Q_d}{\pi \cdot \left(\frac{d_0}{2}\right)^2}$$

Kertavastuskertoimet oppikirjasta (irkastetaan jatkossa mallintamalla):

Suora kulma: $\zeta_{90} := 1,50$

Pyöristetty mutka: $\zeta_{90_käyrä} := 0,3$

Poikkileikkauksen pienentäminen: $\zeta_{\text{pieni}} := 0,7$

Poikkileikkauksen kasvattaminen: $\zeta_{\text{suurent}} := 0,2$

Kertavastuskertoimen arvot likimäärin

Kuva saatavilla lähteestä:

Seppänen, Olli. 1996. Ilmastointiteknikka ja sisäilmasto. Helsinki: Suomen LVI-yhdistysten Liitto

Laskennallinen tasapaino 90-kulman mutkilla: kulku

$\Delta p_{\text{term}} := 0.043 \cdot h \cdot \Delta T = 0.059$ termien paine-ero, esim Eimarsson & Nevander, Fuktanbok kaava 73.11 (muutkin kaavat eri lähteissä)

$v = \frac{Q_d}{\pi \left(\frac{d_0}{2} \right)^2}$ ilman liikkumisen nopeus tasapainotilanteessa

$\Delta p_{\text{kertavastukset}} = 0.5(2590) \cdot \rho \cdot v^2$ P_a , kertavastusten painehäviö (290 asteen mutkaa otettu huomioon)

Tuuletustilan ylä- ja alapäiden paine-eroa tasapainotilanteessa määrävät siis terminen paine-ero Δp_{term} ja kertavastusten aiheuttama paine-ero $\Delta p_{\text{kertavastukset}}$

$\Delta p_d = \Delta p_{\text{term}} - \Delta p_{\text{kertavastukset}}$

Tuuletus tapahtuu siis, kun termien paine-ero Δp_{term} on suurempi, kuin kertavastusten aiheuttama negatiivinen paine-ero $\Delta p_{\text{kertavastukset}}$

$\Delta p_d = \Delta p_{\text{term}} - 0.5(2590) \cdot \rho \cdot v^2$

$\Delta p_d = \Delta p_{\text{term}} - 0.5(2590) \cdot \rho \cdot \left[\frac{Q_d}{\pi \left(\frac{d_0}{2} \right)^2} \right]^2$

Kertavastusten paine-ero on riippuvainen ilman liikkumisnopeudesta ja näin tuuletusilmamäärästä Q_d

Samalla ilmaan tuuletusilmamäärä määräytyy paine-eron mukaan:

$Q_d = \frac{d \cdot b_1^3 \cdot \Delta p}{12 \cdot \eta \cdot L} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$, tuuletusilmamäärä sekunnissa tasapainotilanteessa (Björkholtz 8.15), mistä saadaan

$\Delta p_d = \frac{12 \cdot Q_d \cdot \eta \cdot L}{d \cdot b_1^3}$

Näin tuuletusilmamäärä tasapainotilanteessa löytyy molempien ehtojen toteutuessa yhtälöstä $\Delta p_{\text{term}} - 0.5(2590) \cdot \rho \cdot \left[\frac{Q_d}{\pi \left(\frac{d_0}{2} \right)^2} \right]^2 = \frac{12 \cdot Q_d \cdot \eta \cdot L}{d \cdot b_1^3}$

jota saadaan ratkaistua $Q_a := 1$ $P_a := 1$ Given $P_a = \frac{12 \cdot Q_a \cdot \eta \cdot L}{d \cdot b_1^3}$ $P_a = \Delta p_{\text{term}} - 0.5(2590) \cdot \rho \cdot \left[\frac{Q_a}{\pi \left(\frac{d_0}{2} \right)^2} \right]^2$ arvoilla $\begin{pmatrix} Q_d \\ \Delta p_d \end{pmatrix} := \text{Find}(Q_a, P_a) = \begin{pmatrix} 0.011 \\ 0.016 \end{pmatrix}$

Rakennesien painehäviöt

Kaivoiden suuret

Q_d on tuuletusraon tuuletusilmamäärä, jolle on määritetty arvot välillä $Q_{d_taul} := 0,0.001 \dots 0,5 \frac{m^3}{s}$

y-akseli on paine-eron arvot, Pa.

$$v(Q_{d_taul}) := \frac{Q_d}{b_1 \cdot d} \frac{m}{s} \quad \text{virtausnopeus 15cm korkeassa ilmarauassa}$$

$$n_d(Q_{d_taul}) := \frac{3600 Q_{d_taul}}{V} \frac{1}{h} \quad \text{tuuletusraon ilmanvaihtoluku}$$

$$P_{d_ventiili2}(Q_{d_taul}) := 0.0022 \cdot \left(\frac{Q_{d_taul}}{2} \right)^{1.728106} \quad Pa$$

2*36mm onteloventtiilin painehäviö, interpoloitu 0.55m raolle valmistajan datasta 0,375 ja 1,0m koepuhalluksista
Venttiilit ruuvattu yhteen varerin kautta (ohjeet valmistajalta)

$$P_{d_ventiili1}(Q_{d_taul}) := 0.0022 \cdot \left(\frac{Q_{d_taul}}{2} \right)^{1.728106} \quad Pa$$

36mm onteloventtiilin painehäviö, interpoloitu 0.55m raolle valmistajan datasta 0,375 ja 1,0m koepuhalluksista
Venttiilit ruuvattu yhteen varerin kautta (ohjeet valmistajalta)

$$P_{d_räystäs0x}(Q_{d_taul}) := 1 \cdot \left(\frac{Q_{d_taul}}{0.15 \cdot 0.552} \right)^3 + 0.798 \cdot \frac{Q_{d_taul}}{0.15 \cdot 0.552} \quad Pa$$

Pa Simuloinnista haettu räystäsdetaljin painehäviön kaava, ei venttiili

$$P_{d_räystäs2k}(Q_{d_taul}) := 511 \cdot \left(\frac{Q_{d_taul}}{0.15 \cdot 0.552} \right)^4 + 0.1603 \cdot \left(\frac{Q_{d_taul}}{0.15 \cdot 0.552} \right)^3$$

Simuloinnista haettu, interpoloitu räystäsdetaljin painehäviön kaava, kun 2*36 onteloventtiili mallinnettu 2x pinta-alavähennyksenä

$$P_{d_räystäs2s}(Q_{d_taul}) := 59 \cdot \left(\frac{Q_{d_taul}}{0.15 \cdot 0.552} \right)^3 - 51 \cdot \left(\frac{Q_{d_taul}}{0.15 \cdot 0.552} \right)^2 + 884 \cdot \frac{Q_{d_taul}}{0.15 \cdot 0.552} \quad Pa$$

Pa Simuloinnista haettu räystäsdetaljin painehäviön kaava, 2*36vent=

$$P_{d_räystäs1k}(Q_{d_taul}) := 1 \cdot \left(\frac{Q_{d_taul}}{0.15 \cdot 0.552} \right)^4 - 19 \cdot \left(\frac{Q_{d_taul}}{0.15 \cdot 0.552} \right)^3 + 3.778 \cdot \left(\frac{Q_{d_taul}}{0.15 \cdot 0.552} \right)^2 + 6.16094 \cdot \frac{Q_{d_taul}}{0.15 \cdot 0.552} \quad Pa$$

Simuloinnista haettu, interpoloitu räystäsdetaljin painehäviön kaava, kun 36 onteloventtiili mallinnettu pinta-alavähennyksenä

$$P_{d_räystäs1s}(Q_{d_taul}) := 7 \cdot \left(\frac{Q_{d_taul}}{0.15 \cdot 0.552} \right)^3 + 22 \cdot \left(\frac{Q_{d_taul}}{0.15 \cdot 0.552} \right)^2 + 621 \cdot \frac{Q_{d_taul}}{0.15 \cdot 0.552} \quad Pa$$

Simuloinnista haettu, interpoloitu räystäsdetaljin painehäviön kaava, 36mm venttiili mallinnettu "Screen"-toiminnolla

$$P_{d_90\text{mutka}}(Q_{d_taul}) := \left(\frac{Q_{d_taul}}{0.2 \cdot 0.222} \right)^3 + 2 \cdot \left(\frac{Q_{d_taul}}{0.15 \cdot 0.552} \right)^2$$

$$P_{d_90\text{teor}}(Q_{d_taul}) := 0.5 \zeta_{90} \rho \cdot \left[\frac{Q_{d_taul}}{\pi \cdot \left(\frac{d_0}{2} \right)^2} \right]^2$$

Teoreettiseen kertavastukseen perustuva 90 asteen mutkan painehäviön kaava

0.552 m levyisellä kaistalla imuloinnista haettu, interpoloitu 90 asteen mutkan painehäviön kaava

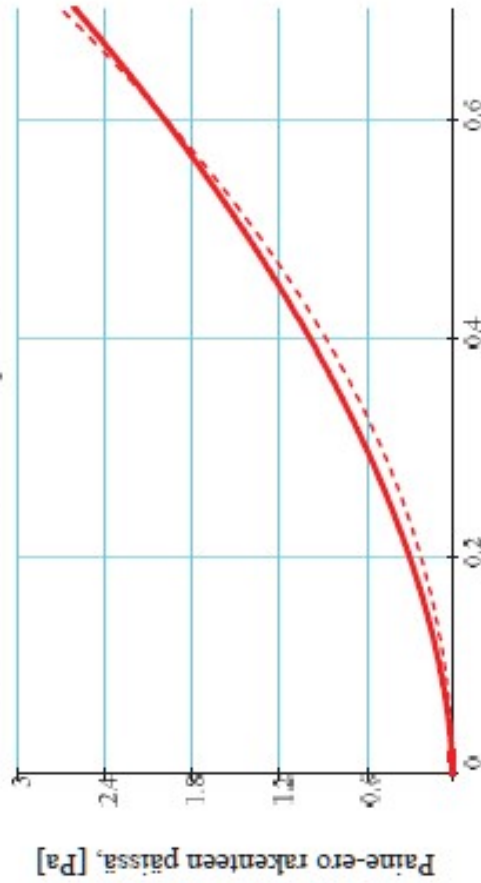
0.552 m levyisellä kaistalla

$$vv1 := 0.001 \dots 1$$

$$P_{d3_venttiili}(vv) := 0.003 \cdot (vv - 0.072 - 0.552 \cdot 1800)^{1.728106}$$

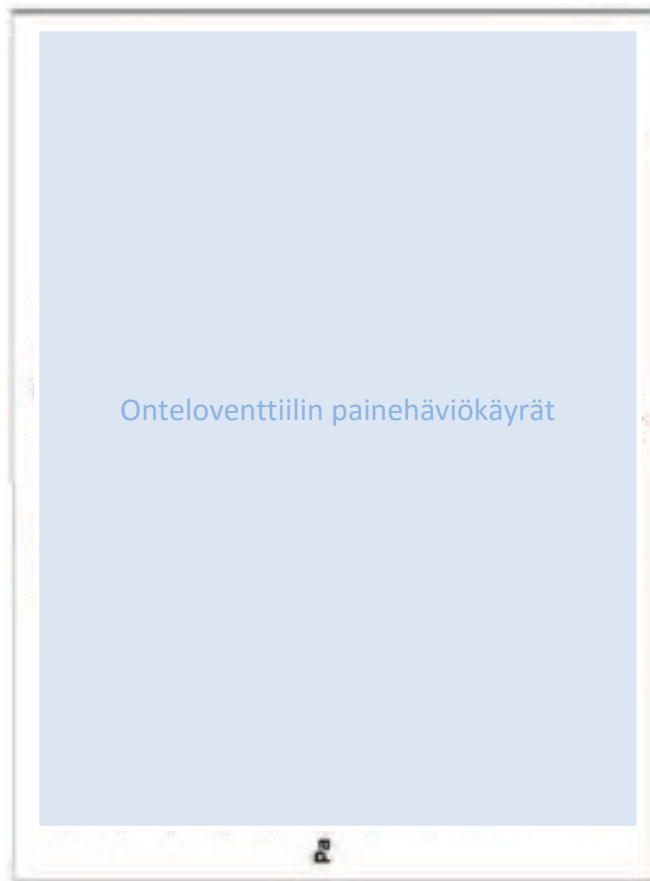
$$P_{d4_venttiili}(vv) := 5.5 \cdot (vv)^2$$

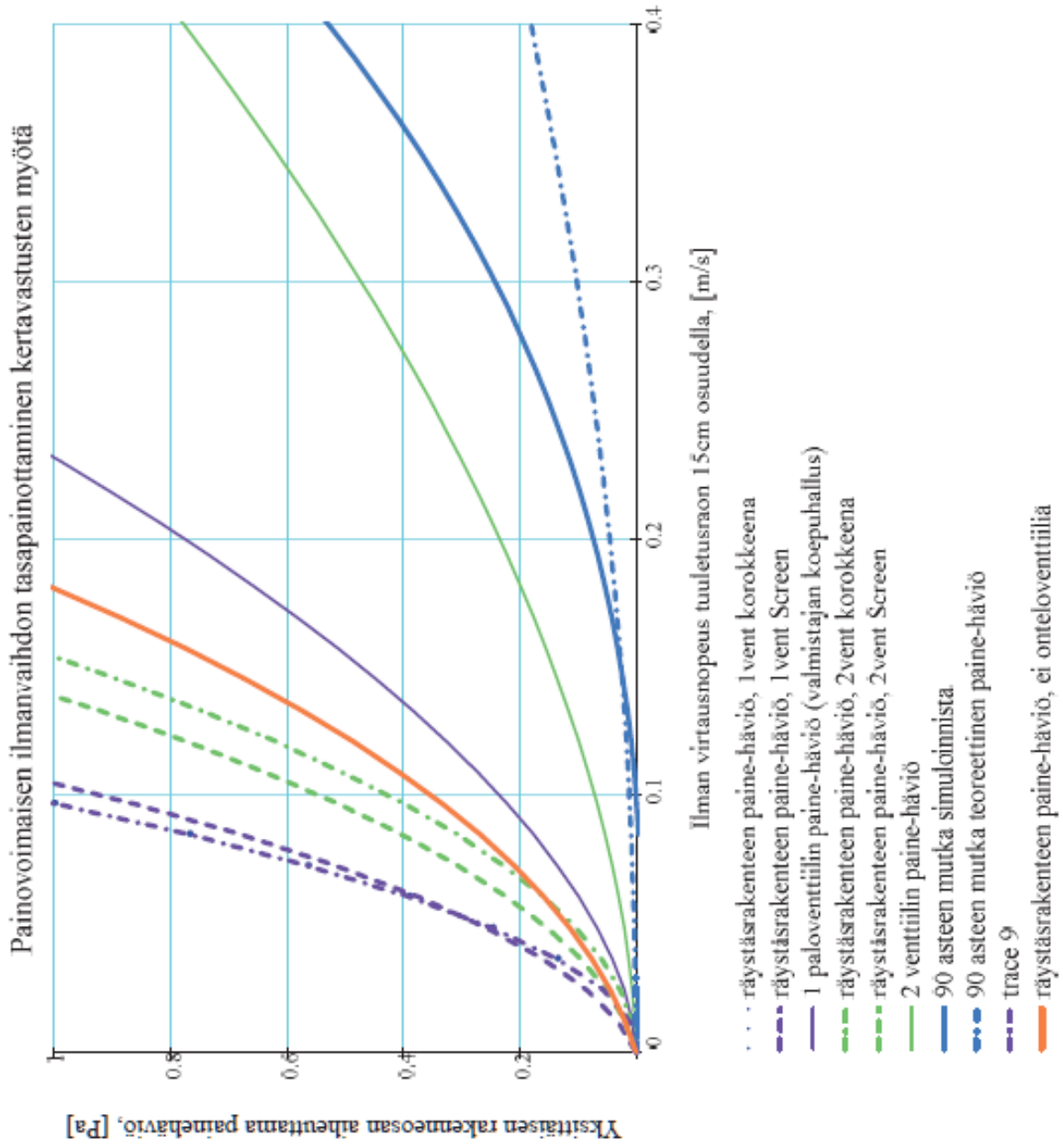
Parabolisen kaavan sopivuus, onteloventtiili



Ilman virtausnopeus tuuletusraon 15cm osuudella, [m/s]

- alkuperäinen kaava
- - - tarkastusajanassa likimain arvioitu parabolinen kaava





Lämmitysenergian tarve kitkan vastaanottamiseksi (tulo- ja poistoilman lämpötilaerot eri rakennosien aiheuttaman kitkan tasapainottajana)

$$\Delta T_{\text{räyst}_1\text{ ja }90(Q_d_{\text{taul}})} := \frac{\frac{12 \cdot Q_d_{\text{taul}}^{\eta \cdot L}}{d \cdot b_1^3} + P_d_{\text{räyst}_2k}(Q_d_{\text{taul}}) + P_d_{90\text{mutka}}(Q_d_{\text{taul}})}{0.043 \cdot h}$$

$$\Delta T_{90(Q_d_{\text{taul}})} := \frac{12 \cdot Q_d_{\text{taul}}^{\eta \cdot L}}{d \cdot b_1^3} + P_d_{90\text{mutka}}(Q_d_{\text{taul}})}{(0.043 \cdot h)}$$

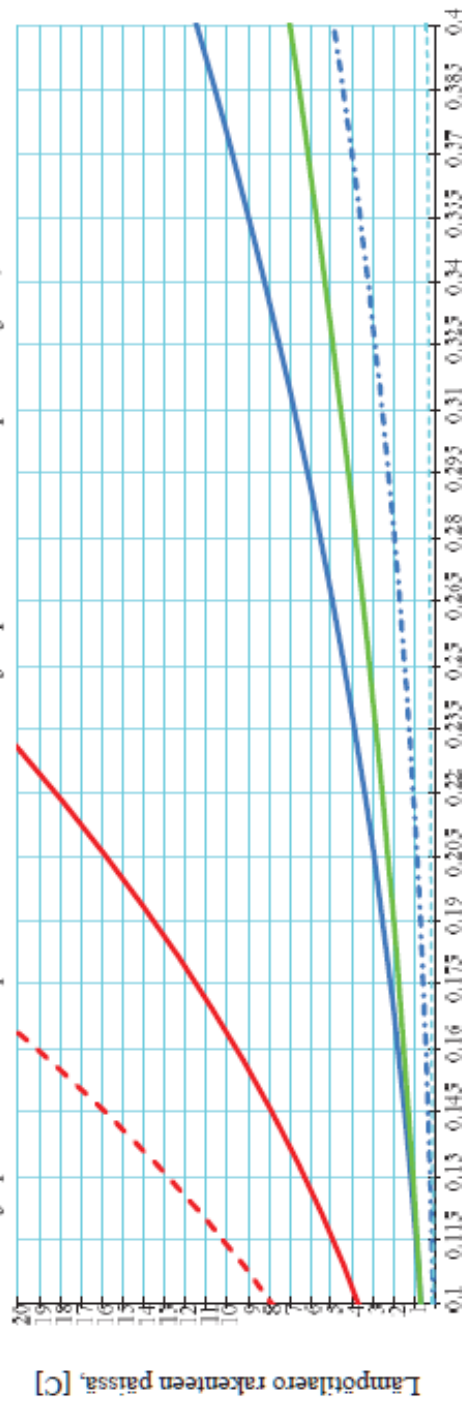
$$\Delta T_{\text{venttiili2}(Q_d_{\text{taul}})} := \frac{12 \cdot Q_d_{\text{taul}}^{\eta \cdot L}}{d \cdot b_1^3} + P_d_{\text{venttiili2}}(Q_d_{\text{taul}}) + P_d_{90\text{mutka}}(Q_d_{\text{taul}})}$$

$$\Delta T_{\text{venttiili1 ja }90(Q_d_{\text{taul}})} := \frac{\quad}{(0.043 \cdot h)}$$

$$\Delta T_{\text{ei_kitka}}(Q_d_{\text{taul}}) := \frac{12 \cdot Q_d_{\text{taul}}^{\eta \cdot L}}{d \cdot b_1^3} + P_d_{\text{räyst}_1s}(Q_d_{\text{taul}}) + P_d_{90\text{mutka}}(Q_d_{\text{taul}})}$$

$$\Delta T_{\text{venttiili}(Q_d_{\text{taul}})} := \frac{\Delta T_{\text{räyst}_1\text{ ja }90(Q_d_{\text{taul}})} + P_d_{90\text{mutka}}(Q_d_{\text{taul}})}{(0.043 \cdot h)}$$

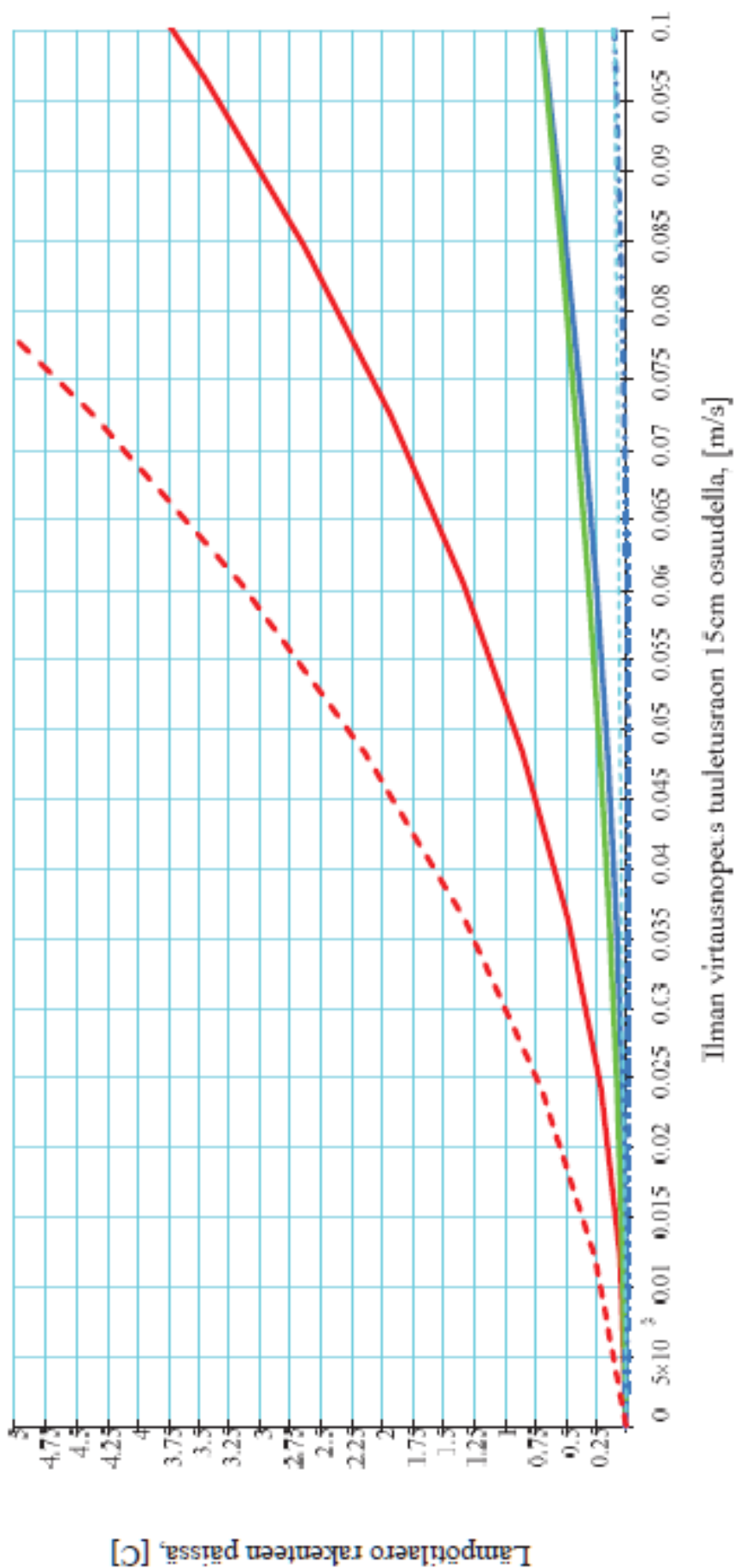
Tulo- ja poistoilman lämpötilaero rakennerratkaisujen painehäviön tasapainottajana, turbulenssivirtaus



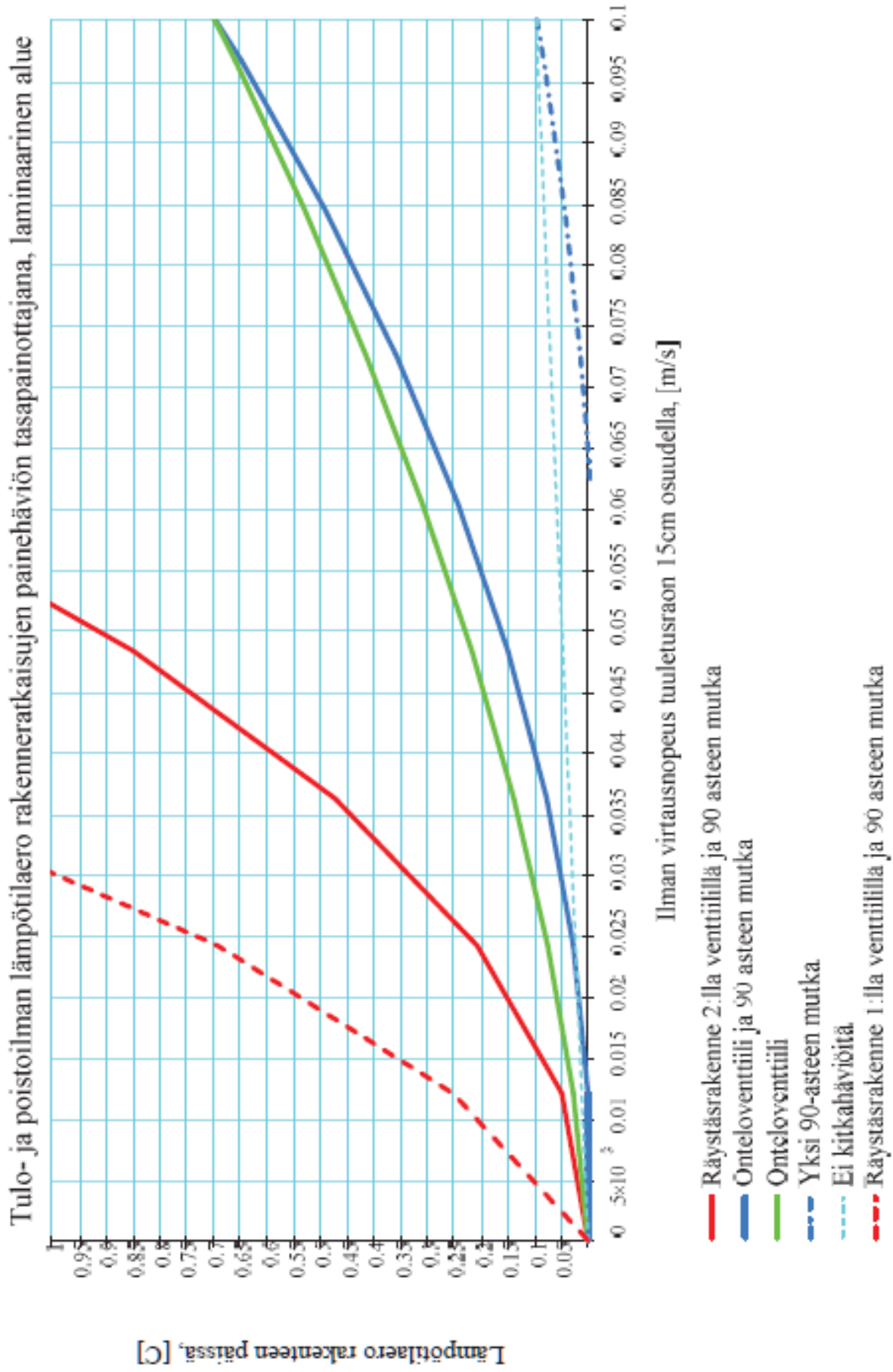
Ilman virtausnopeus tuuletusraon 15cm osuudella, [m/s]

- Räystäs rakenne 2 lla venttiilillä ja 90 asteen mutka
- Onteloveintiili ja 90 asteen mutka
- Onteloveintiili
- - - Yksi 90-asteen mutka
- · - · - Ei kitkahäviöitä
- · - · - Räystäs rakenne 1 lla venttiilillä ja 90 asteen mutka

Tulo- ja poistoilman lämpötilaero rakenneratkaisujen painehäviön tasapainottajana, laminaarinen alue



- Räystäsrakenne 2:lla venttiilillä ja 90 asteen mutka
- Onteloventtiili ja 90 asteen mutka
- Onteloventtiili
- ⋯ Yksi 90-asteen mutka
- - - Ei kitkahäviöitä
- ⋯ Räystäsrakenne 1:lla venttiilillä ja 90 asteen mutka



Jatkuvien samansuuntaisten pintojen välinen pitkä-aaltoinen säteily

$$\varepsilon_{12} := \frac{2}{0.95} - 1$$

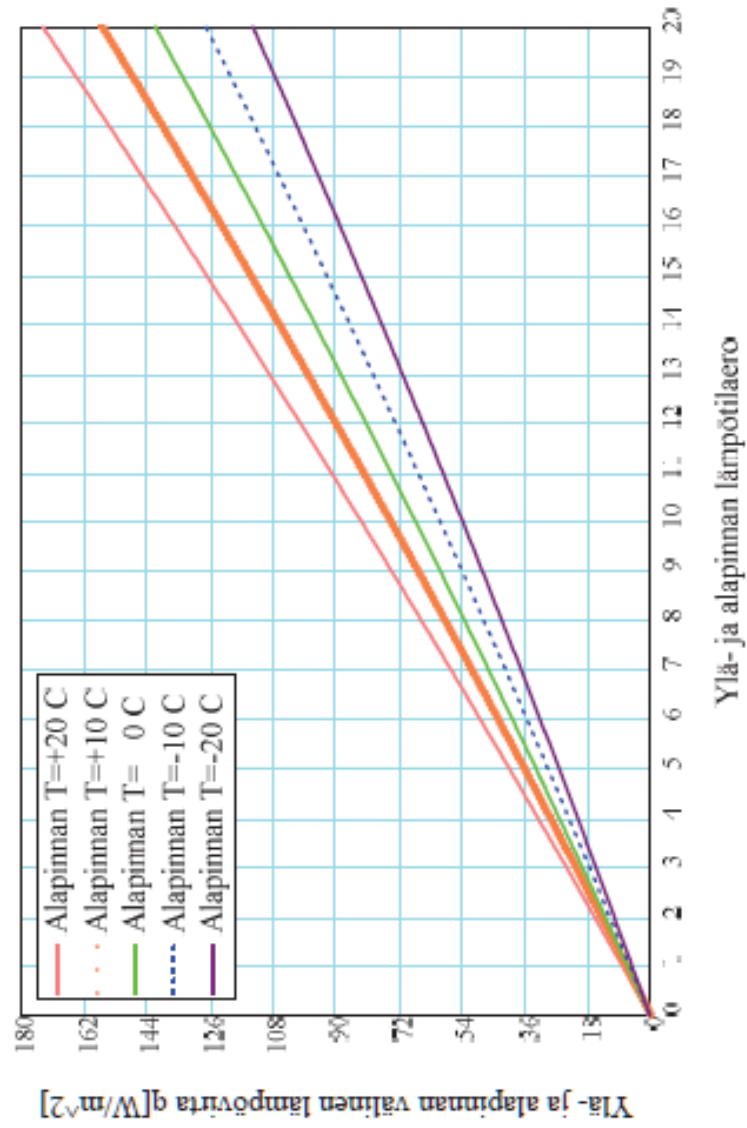
$$\sigma := 5.76 \cdot 10^{-8}$$

$$a_q(T, dT) := 4\varepsilon_{12} \cdot \sigma \cdot \left(1 + \frac{dT}{2}\right)^3$$

$$dT := 0, 0.1 .. 20$$

$$a_q(253, 10) = 5.353$$

$$q_q(T, dT) := a_q(T, dT) \cdot dT$$



Kosteusvirtaus rakenteessa. Mathcad-analyysi.

Palvelusivu

Ilman kylästysvesihöyrypitoisuus lämpötilan funktiona, [$\frac{g}{m^3}$]

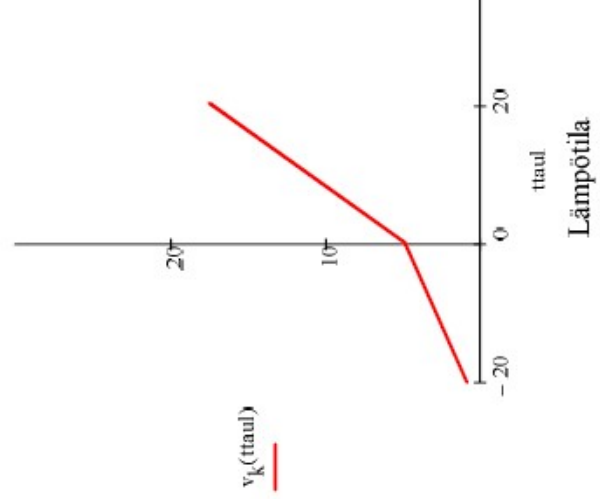
$$v_k(T) := 4.85 + 3.47 \cdot \left(\frac{T}{10}\right)^2 + 0.945 \cdot \left(\frac{T}{10}\right)^3 + 0.158 \cdot \left(\frac{T}{10}\right)^4 + 0.0281 \cdot \left(\frac{T}{10}\right)^5$$

RafNet Koosteus K3.3

taul := -20, 0, 1 .. 40 [C], kaavassa käsitely lämpötilakaista kaaviota varten

t (°C)	v _k (g/m ³)	p _{wk} (Pa)	t (°C)	v _k (g/m ³)	p _{wk} (Pa)	t (°C)	v _k (g/m ³)	p _{wk} (Pa)	t (°C)	v _k (g/m ³)	p _{wk} (Pa)
-20	0,88	102	1	5,21	658	22	19,40	2640	43	59,41	8663
-19	0,95	111	2	5,58	708	23	20,54	2805	44	62,40	9128
-18	1,04	122	3	5,98	762	24	21,74	2879	45	65,52	9614
-17	1,14	135	4	6,40	818	25	23,00	3162	46	68,77	10122
-16	1,25	149	5	6,84	878	26	24,32	3355	47	72,15	10653
-15	1,38	164	6	7,31	941	27	25,71	3559	48	75,67	11207
-14	1,52	181	7	7,80	1008	28	27,17	3773	49	79,33	11786
-13	1,67	200	8	8,32	1079	29	28,70	3999	50	83,14	12390
-12	1,83	221	9	8,87	1154	30	30,31	4237	51	87,10	13020
-11	2,01	243	10	9,45	1234	31	31,99	4487	52	91,21	13677
-10	2,20	266	11	10,06	1318	32	33,75	4750	53	95,48	14362
-9	2,40	292	12	10,71	1408	33	35,60	5027	54	99,92	15075
-8	2,61	319	13	11,39	1502	34	37,54	5317	55	104,52	15818
-7	2,84	348	14	12,10	1603	35	39,56	5622	56	109,30	16592
-6	3,08	379	15	12,86	1708	36	41,68	5943	57	114,25	17397
-5	3,33	412	16	13,65	1820	37	43,90	6279	58	119,39	18234
-4	3,60	447	17	14,49	1939	38	46,21	6631	59	124,72	19105
-3	3,89	485	18	15,37	2064	39	48,63	7001	60	130,24	20010
-2	4,19	524	19	16,30	2197	40	51,16	7388	61	135,95	20951
-1	4,51	566	20	17,28	2337	41	53,79	7793	62	141,87	21928
0	4,85	611	21	18,31	2484	42	56,54	8218	63	147,99	22943

Ilman kylästysvesihöyrypitoisuus



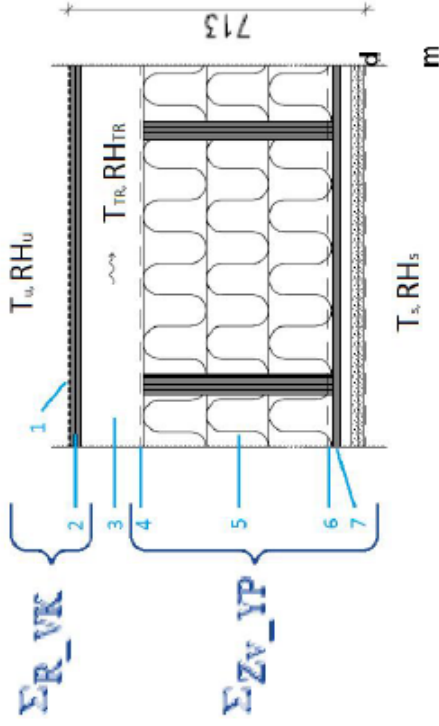
1.1 RAKENNEKUVAS

Sisäilman olosuhteet

$$T_s := 22$$

$$RH_{s_asunnot} := 0.5$$

$$v_s := v_k(T_s) \cdot RH_{s_asunnot} = 9.699$$



$$R_n = \frac{d_n}{\lambda_{d,n}} \quad (\text{Björkholtz 1.2 jne.})$$

$$R_{se} := 0.04 \quad \text{RakMk C4}$$

$$\Lambda_{d,n} = \frac{Z_{v,n}}{W} \quad R_n = \frac{C \cdot m^2}{W}$$

	$\Lambda_{d,n}$	$Z_{v,n}$	R_n	
	$\frac{W}{C \cdot m}$	$\frac{s}{m}$	$\frac{C \cdot m^2}{W}$	
1. VE 60 esim. 2*TL2	$\lambda_{d,1} := 0.006$	$Z_{v,1} := 40 \cdot 10^6$	$R_1 := \frac{d_1}{\lambda_{d,1}}$	Esim. Icopal Polar tuotekortti
2. LVL 25mm	$\lambda_{d,2} := 0.025$	$Z_{v,2} := 65 \cdot 10^3$	$R_2 := \frac{d_2}{\lambda_{d,2}}$	Esim. Metsäwood LVL tuotekortti
3. Tuuletustia	$d_3 := 0.150$			
4. Tuulensuojapaperi	$d_4 := 0.0003$	$Z_{v,4} := 2.8 \cdot 10^3$		Esim. Ecovilla x5 tuotekortti
5. Mineraalivilla 450mm	$d_5 := 0.450$	$Z_{v,5} := 36 \cdot 10^3$	$R_5 := \frac{d_5}{\lambda_{d,5}}$	
6. Höyrynsulku	$d_6 := 0.0002$	$Z_{v, \text{muovi}} := 3.5 \cdot 10^6$		0.2mm muovikalvon höyrynsulku
7. LVL 25mm	$\lambda_{d,7} := 0.025$	$Z_{v,7} := 65 \cdot 10^3$	$R_7 := \frac{d_7}{\lambda_{d,7}}$	Esim. Metsäwood LVL tuotekortti

$$R_{si_alas} := 0.17 \quad R_{si_ylos} := 0.1 \quad R_{si_vaaka} := 0.13 \quad \text{RakMk C4}$$

Lämpötekniset ominaisuudet

$U_{vk} := 3.812$ kattoen U-arvo (ei lumen/säteilyn vaikutusta!)

$U_{yp} := 0.072$ YP-rakenteen U-arvo

$U_{us} := 0.17$ Konetilan US-rakenteen U-arvo

$\rho := 1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ $\rho_s := 1000 \frac{\text{J}\cdot\text{kg}}{\text{C}}$ ilman tiheys ja ominaislämpö

Geometria (yksikkö 1m)

$d := 0.552$ tuuletusraon pituus

$b_1 := 0.15$ tuuletusraon leveys (korkeus) yläpohjan kohdalla (alustavasti oletetaan koko rakenteen leveydeksi)

$b_3 := 0.1$ tuuletusraon leveys (korkeus) US-rakenteen kohdalla

$L_1 := 7.3$ tuuletusraon kaistapituus asuintilojen yläpuolella

$L_2 := 3.5$ tuuletusraon kaistapituus konetilan yläpuolella

$L_3 := 1.85$ tuuletusraon kaistapituus konetilan US kohdalla

$h := 2.2$ tuuletusraon päiden korkeusero

$A_{yp1} := d \cdot L_1$ $A_{yp2} := d \cdot L_2$ $A_{us} := d \cdot L_3$

$L := L_1 + L_2 + L_3 = 12.65$ tuuletusraon kokonaispituus

$V := (A_{yp1} + A_{yp2}) \cdot b_1 + A_{us} \cdot b_1$ tuuletusraon kokonaistilavuus

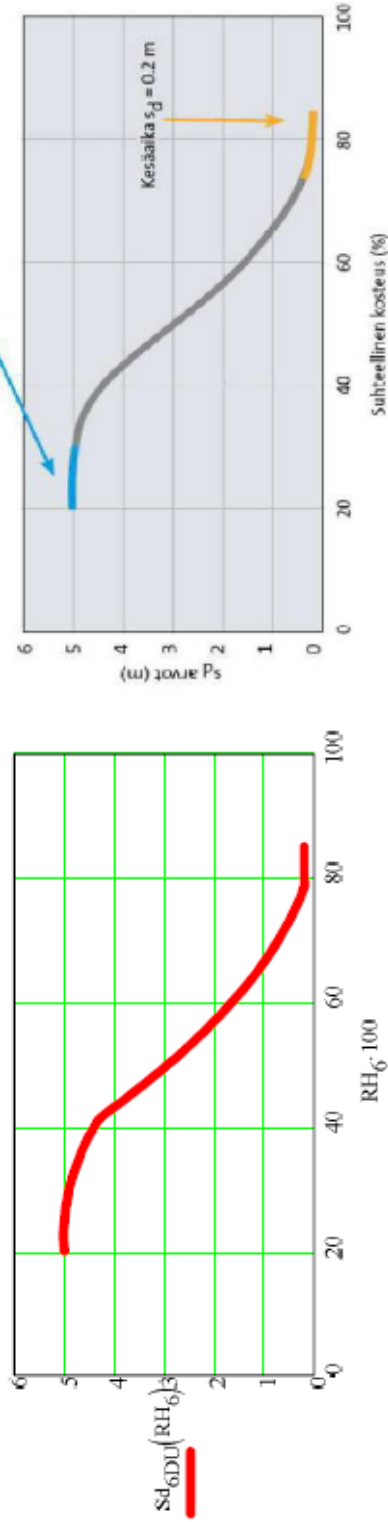
1.1.1 Dynaamisesti toimivan höyrynsulun ominaisuudet

$RH_6 := 0,001...1$ Suhteellisen kosteuden vaihtelu 0...10% välillä kuvaajaa varten

$$Sd_{6DU}(RH_6) := \begin{cases} -20 \cdot RH_6^2 + 9 \cdot RH_6 + 4 & \text{if } 0.415 \geq RH_6 \geq 0.2 \\ 17.5 \cdot RH_6^2 - 32.05 \cdot RH_6 + 14.57 & \text{if } 0.8 \geq RH_6 \geq 0.415 \\ 0.2 & \text{if } 0.85 \geq RH_6 \geq 0.8 \end{cases}$$

Höyrynsulun diffuusiovastuksen S_d (m) arvojen interpoloidut kaavat **tuotekortissa** esitetyn kuvaajan perusteella.

Kaavio1. interpoloidun kaavan mukainen kuvaaja (vas) ja tuotekortissa esitetty kuvaaja (oik)



$$\delta_{v_ilma} := 135.2 \cdot 10^{-3} \cdot (164.2 + 1.04 \cdot T_s) \cdot 10^{-12} = 2.529 \times 10^{-5} \text{ ilman vesihöyryläpäisevyyden arvo lämpimän tilan puolella}$$

$$Z_{v_DU}(RH_6) := \frac{Sd_{6DU}(RH_6)}{\delta_{v_ilma}} \quad \frac{s}{m} \quad \text{on höyrynsulun dynaaminen vesihöyryvastus suhteellisen kosteuden funktiona}$$

$$\Sigma R_{VK} := R_{se} + R_1 + R_2 = 0.26 \cdot \frac{C \cdot m^2}{W} \quad U_{VK} := \frac{1}{\Sigma R_{VK}} = 3.812 \quad \frac{W}{C \cdot m^2} \quad \text{Vesikatteen lämmönvastus ja U-arvo}$$

$$\Sigma R_{YP} := R_5 + R_7 + R_{si_ylös} = 13.92 \cdot \frac{C \cdot m^2}{W} \quad U_{YP} := \frac{1}{\Sigma R_{YP}} = 0.072 \quad \frac{W}{C \cdot m^2} \quad \text{Maapohjan (vesikatettu lukuun ottamatta) lämmönvastus ja U-arvo (Björkholtz 2.1 ja 2.2)}$$

Dynaamisen tarkastelun arvot ja kaavat

$$RH_A := 0.5$$

RH ulkona

$$RH_B := 0.9$$

$$T_{u1} := -20, 0.5 \dots 27 \text{ C, ulkolämpötilän tarkastusalue}$$

$$\begin{aligned} \eta_{term1} &:= 200 && \frac{1}{h} && \text{ilm. vaihtuvuus, tapaus 1} \\ \eta_{term2} &:= 50 && \frac{1}{h} && \text{ilm. vaihtuvuus, tapaus 2} \\ \eta_{term3} &:= 5 && \frac{1}{h} && \text{ilm. vaihtuvuus, tapaus 3} \\ \eta_{term4} &:= 0.2 && \frac{1}{h} && \text{ilm. vaihtuvuus, tapaus 4} \end{aligned}$$

(Björkholtz 3.15)

$$UR2 := \frac{1}{0.17 + \frac{0.02}{0.023} + \frac{0.025}{0.12}} = 0.801$$

$$T_{tr}(n, T) := \left[\frac{T_s - \left[\frac{U_{vk} \cdot (A_{yp1} + A_{us}) + \frac{\rho \cdot c \cdot n \cdot V}{3600}}{(U_{yp} \cdot A_{yp1} + U_{us} \cdot A_{us})} \cdot T \right]}{1 + \left[\frac{U_{vk} \cdot (A_{yp1} + A_{us}) + \frac{\rho \cdot c \cdot n \cdot V}{3600}}{(U_{yp} \cdot A_{yp1} + U_{us} \cdot A_{us})} \right]} \right]$$

esimerkiksi $T_{tr}(1, 0) = 0.508$

Riittävän tuuletuksen ehto kaistalla (diffuusio)

$$\Delta v_{tuuletus}(n, T, RH) := v_k(T_{tr}(n, T)) - v_k(T) \cdot RH$$

$$Q_{tarv}(n, g, T, RH) := \frac{g(T) \cdot A_{yp1}}{v_k(T_{tr}(n, T)) - v_k(T) \cdot RH} \quad \frac{m^3}{s}$$

$$Q_{h_tarv}(n, g, T, RH) := \frac{3600 \cdot g(T) \cdot A_{yp1}}{v_k(T_{tr}(n, T)) - v_k(T) \cdot RH} \quad \frac{m^3}{h}$$

$$\eta_{tarv}(n, g, T, RH) := \frac{3600 \cdot g(T) \cdot A_{yp1}}{V \cdot (v_k(T_{tr}(n, T)) - v_k(T) \cdot RH)} \quad \frac{1}{h}$$

$$v_{tarv}(n, g, T, RH) := \frac{3600 \cdot g(T) \cdot A_{yp1}}{d \cdot b_1 \cdot (v_k(T_{tr}(n, T)) - v_k(T) \cdot RH)} \quad \frac{m}{s}$$

$$v(n) := n \cdot \frac{L}{3600} \quad \frac{m}{s} \quad \text{Virtausnopeus tuuletusraossa määrätyn ilm. vaihtoluvun funktiona}$$

Lämpötila höyrynsulun tasolla rakennusvirhelaskelmia varten:

$$T_{hs_rakv}(n, T) := T_s - \frac{(T_s - T_{tr}(n, T)) \cdot (R_{si_ylös} + R_7)}{\Sigma R_{YP}}$$

1.2 KOSTEUSRASITUKSET

1.2.1 Normaalikäytön aikainen tavanomainen kosteusrasitus

Ulkoilman olosuhteet	Sisäilman olosuhteet (täydennys)	Tuuletusraon olosuhteet (arvaus)
$T_u := -20$ $RH_u := 0.95$ $v_u := v_k(T_u) \cdot RH_u = 0.832$	$v_{\text{lisä}} := 3$ $v_{s_teknitila} := v_u + v_{\text{lisä}} = 3.832$	$T_{\text{dekv}} := -19.3$ $\Delta T_1 := T_s - T_{\text{tr}}$ $v_{\text{tr}} := v_u$

$\Delta v := v_s - v_{\text{tr}} = 8.867 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ on sisä- ja ulkoilman välinen kosteuspitoisuusero

1.2.1A&B Dynaaminen tarkastus, kosteuslisä 50% RH mukaan tai 5g/m3, riippujen kumpi on suurempi

$$\Delta v_{121A}(T) := \begin{cases} v_s - v_k(T) \cdot RH_A & \text{if } T \leq 10 \\ 5 & \text{if } T > 10 \end{cases} \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta v_{121B}(T) := \begin{cases} v_s - v_k(T) \cdot RH_B & \text{if } T \leq 0 \\ 5 & \text{if } T > 0 \end{cases}$$

$\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ on sisä- ja ulkoilman välinen kosteuspitoisuusero

$$RH_{s_asA}(T) := \begin{cases} 0.5 & \text{if } T \leq 10 \\ \frac{v_k(T) \cdot RH_A + 5}{v_k(T_s)} & \text{if } T > 10 \end{cases}$$

$$RH_{s_asB}(T) := \begin{cases} 0.5 & \text{if } T \leq 0 \\ \frac{v_k(T) \cdot RH_B + 5}{v_k(T_s)} & \text{if } T > 0 \end{cases}$$

1.2.1.1 Diffuusioliike muovisen höyrynsulun läpi

$$\Sigma_{ZV_YP_1} := Z_{V_4} + Z_{V_5} + Z_{V_muovi} + Z_{V_7} = 3.604 \times 10^6 \frac{s}{m} \quad \text{asuintilan ja tuuletusraon välisten rakennekerrosten yhteenlaskettu vesihöyrynvastus}$$

koosteustuotto sekunnissa /m² kosteustuotto kuukaudessa /m²

$$g_{YP_m2_1} := \frac{\Delta v}{\Sigma_{ZV_YP_1}} = 2.461 \times 10^{-6} \quad g_{YP_m2_1} := \frac{\Delta v}{\Sigma_{ZV_YP_1}} \cdot 2.6 \cdot 10^6 = 6.397 \quad \text{(Björkholtz 8.12)}$$

Riskialuekartoitus (ei kylmäsiirtovaikutuksia huomioitu)

$$T_4 := T_s - \frac{\Delta T_1 \cdot (R_{si_ylös} + R_7 + R_5)}{\Sigma_{R_YP}} = -19.3 \quad v_{4_1} := v_s - \frac{Z_{V_7} + Z_{V_muovi} + Z_{V_5} + Z_{V_4}}{\Sigma_{ZV_YP_1}} \cdot \Delta v = 0.832 \quad RH_{4_1} := \frac{v_{4_1}}{v_k(T_4)} = 90\%$$

$$T_5 := T_s - \frac{\Delta T_1 \cdot (R_{si_ylös} + R_7 + R_5)}{\Sigma_{R_YP}} = -19.3 \quad v_{5_1} := v_s - \frac{Z_{V_7} + Z_{V_muovi} + Z_{V_5}}{\Sigma_{ZV_YP_1}} \cdot \Delta v = 0.839 \quad RH_{5_1} := \frac{v_{5_1}}{v_k(T_5)} = 90\%$$

$$T_6 := T_s - \frac{\Delta T_1 \cdot (R_{si_ylös} + R_7)}{\Sigma_{R_YP}} = 21.133 \quad v_{6_1} := v_s - \frac{Z_{V_7} + Z_{V_muovi}}{\Sigma_{ZV_YP_1}} \cdot \Delta v = 0.927 \quad RH_{6_1} := \frac{v_{6_1}}{v_k(T_6)} = 5\%$$

$$T_7 := T_s - \frac{(R_{si_ylös})}{\Sigma_{R_YP}} \cdot \Delta T_1 = 21.703 \quad v_{7_1} := v_s - \frac{Z_{V_7}}{\Sigma_{ZV_YP_1}} \cdot \Delta v = 9.539 \quad RH_{7_1} := \frac{v_{7_1}}{v_k(T_7)} = 50\%$$

ok

Dynaamisen tarkastelun kosteustuotto, tavanomaisen kosteusrasituksen tapaus

$$g_{121A}(T) := \frac{\Delta v_{121A}(T)}{\Sigma_{ZV_YP_1}}$$

$$g_{121B}(T) := \frac{\Delta v_{121B}(T)}{\Sigma_{ZV_YP_1}}$$

1.2.1.2 Diffuusioliike Isover Duplex-höyrynsulun läpi

$$\Sigma_{ZV_YP_2_1} := Z_{V_4} + Z_{V_5} + Z_{V_DU}(RH_s_asunnot) + Z_{V_7} = 2.192 \times 10^5 \frac{s}{m}, \text{ asuintilan ja tuuletusraon välisten rakennekerrosten yhteinelaskettu vesihöyrynvastus}$$

koosteustuotto sekunnissa /m² kosteustuotto kuukaudessa /m²

$$g_{YP_m2_2} := \frac{\Delta v}{\Sigma_{ZV_YP_2_1}} = 4.044 \times 10^{-5} \quad G_{YP_m2_2} := \frac{\Delta v}{\Sigma_{ZV_YP_2_1}} \cdot 2.6 \cdot 10^6 = 105.157 \quad \text{(Björkholz 8.12)}$$

Riskialuekartoitus (ei kylm äsiltävaikutuksia huomioitu)

$$v_{4_2_1} := v_s - \frac{Z_{V_7} + Z_{V_DU}(RH_s_asunnot) + Z_{V_5} + Z_{V_4}}{\Sigma_{ZV_YP_2_1}} \cdot \Delta v = 0.832 \quad RH_{4_2_1} := \frac{v_{4_2_1}}{v_k(T_4)} = 90.0\%$$

$$v_{5_2_1} := v_s - \frac{Z_{V_7} + Z_{V_DU}(RH_s_asunnot) + Z_{V_5}}{\Sigma_{ZV_YP_2_1}} \cdot \Delta v = 0.945 \quad RH_{5_2_1} := \frac{v_{5_2_1}}{v_k(T_5)} = 102.0\%$$

$$v_{6_2_1} := v_s - \frac{Z_{V_7} + Z_{V_DU}(RH_s_asunnot)}{\Sigma_{ZV_YP_2_1}} \cdot \Delta v = 2.401 \quad RH_{6_2_1} := \frac{v_{6_2_1}}{v_k(T_6)} = 13.0\%$$

$$v_{7_2_1} := v_s - \frac{Z_{V_7}}{\Sigma_{ZV_YP_2_1}} \cdot \Delta v = 7.07 \quad RH_{7_2_1} := \frac{v_{7_2_1}}{v_k(T_7)} = 37.0\%$$

Tarkastellaan tilannetta kun tuulensuojapaperia ei ole:

$$\Sigma_{ZV_YP_2_2} := Z_{V_5} + Z_{V_DU}(RH_s_asunnot) + Z_{V_7} = 2.164 \times 10^5 \frac{s}{m}, \text{ asuintilan ja tuuletusraon välisten rakennekerrosten yhteinelaskettu vesihöyrynvastus}$$

$$g_{YP_m2_2} := \frac{\Delta v}{\Sigma_{ZV_YP_2_2}} = 4.097 \times 10^{-5} \text{ kosteustuotto sekunnissa /m}^2$$

$$v_{5_2_2} := v_s - \frac{Z_{V_7} + Z_{V_DU}(RH_s_asunnot) + Z_{V_5}}{\Sigma_{ZV_YP_2_2}} \cdot \Delta v = 0.832 \quad RH_{5_2_2} := \frac{v_{5_2_2}}{v_k(T_5)} = 90.0\% \text{ ok}$$

Dynaamisen tarkastelun kosteustuotto kun höyrynsulkumateriaalina duplex, tavanomaisen kosteusrasituksen tapaus

$$\Sigma_{Z_{N_YP22_dynA}(T)} := Z_{v_5} + Z_{v_DU}(RH_{s_asA}(T)) + Z_{v_7}$$

$$\Sigma_{Z_{N_YP22_dynB}(T)} := Z_{v_5} + Z_{v_DU}(RH_{s_asA}(T)) + Z_{v_7}$$

$$\xi_{122A}(T) := \frac{\Delta v_{121A}(T)}{\Sigma_{Z_{N_YP22_dynA}(T)}}$$

$$\xi_{122B}(T) := \frac{\Delta v_{121B}(T)}{\Sigma_{Z_{N_YP22_dynB}(T)}}$$

1.2.3 Rakennusvirhetapaus: diffuusioliike höyrynsulun pinnalta tuuletusrakoon

$$T_6 = 21.133 \quad v_{6_rakv} := v_k(T_6) = 18.456 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \quad \text{Kun höyrynsulun pinnalla on nestemäinen vettä}$$

$$\Delta v_{rakv} := v_{6_rakv} - v_{tr} = 17.624 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \quad \text{kosteuspitoisuusero}$$

$$\Delta v_{rakv2} := v_{6_rakv} - v_s = 8.756 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \quad \text{kosteuspitoisuusero sisätilan kanssa asuntojen kohdalla}$$

$$\Delta v_{rakv3} := v_{6_rakv} - v_s_{teknitila} = 14.624 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \quad \text{kosteuspitoisuusero sisätilan kanssa asuntojen kohdalla}$$

1.2.3.1 Diffuusioliike muovisen höyrynsulun pinnalta min. villan läpi

$$\dot{q}_{rakv_m2_1} := \frac{\Delta v_{rakv}}{Z_{v_5}} = 4.895 \times 10^{-4} \frac{\text{g}}{\text{s}} \quad \text{kosteustuotto sekunnissa tuuletustilaan (Björkholtz 8.12)}$$

$$G_{rakv_m2_1} := \frac{\Delta v_{rakv}}{Z_{v_5}} \cdot 2.6 \cdot 10^6 = 1.273 \times 1 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{kk}} \quad \text{kosteustuotto/kuivumisen vauhti kuukaudessa ehdolla että tuuletusraon kapasiteetti riittävä}$$

Dynaamisen tarkastelun kosteustuotto, vettä höyrynsulun päällä

$$\dot{q}_{1231A}(n, T) := \frac{v_k(T_{hs_rakv}(n, T)) - v_k(T) \cdot RH_A}{Z_{v_5}}$$

$$\dot{q}_{1231B}(n, T) := \frac{v_k(T_{hs_rakv}(n, T)) - v_k(T) \cdot RH_B}{Z_{v_5}}$$

1.2.3.2 Diffuusioliiike Isover Duplex pinnalta tuuletusrakoon sekä sisätilaan

$$\dot{G}_{\text{rakv_m2_2_1}} := \frac{\Delta v_{\text{rakv}}}{Z_{v_5}} = 4.895 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad \text{kosteustuotto sekunnissa tuuletustilaan} \quad \text{(Björkholtz 8.12)}$$

$$\dot{G}_{\text{rakv_m2_2_2}} := \frac{\Delta v_{\text{rakv2}}}{Z_{v_DU(0.8)} + Z_{v_7}} = 1.201 \times 10^{-4} \quad \text{kosteustuotto sekunnissa asuntoon (Björkholtz 8.12)}$$

$$\dot{G}_{\text{rakv_m2_2_3}} := \frac{\Delta v_{\text{rakv3}}}{Z_{v_DU(0.8)} + Z_{v_7}} = 2.006 \times 10^{-4} \quad \text{kosteustuotto sekunnissa tekniseen tilaan (Björkholtz 8.12)}$$

$$\dot{G}_{\text{rakv_m2_2_as}} := (\dot{G}_{\text{rakv_m2_2_1}} + \dot{G}_{\text{rakv_m2_2_2}}) \cdot 2.6 \cdot 10^6 = 1.585 \times 10^3 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{kk}} \quad \text{kosteustuotto/kuivumisen vaihti kuukaudessa ehdolla että tuuletusraon kapasiteetti riittävä, asuntojen kohdalla}$$

$$\dot{G}_{\text{rakv_m2_2_tekn}} := (\dot{G}_{\text{rakv_m2_2_1}} + \dot{G}_{\text{rakv_m2_2_3}}) \cdot 2.6 \cdot 10^6 = 1.794 \times 10^3 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{kk}} \quad \text{kosteustuotto/kuivumisen vaihti kuukaudessa ehdolla että tuuletusraon kapasiteetti riittävä, tekn. tilan kohdalla}$$

1.2.3.4 Diffuusioliiike Isover pinnalta tuuletusrakoon sekä sisätilaan kun asuintilan kosteudensä on $5 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$

$$\text{RH}_{1_2_3_4} := \frac{v_u + 5}{v_k(T_s)} = 30.063\% \quad \text{Sisäilman suhteellinen kosteus, kosteudensä } 5 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta v_{\text{rakv4}} := v_{G_rakv} - (v_u + 5) = 12.624$$

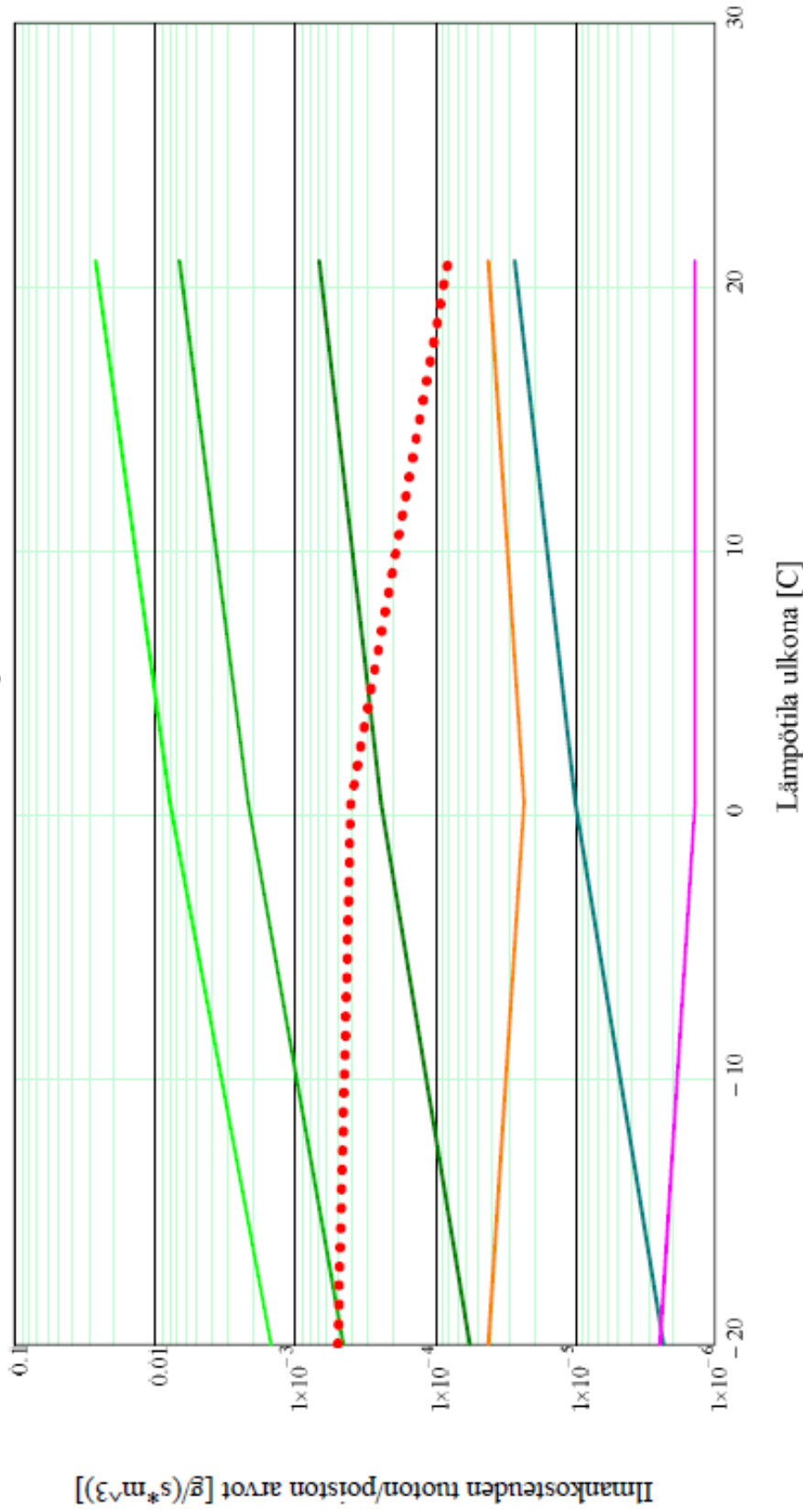
$$\dot{G}_{\text{rakv_m2_3_4}} := \frac{\Delta v_{\text{rakv4}}}{Z_{v_DU(0.8)} + Z_{v_7}} = 1.731 \times 10^{-4}$$

$$\dot{G}_{\text{rakv_m2_3_4_as}} := (\dot{G}_{\text{rakv_m2_2_1}} + \dot{G}_{\text{rakv_m2_3_4}}) \cdot 2.6 \cdot 10^6 = 1.723 \times 10^3 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{kk}} \quad \text{kosteustuotto/kuivumisen vaihti kuukaudessa ehdolla että tuuletusraon kapasiteetti riittävä, asuntojen kohdalla}$$

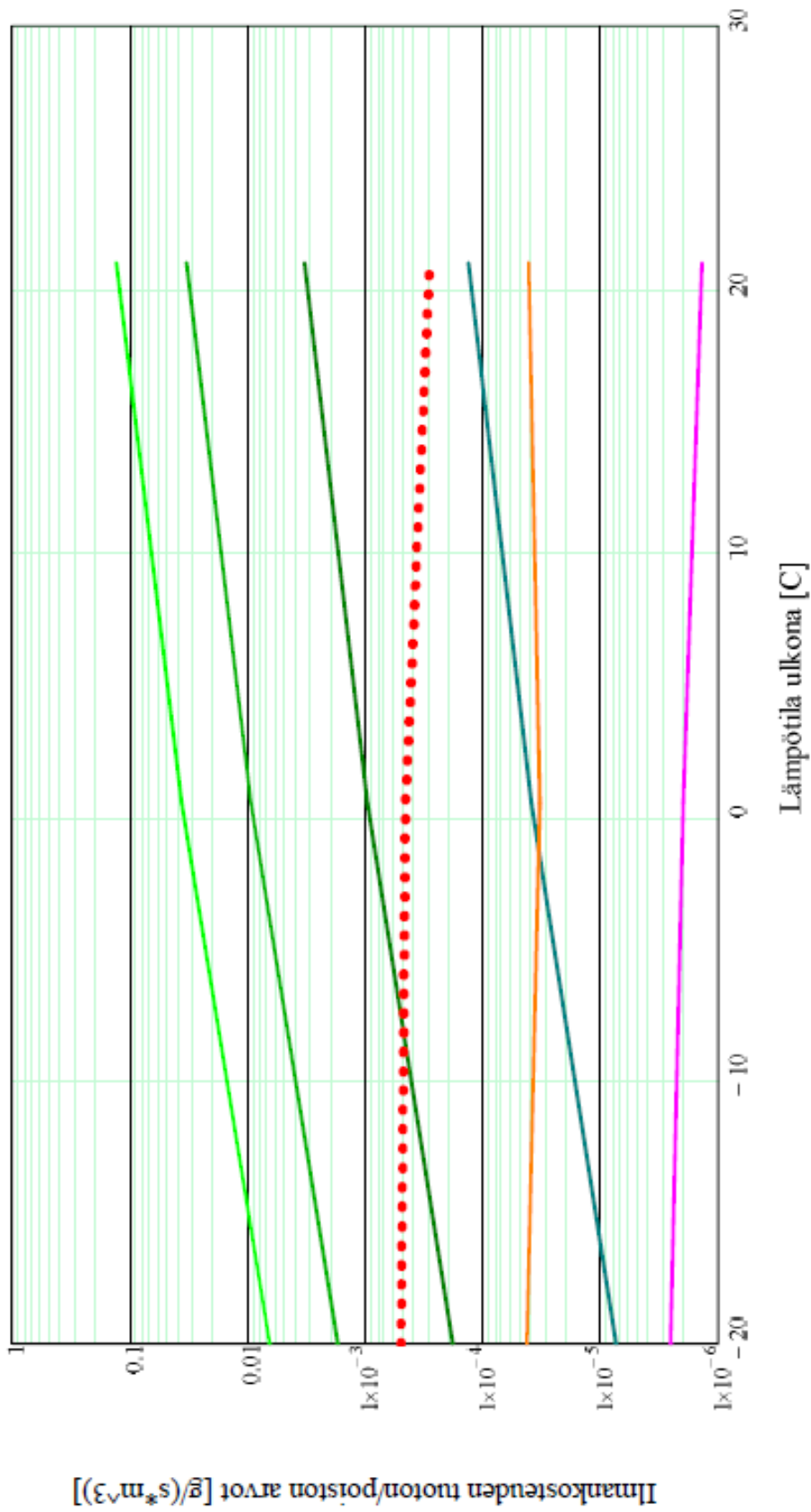
Dynaamisen tarkastelun kaavat. Tuuletusraon kosteuspoiston kapasiteetti lämmitilän, ilm. vaihtuvuuden ja ulkoilman kosteuden funktiona.

$$\begin{aligned} \dot{G}_{\text{avai1_A1}}(T) &:= \dot{G}_{\text{avai1}}(n_{\text{term1}}, T, \text{RH}_A) & \dot{G}_{\text{avai1_B1}}(T) &:= \dot{G}_{\text{avai1}}(n_{\text{term1}}, T, \text{RH}_B) & v(n_{\text{term1}}) &= 0.703 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ \dot{G}_{\text{avai1_A2}}(T) &:= \dot{G}_{\text{avai1}}(n_{\text{term2}}, T, \text{RH}_A) & \dot{G}_{\text{avai1_B2}}(T) &:= \dot{G}_{\text{avai1}}(n_{\text{term2}}, T, \text{RH}_B) & v(n_{\text{term2}}) &= 0.176 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ \dot{G}_{\text{avai1_A3}}(T) &:= \dot{G}_{\text{avai1}}(n_{\text{term3}}, T, \text{RH}_A) & \dot{G}_{\text{avai1_B3}}(T) &:= \dot{G}_{\text{avai1}}(n_{\text{term3}}, T, \text{RH}_B) & v(n_{\text{term3}}) &= 0.018 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ \dot{G}_{\text{avai1_A4}}(T) &:= \dot{G}_{\text{avai1}}(n_{\text{term4}}, T, \text{RH}_A) & \dot{G}_{\text{avai1_B4}}(T) &:= \dot{G}_{\text{avai1}}(n_{\text{term4}}, T, \text{RH}_B) & v(n_{\text{term4}}) &= 7.028 \times 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}} \end{aligned}$$

RH ulkona 90%, lämpötilaväli -20...+27C



RH ulkona 50%, lämpötilaväli -20...+27C



- Tuuletusraon kuivumiskapasiteetti g [m^3/s], $n=200$, $v=0.7$
- Tuuletusraon kuivumiskapasiteetti g [m^3/s], $n=50$, $v=0.18$
- Tuuletusraon kuivumiskapasiteetti g [m^3/s], $n=5$, $v=0.018$
- Tuuletusraon kuivumiskapasiteetti g [m^3/s], $n=0.2$, $v=0.0007$
- Kosteustuotto tuuletusrakoon g_{dif} [m^3/s], muovinen höyrynsulku
- Kosteustuotto tuuletusrakoon g_{dif} [m^3/s], duplex höyrynsulku
- Kosteustuotto tuuletusrakoon g_{dif} [m^3/s], rakennusvirhe

1.2.3 Vastasäteilyn vaikutus

Pakkaskauden lämpötilat

$$v_{\text{ymp}} := 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ tuulen nopeus}$$

$$T_u := -20 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ ilman lämpötila ulkona}$$

$$\varepsilon_{\text{bit}} := 0.93$$

bitumikatteen pinnan emissiiviteetti

$$T_v := -36 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ vastasäteilyn lämpötila ulkoilman lämpötilan funktiona, kuva Björkholtz, 3.3}$$

$$\sigma := 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

$$a_{\text{ko}} := 6 + 4 \cdot v_{\text{ymp}}$$

$$T_p := -23.5 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ pintalämpötila (oletus)}$$

$$a_{\text{sä}} := 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left(\frac{T_p + T_v}{2} \right)^3 = 3.036$$

Säteilyn lämmönsiirtymiskerorin yp, Björkholtz 3.10

$$a_u := a_{\text{sä}} + a_{\text{ko}} = 13.036$$

Kun lyhytaaltoista säteilyä ei ole (yöllä):

$$T_{\text{ue}} := T_u + \frac{a_{\text{sä}}}{a_u} \cdot (T_v - T_u) = -23.726$$

Ekvivalentinen ulkolämpötila

$$t_{\text{up_liki}} := T_{\text{ue}} + \frac{1}{a_u \cdot (\Sigma_{\text{R_VK}} + \Sigma_{\text{R_YP}})} \cdot (T_s - T_u) = -23.499$$

ASHRAE:n 20-1-2007 mukaiset lämpötilat

$$T_{u2} := -11.88 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ ilman lämpötila ulkona}$$

$$T_{v2} := -28 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ vastasäteilyn lämpötila ulkoilman lämpötilan funktiona, kuva Björkholtz, 3.3}$$

$$T_{p2} := -15.5 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ pintalämpötila (oletus)}$$

$$a_{\text{sä}2} := 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left(\frac{T_{p2} + T_{v2}}{2} \right)^3 = 3.345$$

Säteilyn lämmönsiirtymiskerorin yp, Björkholtz 3.10

$$a_{u2} := a_{\text{sä}2} + a_{\text{ko}} = 13.345$$

Kun lyhytaaltoista säteilyä ei ole (yöllä):

$$T_{\text{ue}2} := T_{u2} + \frac{a_{\text{sä}2}}{a_{u2}} \cdot (T_{v2} - T_{u2}) = -15.921$$

Ekvivalentinen ulkolämpötila

$$t_{\text{up_liki}2} := T_{\text{ue}2} + \frac{1}{a_u \cdot (\Sigma_{\text{R_VK}} + \Sigma_{\text{R_YP}})} \cdot (T_s - T_{u2}) = -15.738 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Anooidun kattopintalämpötilan tarkistus, tuuletuksen vaikutus ei huomioitu

Kondensoitumisen tarkastus räystään kohdalla (lämpötilat mallista, $T_u = -20$, $v = 1\text{m/s}$):

$$v_{\text{tuloilma}} := 0.95 \cdot v_k(T_u) = 0.832 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$T_{\text{yp1}} := -21.478$$

$$\text{Tii}v_{\text{yp1}} := \begin{cases} 0 & \text{if } v_k(T_{\text{yp1}}) \geq v_{\text{tuloilma}} \\ 1 & \text{if } v_k(T_{\text{yp1}}) < v_{\text{tuloilma}} \end{cases} = 1$$

$$T_{\text{yp2}} := -21.274$$

$$\text{Tii}v_{\text{yp2}} := \begin{cases} 0 & \text{if } v_k(T_{\text{yp2}}) \geq v_{\text{tuloilma}} \\ 1 & \text{if } v_k(T_{\text{yp2}}) < v_{\text{tuloilma}} \end{cases} = 1$$

$$T_{\text{ap}} := -20.340$$

$$\text{Tii}v_{\text{ap}} := \begin{cases} 0 & \text{if } v_k(T_{\text{ap}}) \geq v_{\text{tuloilma}} \\ 1 & \text{if } v_k(T_{\text{ap}}) < v_{\text{tuloilma}} \end{cases} = 0$$

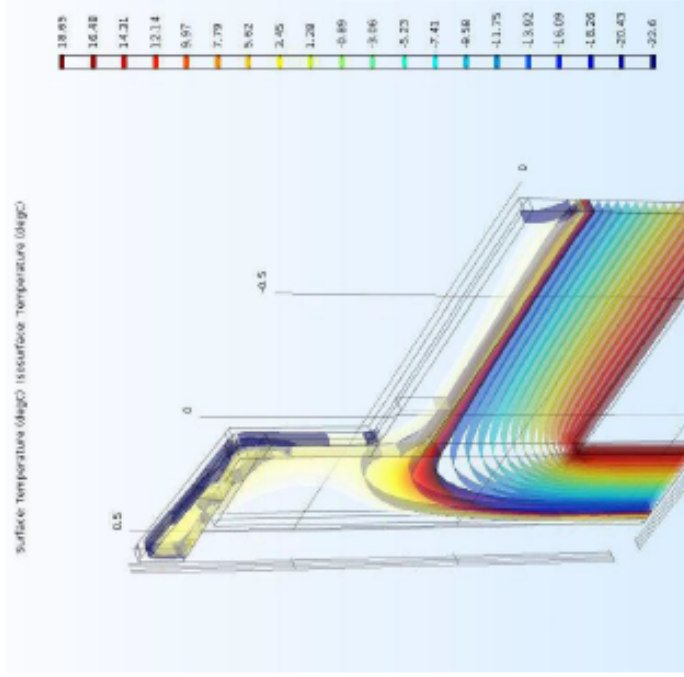
$$T_{\text{pyst_ulkopinta}} := -21.775$$

$$\text{Tii}v_{\text{pystup}} := \begin{cases} 0 & \text{if } v_k(T_{\text{pyst_ulkopinta}}) \geq v_{\text{tuloilma}} \\ 1 & \text{if } v_k(T_{\text{pyst_ulkopinta}}) < v_{\text{tuloilma}} \end{cases} = 1$$

$$T_{\text{pyst_sisapinta}} := -20.517$$

$$\text{Tii}v_{\text{pystsp}} := \begin{cases} 0 & \text{if } v_k(T_{\text{pyst_sisapinta}}) \geq v_{\text{tuloilma}} \\ 1 & \text{if } v_k(T_{\text{pyst_sisapinta}}) < v_{\text{tuloilma}} \end{cases} = 0$$

$$v_k(-20.82) = 0.824$$



Metallisen paloventtiinin keskilämpötila likimäärin

$$T_{pv} := \frac{T_{yp1} + T_{yp2}}{2} = -21.376$$

$$\Delta v_{venttiili} := v_{tuloilma} - v_k(T_{pv}) = 0.038$$

$v_{pv} := 0.2 \frac{m}{s}$ virtausnopeus paloventtiinin läpi

$$A_{pv} := 0.018 \cdot 1 = 0.018 \text{ m}^2 \text{ raon poikkeikkauspinta-ala venttiinin kohdalla}$$

$$Q_{venttiili} := v_{pv} \cdot A_{pv} = 3.6 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s} \text{ tuuletusilmän määrä paloventtiinin läpi}$$

tiivistymisen likimäärin $G_{pv_s} := Q_{venttiili} \cdot \Delta v_{venttiili} = 1.362 \times 10^{-4} \frac{g}{s}$ kondensoituminen verkkoon vastasäteilyn vaikutuksesta sekunnin aika

$$G_{pv_yö} := \frac{G_{pv_s} \cdot 3600 \cdot 8}{10^6} = 3.922 \times 10^{-6} \frac{m^3}{yö} \text{ kondensoituminen verkkoon vastasäteilyn vaikutuksesta yhden yön aikana}$$

Verkon silmien yhteenlaskettu tulavuus

$$V_{verkko} := A_{pv} \cdot 0.001 = 1.8 \times 10^{-5}$$

Yhden yön aikana tiivistyvän jään suhde verkon avoimeen tilaan:

$$\eta_{tiivistyminen} := \frac{G_{pv_yö}}{V_{verkko}} = 0.218$$

Kondensoitumisen tarkastus tasakato kohdalla 15m matkalla (lämpötilat mallista, $T_u = -20$, $v = 1 \text{ m/s}$):

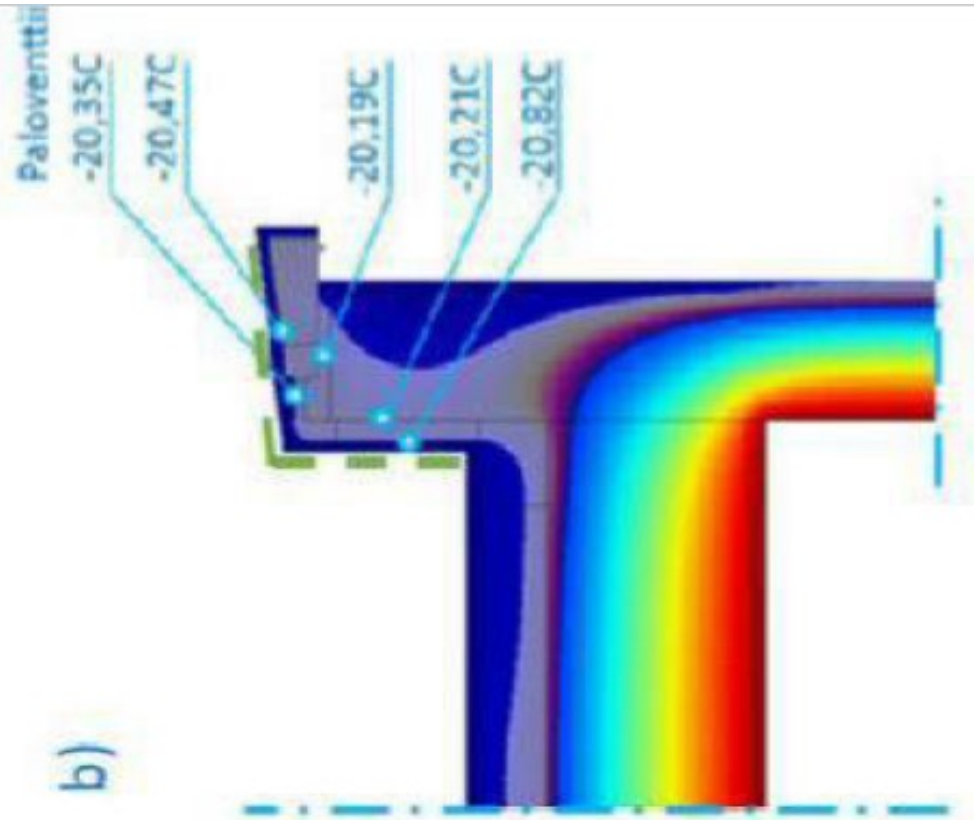
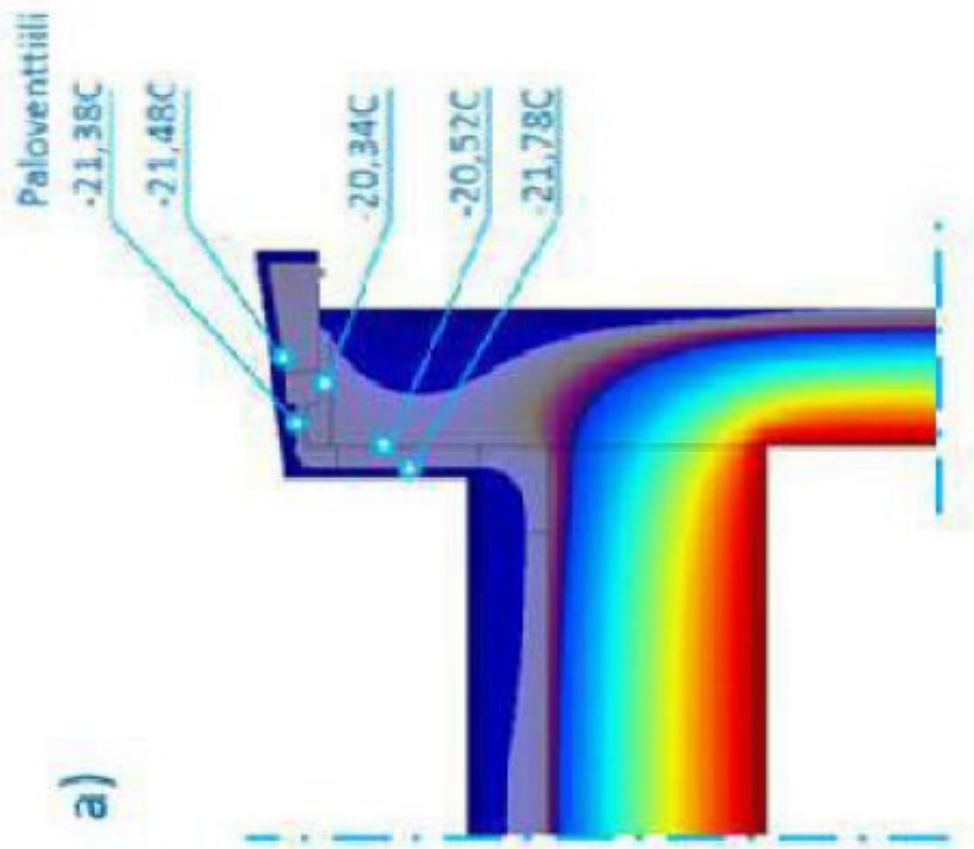
$\frac{m}{s}$ tuulen paineella pakotettu virtausnopeus tuuletusraossa

$$v_{pv_tr} := 0.049 \quad T_{yp_min} := -23.018 \quad T_{yp_max} := -21.747 \quad C, \text{ tuuletusraon yläpinnan lämpötilat}$$

$$T_{yp_avg} := -22.715 \quad T_{ap_min} := -20.424 \quad T_{ap_max} := -18.676 \quad C, \text{ tuuletusraon alapinnan (villan pinta) lämpötilat}$$

$$T_{ap_avg} := -19.203$$

Pakkaskauden lämpötilat pinnoilla.



1.2.4 Rakennusvirhetapaus: konvektion aiheuttama kosteusrasitus

$$\eta := (17.1 + 0.0049 \cdot T_{tr}) \cdot 10^{-6} = 1.701 \times 10^{-5} \quad \text{ilman viskositeetti (Björkholtz 6.19)}$$

$$RH_{1_2_4} := \frac{v_u + v_{iisä}}{v_k(T_s)} = 19.753\% \quad \text{Sisäilman suhteellinen kosteus, kosteuslisa } \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$H_{B_talo} := 24 \text{ m, talotekniikkakuuilun vapaa korkeus} \quad L_{YP} := 0.475 \text{ m, ylipohjan paksuus (konvektiovirtauslaskelmaa varten)}$$

$$\Delta P_{kuiilu} := 0.043 \cdot \frac{H_{B_talo}}{2} \cdot (T_s - T_u) = 21.672 \text{ Pa, paine-ero talotekniikkakuuilun katon alueella}$$

$$d_{rako} := 1 \quad \text{m, raon pituus}$$

$$b_{rako} := 0.00001 \dots 0.01 \quad \text{m, raon leveys}$$

$$Q_{konv1}(d_{rako}, b_{rako}) := \frac{d_{rako} \cdot b_{rako}^3 \cdot \Delta P_{kuiilu}}{12 \cdot \eta \cdot L_{YP}} \quad \frac{\text{m}^3}{\text{s}}, \text{ konvektioilmamäärä sekunnissa raon läpi (Björkholtz 8.15)}$$

$$g_{konv1}(d_{rako}, b_{rako}) := \frac{d_{rako} \cdot b_{rako}^3 \cdot \Delta P_{kuiilu}}{12 \cdot \eta \cdot L_{YP}} \cdot v_{iisä} \quad \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \text{ kosteustuotto sekunnissa eristettilaan (Björkholtz 8.12)}$$

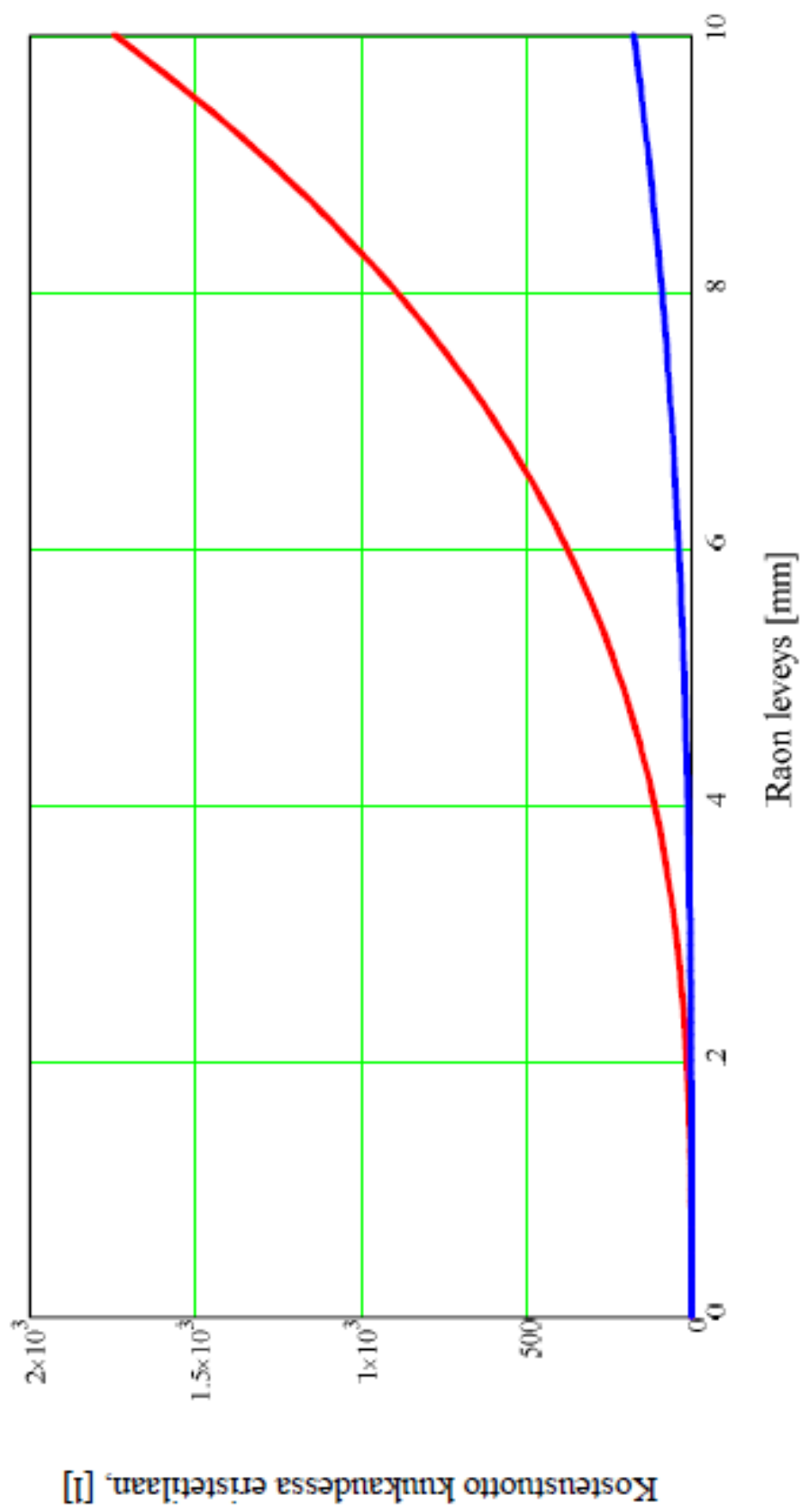
$$G_{konv1}(b_{rako}) := \left(\frac{d_{rako} \cdot b_{rako}^3 \cdot \Delta P_{kuiilu}}{12 \cdot \eta \cdot L_{YP}} \cdot v_{iisä} \right) \cdot 2.6 \cdot 10^3 \quad \frac{\text{kg}}{\text{kk}} \text{ kosteustuotto kuukaudessa eristettilaan}$$

$$G_{konv2}(b_{rako}) := \left(\frac{d_{rako} \cdot b_{rako}^3 \cdot \Delta P_{kuiilu}}{12 \cdot \eta \cdot L_{YP}} \cdot v_{iisä} \right) \cdot 2.6 \cdot 10^3 \quad \frac{\text{kg}}{\text{kk}} \text{ kosteustuotto kuukaudessa eristettilaan}$$

$$\Delta P_{kuiilu_dyn}(T) := 0.043 \cdot \frac{H_{B_talo}}{2} \cdot (T_s - T)$$

$$g_{konv1_dyn}(d_{rako}, b_{rako}, T) := \frac{d_{rako} \cdot b_{rako}^3 \cdot \Delta P_{kuiilu_dyn}(T)}{12 \cdot \eta \cdot L_{YP}} \cdot v_{iisä} \quad \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \text{ kosteustuotto sekunnissa eristettilaan (Björkholtz 8.12)}$$

Kosteustuotto kuukaudessa eristetilaan talotekniikkakuilun kohdassa sijaitsevasta viivamaisesta raosta



- kosteustuotto eristetilaan 1m pituudesta raosta
- kosteustuotto eristetilaan 10cm pituudesta raosta