

Kokonaisten rakennusten energiamallintaminen kuukausi- ja tuntitasolla

Tero Mononen

Pro gradu -tutkielma

Uusiutuvan energian koulutusohjelma
Fysiikan laitos
Jyväskylän yliopisto
5.3.2014

Tiivistelmä

Mononen, Tero

Kokonaisten rakennusten energiamallintaminen kuukausi- ja tuntitasolla

Pro gradu -tutkielma

Uusiutuvan energian koulutusohjelma, Fysiikan laitos, Jyväskylän yliopisto, 2014, 65 sivua

Tässä työssä kehitettiin kaksi rakennusten energiavirtausten mallintamiseen soveltuvaa laskentamenetelmää, joista toinen on kuukausitason laskentajaksoon perustuva karkea menetelmä ja toinen perustuu tuntitason laskentajaksoon. Menetelmissä otetaan huomioon ympäristön vaikutus, taloteknisten laitteiden toiminta ja rakenteiden termodynaamiset ominaisuudet, joiden perusteella voidaan laskea rakennuksen lämmitysenergiantarve (molemmat menetelmät) ja yksittäisen tilan sisälämpötila tunnin tarkkuudella (tuntimenetelmä). Menetelmät testattiin ANSI/ASHRAE Standardin 140-2011 ja EN ISO 13792 mukaisesti. EN 13792 testeissä mallinnetaan yksittäisen huoneen sisälämpötila tuntitasolla annetuilla rakenteilla ja ympäristömuuttujilla. Kehitetyn tuntimenetelmän antama tilan sisälämpötilaprofiili oli hyvin linjassaan testituloksien kanssa. ASHRAE 140-2011 testeistä valittiin testit, joissa mallinnetaan yhden realistisen rakennuksen lämmitystarvetta vuoden aikana. Kuukausimenetelmän antamat tulokset olivat pääosin hyvin linjassaan standardin antamien tuloksien kanssa. Täten molemmat menetelmät todetaan riittävän luotettaviksi kokonaisten rakennusten energiamallintamiseen.

Sisältö

1	Johdanto	4
2	Tausta	6
3	Teoreettiset lähtökohdat	6
3.1	<i>Energialaskennan aika-askel</i>	6
3.2	<i>Dynaaminen energialaskentamenetelmä</i>	7
3.3	<i>Tilojen energiatase</i>	7
3.4	<i>Rakennusten energiatehokkuus ja siihen vaikuttavat tekijät</i>	9
3.5	<i>Lämmön siirtymisen prosessit rakennuksissa</i>	11
3.6	<i>Lämmonjohtuminen</i>	13
3.7	<i>Konvektio</i>	15
3.8	<i>Pitkäaaltoisen säteilyn lämmönsiirto</i>	20
3.9	<i>Lyhytaaltoisen säteilyn lämmönsiirto</i>	22
3.9.1	<i>Lyhytaaltainen säteily läpinäkyvien pintojen läpi</i>	22
3.9.2	<i>Verhojen ja varjostimien vaikutus</i>	26
3.10	<i>Auringon säteilyenergia kallistetulle pinnalle</i>	30
4	Tuntimenetelmä	35
4.1	<i>Tilan lämmityksen- tai jäädytyksen nettotarve</i>	35
4.2	<i>Lämpövastusten konduktanssien määrittäminen</i>	40
4.2.1	<i>Ulkorakenteet</i>	40
4.2.2	<i>Ulkorakenteiden ilmanvuoto</i>	41
4.2.3	<i>Hallittu ilmanvaihto</i>	42
4.2.4	<i>Maanvastaiset rakenteet</i>	43
4.3	<i>Lämpövirtojen määrittäminen</i>	45
4.3.1	<i>Rakennuksen sisäiset lämpövirrat</i>	45
4.3.2	<i>Ulkoiset lämpövirrat</i>	45
5	Kuukausimenetelmä	47
6	Testausmenetelmät	49
6.1	<i>ASHRAE 140-2011</i>	49
6.2	<i>EN ISO 13792</i>	51
7	Tulokset	53
7.1	<i>ASHRAE 140-2011 lämmöntarvetestit kuukausimenetelmälle</i>	53
7.2	<i>EN13792 sisälämpötilatestit tuntimenetelmälle</i>	55
8	Johtopäätökset	56
9	Viitteet	58
Liitteet		
A	ASHRAE 140-2011 luokan 2 tulokset	62

1 Johdanto

Suomen uudisrakentamisen energiatehokkuudelle on asetettu rajat jo 70 -luvun öljykriisistä lähtien. Alussa energiatehokkuutta rajoitettiin ainoastaan yksittäisten rakennuskomponenttien tasolla. Esimerkiksi seinien U-arvoille oli tietyt maksimiarvot. Vuonna 2008 asetettiin kaikille uudisrakennuksille pakolliseksi energiatodistus, jossa rakennukset on luokiteltu asteikolla A-G laskennallisen lämmitys- ja jäähdytysenergiantarpeen mukaisesti¹. Varsinaisia rajoja kokonaisenergiankulutukselle ei kuitenkaan asetettu kuin vasta heinäkuussa 2012 voimaantulleessa uudistuksessa rakentamismääräyksien osaan D3 Rakennusten Energiatehokkuus [54]. Tämän uudistuksen myötä rakennusten kokonaisenergiankulutusta aloitettiin rajoittamaan rakennuksen ns. E-lukuun perustuen.

E-luku ilmoittaa rakennuksen kuluttaman ostoenergian eri energialähteitä painottavilla kertoimilla kerrottuna. Esimerkiksi sähkön laskennallinen ostoenergiankulutus kerrotaan kertoimella 1,7 ja uusiutuvien energialähteiden kertoimella 0,5. Tärkeintä tässä uudistuksessa on se, että uudisrakentamisessa E-luvulle - eli rakennuksen laskennalliselle ostoenergiankulutukselle - on asetettu raja-arvot. Kunnallisilla rakennustarkastajilla on oikeus hylätä rakennuslupahakemus, jos uudisrakennus ei suunnitteluvaiheessa täytä sille asetettua E-lukuvaatimusta. Kesäkuussa 2013 myös energiatodistuksessa siirryttiin käyttämään E-lukua [2, 5].

Toinen merkittävä uudistus vuonna 2012 oli se, että ensimmäistä kertaa energialaskentaan käytettävälle energialaskentaohjelmistolle asetettiin vaatimukset. Tietyille rakennustyypeille tulee käyttää ns. dynaamista laskentamenetelmää käyttävää energialaskentaohjelmistoa. Tällaisella ohjelmalla tulee määrittää rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysenergiantarve. Lisäksi joillekin rakennustyypeille tulee tehdä tilojen sisälämpötilatarkastelu niin ikään dynaamisella laskentaohjelmistolla [54]. Tällaisen ohjelman käyttämä laskentamenetelmä tulee olla validoitu jonkun rakentamismääräyksissä luetellun testausmenetelmän mukaisesti. Näitä ovat ASHRAE, CIBSE ja EN standardeista löytyvät testausmenetelmät². Yleisesti voidaan todeta, että ainoastaan vähintään tunnin mittaiseen aika-askeleeseen perustuvat laskentamenetelmät voivat läpäistä näiden standardien testit. Poikkeuksena ASHRAE standardista löytyvät testitapaukset myös kuukausitason energialaskentamenetelmän testaamiseen. Suomen rakentamismääräysten mukaisen kuukausitason menetelmän ei kuitenkaan tarvitse läpäistä näitä testejä.

Uudet määräykset täyttäviä dynaamisia energialaskenta ohjelmistoja on kehitetty maailmalla satoja [1]. Energialaskentaohjelmistoksi lasketaan sellaiset ohjelmistot, joilla voidaan arvioida rakennusten energiatehokkuutta ja uusiutuvan energian käyttöä. Näiden ohjelmistojen kovan ytimen muodostavat koko rakennuksen energiamallintamiseen soveltuvat ohjelmistot, eli ns. whole building -ohjelmistot. Loput energialaskentaohjelmistot ovat tarkoitettu jonkin yksittäisen prosessin mallintamiseen, kuten vaikkapa lämmitysjärjestelmän analysointiin, rakennusosan eristävyysmäärittämiseen tai kustannuslaskentaan.

Nykyään suurimmalla osalla kehittyneistä maista on jonkinlainen rakennetun ympäristön energiate-

1. Samaan tapaan kuin suurimmalle osalle kodinkoneita.

2. Myös IEA BESTEST mainitaan erikseen, mutta tämä on yhdistetty ASHRAE:n standardiin 140 jo vuonna 2011, mitä ei ilmeisesti tiedetty määräysten kirjoittamishetkellä.

hokkuutta säätelevä lainsäädäntö. Usein lainsäädäntö vaatii tietynlaisten energialaskentadokumenttien toimittamista rakentamista valvovalle viranomaiselle [40]. Tällöin energialaskelmat tulee tehdä vertailukelpoisuuden varjolla samoilla kansallisesti päätetyillä säännöillä ja oletuksilla. Nämä laskentasäännöt saattava olla niin yksityiskohtaiset, että vaikka itse energiasimulointia varten parhaita whole building -ohjelmistoja voidaan luetella kourallinen, ei näistä mikään ole välttämättä sopiva paikalliset määräykset toteuttavan energialaskelman tekemiseen. Tämä on johtanut tilanteeseen, jossa energialaskentohjelmistojen käyttäjät suosivat ohjelmistoja, jotka ovat yhteensopivia paikallisen lainsäädännön kanssa ja tuottavat tarvittavat kansalliset dokumentit automaattisesti. Energialaskentaohjelman käyttämän laskentamenetelmän tyypillä tai laadulla ei täten ole käyttäjille niin väliä, kunhan menetelmä täyttää paikalliset vaatimukset. Suomalaisen energialainsäädännön kanssa yhteensopivaksi suunniteltuja ohjelmistoja on kaksi: Riuska ja IDA Indoor Climate and Energy. Tällöin dynaamista energialaskentaa Suomessa tekevän suunnittelijan valintamahdollisuudet eivät liiku sadoissa ohjelmistoissa, vaan valittavana on käytännössä jompikumpi edellä mainituista.

Tämän työn tilaaja Oy lamit.fi - rakennusten energiatehokkuuspalveluihin erikoistunut yritys - pyrkii kehittämään suomalaisille rakennussuunnittelijoille suunnatun kokonaisvaltaisen energialaskentaohjelmiston. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää ohjelmiston pohjaksi soveltuvat laskentamenetelmät, joista toinen perustuu kuukausitason laskentajaksoon ja toinen tuntitason dynaamiseen laskentaan.

Suomen rakentamismääräykset antavat mahdollisuuden käyttää kuukausitason laskentajaksoon perustuvaa menetelmää sellaisten rakennuksen energialaskentaan, joissa ei ole aktiivista koko rakennuksen kattavaa jäähdytysjärjestelmää. Kuukausitason ohjelmistot ovat yleensä nopeampia ja yksinkertaisempia käyttää kuin dynaamiset energialaskentaohjelmistot, joten kuukausitason ohjelmistoja suositaan silloin kuin niiden käyttö on määräysten suhteen mahdollista. Tästä syystä lamitin energialaskentaohjelmistoon kehitettiin tuntimenetelmän lisäksi kuukausitason menetelmä. Kuukausimenetelmän pohjana käytettiin SFS-EN ISO standardissa 13790 [25] kuvailtua pitkäaikaisen jatkuvuustilan menetelmää. Tuntimenetelmän pohjana käytettiin samasta SFS-EN ISO standardista 13790 löytyvää yksinkertaistettua tuntimenetelmää, joka perustuu rakennuksen ekvivalenttiin resistanssi-kapasitanssi-malliin [15].

Lamit.fi laskentaohjelmistot toimivat internet -käyttöliittymän kautta lamitin omilla palvelimilta. Käyttäjille myydään käyttöoikeus ohjelmistoon, mutta itse ohjelmistoa ei fyysisesti myydä tai asenneta käyttäjän tietokoneelle. Internet selaimessa toimivan käyttöliittymän välityksellä käyttäjä syöttää rakennuksen tiedot tietokenttiin. Näihin syöttötietoihin perustuen suoritetaan rakennuksen energialaskenta.

Tutkimustyön tavoitteena oli siis kehittää kuukausi- ja tuntitason laskentamenetelmät, joilla olisi seuraavat ominaisuudet: Menetelmän vaatimat syöttötiedot ovat helposti käyttäjän saatavilla ja niitä on mahdollisimman vähän. Laskentamenetelmän laskenta-ajan tulee olla mahdollisimman lyhyt, jotta ohjelmiston käyttö olisi mahdollisimman sujuvaa hitaankin internetyhteyden yli. Laskentamenetel-

2. Syöttötietojen määrä korreloi voimakkaasti laskennan kokonaistarkkuuden kanssa, joten 'mahdollisimman vähän' tarkoittaa tässä yhteydessä sitä syöttötietojen määrää, jolla on mahdollista päästä yhteneviin tuloksiin testauksessa käytettyjen standardien (EN 13792 ja ASHARE 140-2011) kanssa.

mien tulee täyttää Suomen rakentamismääräyskokoelman asettamat laadulliset vaatimukset, eli käytännössä tuntipohjainen laskentamenetelmä tulee olla validoitu. Suunnittelun alussa päätettiin myös, että molempien menetelmien tulee läpäistä ASHRAE 140-2011 standardin oleelliset testitapaukset, ja että tuntimenetelmällä tehtävä huoneen sisälämpötilatarkastelu tulee läpäistä standardin EN ISO 13792 [20] testitapaukset.

2 Tausta

Whole-building -energiälaskentaohjelmistoja on DOE:n (U.S. Department of Energy) ylläpitämän listauksen [1] mukaan tällä hetkellä saatavilla vähän vajaan sata. Jotkut näistä ohjelmistoista ovat todella pitkän kehityslinjan kokonaisuuksia, joiden vanhimmat osat ovat vuosikymmeniä vanhoja. Useimmat parhaiten tunnetuista ohjelmistoista ovat yleensä yliopiston tai muun valtiollisen tutkimuslaitoksen kehittämiä. Yksikään ohjelmisto ei ole onnistunut saavuttamaan merkittävää johtavaa asemaa.

Yleisimmin käytettyjen ohjelmistojen kesken on tehty monta vertailua. Crawley ym. [14] on tehnyt näistä yhteenvedon tyylisen artikkelin, jossa on vertailtu kahtakymmentä yleiseen energiasimulointiin suunniteltua whole-building -energiaohjelmistoa niiden tarjoamien ominaisuuksien suhteen. Vertailussa on otettu huomioon niin menetelmien kyky mallintaa erilaisia tilanteita ja käytettyjen algoritmien laatu, kuin myös käyttöliittymän ominaisuudet, ohjelmiston saatavuus ja käytetyt validointimenetelmät.

Validoitujen ohjelmistojen validointiraporteista nähdään, että harvoissa tapauksissa testatun ohjelman antamat tulokset ja vertailutulokset ovat täydellisesti yhteneviä. Ohjelman katsotaan kuitenkin olevan validoitu, jos suurin osa tuloksista on 'suurinpiirtein' linjassaan vertailutuloksien kanssa ja että ohjelman antamat tulokset ovat keskenään johdonmukaisia. Tärkeämpää on, että poikkeavuuksien syyt löytyvät ja perustellaan se, miksi poikkeavuuksien poistamiseksi ohjelmaa ei muokata. Esimerkiksi DOE:n kehittämä EnergyPlus energialaskentaohjelman validoinnissa [33] löydettiin poikkeamia kaikista testitapausryhmistä, mutta ohjelma katsottiin silti olevan linjassaan testituloksien kanssa.

3 Teoreettiset lähtökohdat

3.1 Energialaskennan aika-askel

Aika-askeleen pituus määrittää kuinka menetelmässä voidaan ottaa huomioon rakennuksien ja ympäristön ajan suhteen riippuvat termodynaamiset prosessit. Esimerkiksi kuukausimenetelmässä rakenteiden jäähtyminen yöaikaan on mahdoton ottaa huomioon eksplisiittisesti³. Kuukausimenetelmä on

2. Valitettavasti tähän raporttiin ei saatu sisällytettyä tuntimenetelmän testituloksia ASHRAE 140-2011 testitapauksista.
3. Ei ole tavatonta nähdä mm. kuukausitasolla tehtyjä sisäilman lämpötilatarkasteluja. Käyttämällä sopivia korjauskertoimia on toki mahdollista laskea suuntaa antava vaikutus kuukausittaisiin keskiarvoihin hyödyntäen, mutta yksittäisiin tuloksiin ei voi luottaa.

lähtökohtaisesti nopeampi ja yksinkertaisempi kuin tuntimenetelmä, eikä rakennuksen ominaisuuksien tarvitse olla niin tarkasti tiedossa. Tarvittavan säädäntä hankkiminen on usein helpompaa kuukausitasolla esim. NASA:n SSE -portaali [4] ja Euroopan Unionin ylläpitämä PVGIS -portaali [3].

Kuukausimenetelmien antamat tulokset ovat käyttökelpoisia suunnittelun alkuvaiheessa. Suunnitteluvaiheen alussa rakennuksen määrittely on vielä hyvin karkealla tasolla, mutta silti energiankulutuksen ennuste on hyödyllistä tietoa arkkitehtuuristen ja muiden perustavaa laatua olevien linjojen päättämisessä. Näitä ovat mm. materiaalien valinta, rakennuksen suuntaus, koko ja muoto.

Suunnitelmien tarkentuessa tuntitasoenergialaskenta on useimmiten välttämätöntä luotettavien tulosten saamiseksi. Tässä vaiheessa rakennuksen arkkitehtuurinen suunnittelu on jo pitkällä ja rakennuksen energiankulutukseen eniten vaikuttavat asiat ovat jo päätetty ja niiden muuttaminen on kalliimpaa. Tuntimenetelmä onkin omiaan esim. jäähdytyslaitteiden mitoittamista varten, sisäilmaston suunnitteluun tai ikkunoiden valintaan.

3.2 Dynaaminen energialaskentamenetelmä

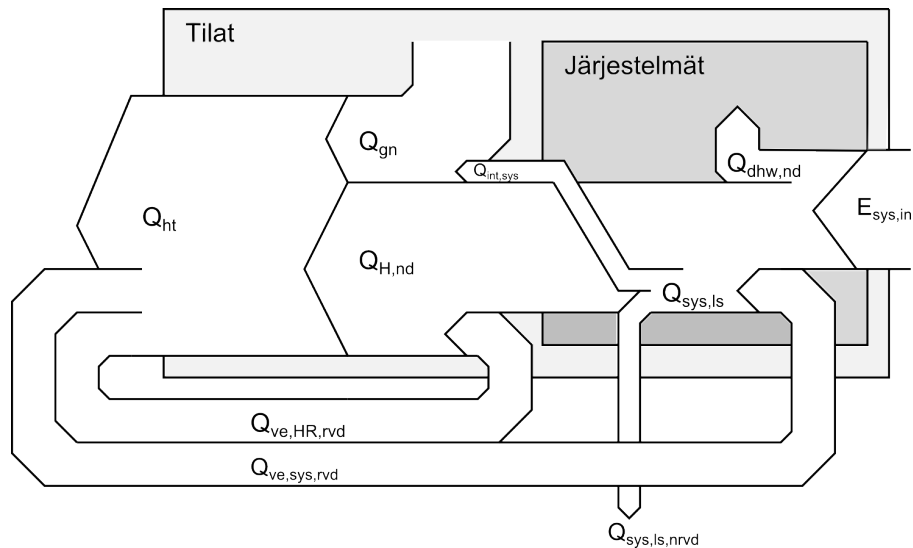
Dynaamisessa menetelmässä rakennuksen rakenteisiin varastoituneen lämpöenergian vaihtelu laskeaan ajan suhteen käyttäen, niin pientä aika-askelta, että energialaskentaan saadaan mukaan vuorokauden aikana luonnollisesti vaihtuvien ympäristömuuttujien vaikutukset. Näitä ympäristömuuttujia ovat esimerkiksi ulkolämpötila ja auringonsäteilyn intensiteetti. Yleensä käytetty aika-askel on yksi tunti, jolloin rakennuksen energiatase lasketaan jokaiselle tunnille erikseen. Vaihtoehtona on käyttää esim. kuukauden mittaista aika-askelta, jolloin menetelmää ei voi ymmärrettävästi enää kutsua dynaamiseksi.

Jako dynaamisiin ja ei-dynaamisiin menetelmiin on pohjimmiltaan vain yksi tapa luokitella energialaskentaohjelmistoja. Dynaamisen energialaskentaohjelmiston antamat tulokset rakennuksen energiankulutuksesta vuositasolla eivät välttämättä ole yhtään sen lähempänä totuutta kuin ei-dynaamisen energialaskentaohjelmiston antamat tulokset. Lisäksi ei-dynaamisen ja dynaamisen laskentamenetelmän antamat tulokset voivat olla hyvinkin lähellä toisiaan. Dynaamisen laskentamenetelmän etu on kuitenkin sen antamat yksityiskohtaisemmat tiedot rakennuksen toiminnasta, ja siksi niiden käyttöä suositellaan isoille ja monimutkaisille rakennuksille.

3.3 Tilojen energiatase

Tilan lämmityksen ja jäähdytyksen nettoenergiatarpeet lasketaan rakennuksen tilojen energiataseeseen perusteella. Energiatase muodostuu kaikista tilaan tulevista ja sieltä poistuvista energiavirroista jotka vaikuttavat sisäilman lämpötilaan. Energiavirta voi olla esimerkiksi ilmastokosteuteen sitoutunutta lämpöä, joka ei nosta lämpötilaa. Tällaisia energiavirtoja kutsutaan latenteiksi lämmönlähteiksi ja niitä ei oteta huomioon tilan energiataseessa, vaikka rakennuksen toimivuuden kannalta ovatkin hyvin tärkeitä.

Tilojen energiatase on joko positiivinen tai negatiivinen. Positiivinen tase tarkoittaa sitä, että tilan sisälämpötilan pitämiseksi ennallaan tulee tilaan tuoda lämpöenergiaa rakennuksen lämmitysjärjes-

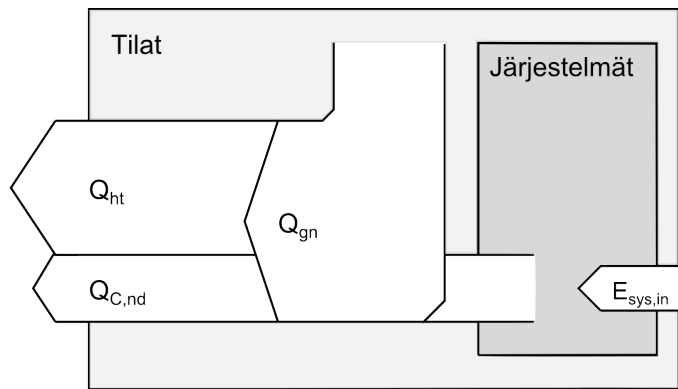


Kuva 3.1: Tavallisen lämmitystilanteen energiavirtauksien vuokaavio. $Q_{H,nd}$ on tilojen lämmitysenergiatarve ja $E_{sys,in}$ on lämmitysjärjestelmän ostoenergiatarve.

telmästä. Negatiivinen tase tarkoittaa vastaavasti jäädytystarvetta, eli tilasta on poistettava lämpöenergiaa. Kuvassa 3.1 on kuvattu normaalin lämmitystilanteen energiavirtauksia yksittäisessä tilassa. Tilojen lämmitysenergiatarve on kuvassa $Q_{H,nd}$, joka saadaan kun tilojen lämpöhäviöistä Q_{ht} vähennetään sisäisten lämmönlähteiden Q_{gn} vaikutus. Näiden sisäisten lämmönlähteiden vaikutusta sanotaan lämpökuormaksi. Näin saatu lämmityksen nettoenergiatarve on lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmien (kuvassa järjestelmät) energiataaseen määrittämisen lähtökohta. Eli tilan lämmitystarve tyydytetään lämmitysjärjestelmien tuottamalla energialla ja tämä muodostaa energiatarpeen *järjestelmien* tasolla $E_{sys,in}$, joka on käytännössä ostoenergiaa kuten sähköä, kaukolämpöä tai polttoainetta. Tämä on lähes aina positiivinen. Negatiivinen arvo tarkoittaisi sitä että rakennus tuottaa energiaa enemmän kuin kuluttaa, jolloin se olisi ns. plus-energiatalo [50].

Tilojen ja järjestelmien välinen vuorovaikutus ei ole vain yksisuuntaisesti järjestelmistä tiloihin. Kuvassa 3.1 on esimerkkinä poistoilmasta talteenotetut energiavirrat $Q_{ve,HR,rvd}$ ja $Q_{ve,sys,rvd}$. Ensimmäinen tapaus $Q_{ve,HR,rvd}$ kuvaa ilmanvaihtojärjestelmän poistoilmasta tuloilmaan siirtyvää energiavirtaa. Tämän suunta on tiloista takaisin tilaan. Virta $Q_{ve,sys,rvd}$ voisi olla esimerkiksi poistoilmalämpöpumppu, joka ottaa poistoilman lämpöenergiaa talteen lämmitysjärjestelmään. Tämän suunta on tiloista järjestelmiin. Lämmitysjärjestelmien häviöistä osa lasketaan tiloja lämmittäväksi lämpökuormaksi (kuvassa $Q_{int,sys}$). Nämä häviöt riippuvat lämmitysjärjestelmän kuormituksesta eli tilojen energiatarpeesta, joka vuorostaan riippuu sisäisistä lämpökuormista.

Jäädytystilanteessa (kuva 3.2) tilan lämpökuormat ovat suurempia kuin lämpöhäviöt. Tällöin $Q_{C,nd}$ kuvaa sisälämpötilan säilyttämiseksi tilasta poistettavaa lämpövirtaa. Tätä suuretta kutsutaan jäädytysenergian nettotarpeeksi. Vaikka fysikaalisesti lämmittäminen ja jäädyttäminen ovat hyvin erilaisia prosesseja, mallintamisessa on yksinkertaisempaa ajatella jäädytysenergia eräänlaisena negatiivisena lämmitysenergiana, joka ”vie” ylimääräisen lämpöenergian tilasta. Käytännön syistä tästä eteenpäin käytetään termejä lämmitysenergia ja jäädytysenergia, vaikka jäädytysenergialle ei ole fysikaalista vastinetta. Jäädytysenergia tarkoittaa sitä lämpöenergian määrää, mikä poistetaan tilasta.



Kuva 3.2: Tavallisen jäädytystilanteen energiavirtauksien vuokaavio. $Q_{C,nd}$ on tilojen jäädytysenergiantarve ja $E_{sys,in}$ on jäädytysjärjestelmän ostoenergiantarve.

Näin jäädytysenergia toimii yhtälöissä lämmitysenergian vastinparina ja helpottaa formulointia.

3.4 Rakennusten energiatehokkuus ja siihen vaikuttavat tekijät

Rakennuksen energiankulutukseen vaikuttaa ympäröivä ilmasto, suunniteltu sisäilmasto ja rakennuksen lämpötekniset ominaisuudet. Lisäksi energiankulutukseen vaikuttaa siinä tapahtuvien prosessien energiankulutus, esim. lämpimän käyttöveden tuotto ja jakelu, liesituulettimien käyttö, kodinkoneiden käyttö ja muu rakennuksen käyttäjien energiaa kuluttava toiminta. Nämä kulutuslähteet ovat erittäin riippuvaisia asukkaiden tottumuksista ja rakennuksen käyttötarkoituksesta, joten niiden parantamisessa saavutettujen säästöjen toteaminen on lähtökohtaisesti mahdotonta energiasimulaation keinoin.

Kylmissä pohjoisissa ilmastoissa rakennuksen energiankulutus on suurimmalta osin riippuvainen ulko- ja sisälämpötilan välisestä erosta. Tästä juontaa Suomessa yleinen tapa käyttää lämmitystarvelukuja rakennusten energiankulutuksen ennustamiseen⁴. Tämä menettely on kuitenkin harhaanjohtava, koska auringon säteilyenergian lämmittävä osuus voi kattaa jopa kymmeniä prosentteja lämmitystarpeesta. Lisäksi auringon lämmittävä vaikutus on suhteessa sitä suurempi, mitä pienempiä ovat johtumisen lämpöhäviöt. Eli energiatehokkaassa rakentamisessa auringon vaikutus on suuri. Näin ollen lämmitystarvelukuihin perustuva energialaskenta on liian epätarkka menetelmä nykyaikaisille rakennuksille.

Rakennussimulaatioiden tekemiseen tarvittavan säädäntä tulisi sisältää vähintään absoluuttinen ulkolämpötila ja auringon säteilyn intensiteetti, jossa on eritelty säteilyn suora- ja diffusoitunut osa. Usein pelkkän keskiarvoistetun säädäntä sijasta käytetään keskiarvosäädäntä perusteella luotua energialaskennan *testivuotta*. Testivuoden kunkin kuukauden säädäntäksi valitaan vastaava kuukausi sellaiselta vuodelta, jonka aikana kyseisen kuukauden sääolot ovat mahdollisimman lähellä ilmastollista keskimääräistä tilaa. Näin testivuoden jokainen kuukausi vastaa jotain oikeaa kuukautta, jolloin sääolojen vaihteluvuus on realistisempaa, kuin pelkästään keskiarvoja käyttäen [19].

Sisäilmaston suunnittelun lähtökohtana on ihmisen terminen viihtyvyys. Kirjassaan Energia- ja Ekologiakäsikirja Marko Lappalainen kirjoittaa termisestä viihtyvyydestä seuraavasti [41]:

4. Lämmitystarveluku saadaan laskemalla jokaisen päivän keskimääräisen ulkolämpötilan ja sisälämpötilan (+17 °C) erotuksen summa. Mikäli yksittäisen tunnin erotus on negatiivinen, on kyseessä jäädytystarveluku.

Taulukko 1: Termiseen viihtyvyyteen vaikuttavat tekijät ANSI/ASHRAE 55-2010 mukaan [6].

Yleiset tekijät	Lokaalit tekijät
Sisälämpötila	Lämpötilakerrostuma
Operatiivinen lämpötila	Lattian lämpötila
Ilmankosteus	Säteilylämpötilan epäsymmetria
Ilman nopeus	Veto
Henkilökohtaiset tekijät	
Aineenvaihdunta	
Vaatetus	

”Termisellä viihtyvyydellä tarkoitetaan mielentilaa, joka ilmaisee tyytyväisyyttä termisiä ympäristöoloja kohtaan. Käytännössä tämä merkitsee sitä, että henkilö ei osaa sanoa, haluaisiko hän muuttaa ympäristönsä lämpimämmäksi vai kylmemmäksi.”

Ihmisten väliset erot vaatetuksessa, aineenvaihdunnan tasossa ja lämpötilaherkkyudessa, johtaa kuitenkin siihen, että kaikkia tyydyttävien termisten olojen saavuttaminen on mahdotonta mikäli ihmisiä on tilassa tarpeeksi monta. Yleisten termiseen viihtyvyyteen liittyvien parametrien (sisälämpötila, -kosteus ja ilmannoisuus) perusteella voidaan kuitenkin luoda raja-arvot termiselle viihtyvyydelle. Näiden raja-arvojen sisällä termisiin oloihin tyytymättömien osuus on keskimäärin alle jonkun sovitun lukeman, esim. alle 10% tilan käyttäjistä on tyytymättömiä. ANSI/ASHRAE 55-2010 [6] standardin mukaisesti terminen viihtyvyys määritetään 10 tekijän avulla (taulukko 1).

Yleisillä tekijöillä tarkoitetaan koko tilan olosuhteita kuvaavia suureita, joita ovat sisälämpötila, operatiivinen lämpötila⁵ ja ilmankosteus ja ilman nopeus. Sisälämpötila ilmoittaa ilman lämpötilan ilman siihen sitoutunutta kosteutta. Säteilylämpötila ilmoittaa sen lämpötilan missä säteilyllisesti mustan tilan pitäisi olla, jotta tilassa oleva henkilö vaihtaisi lämpösäteilemällä saman määrän energiaa, kuin itse oikeassa tilassa. Säteilylämpötilalla otetaan siis huomioon sisäilman lämpötilasta poikkeavien pinta- lämpötilojen vaikutus tilassa olevan henkilön lämmöntunteeseen. Vaikka sisälämpötila olisi sopiva, mutta ympäröivät rakenteet ovat kylmiä, voi ihminen tuntea olonsa termisesti epämukavaksi. Vaate- tus on hyvä keino vähentää tätä lämpöhukkaa säteilemällä. Ilman kosteus vaikuttaa ihmisen kykyyn säädellä ruumiinlämpötilaansa hikoilemalla. Tällöin sopivan lämpöinen, mutta kostea ilma koetaan tukalaksi. Toisaalta liian kuiva ilma aiheuttaa limakalvojen kuivumista, huonontaa sisäilman laatua ja sitä kautta aiheuttaa hengitysoireita. Tilassa olevan ilman nopeus, eli ilman vaihtuvuus, vaikuttaa ihmisen ihon pinnan lämmönsiirtonopeuteen konvektion kautta. Nopeammin virtaava ilma saa ihmisen tuntemaan olonsa viileämmäksi. Toisaalta sisäilman laadun takaamiseksi tilassa olevan ilman on vaihduttavat. Tämä on ainoa tapa poistaa ihmisen uloshengittämät CO₂ -kaasut. Lisäksi ihmisen toiminnasta tulee ilmaan muitakin epäpuhtauksia, jotka on poistettava tilasta.

Lokaalit tekijät voivat pilata muuten hyvät *yleiset* termiset olot [42]. Ihminen on luonnostaan her- kempi lämpötilan vaihteluille, kuin absoluuttiselle lämpötilalle⁶. Näin ollen esimerkiksi liian suuret lämpötilaerot jalkojen ja pään välillä (lämpötilakerrostuma), kylmä lattia (lattia lämpötila), lämmin

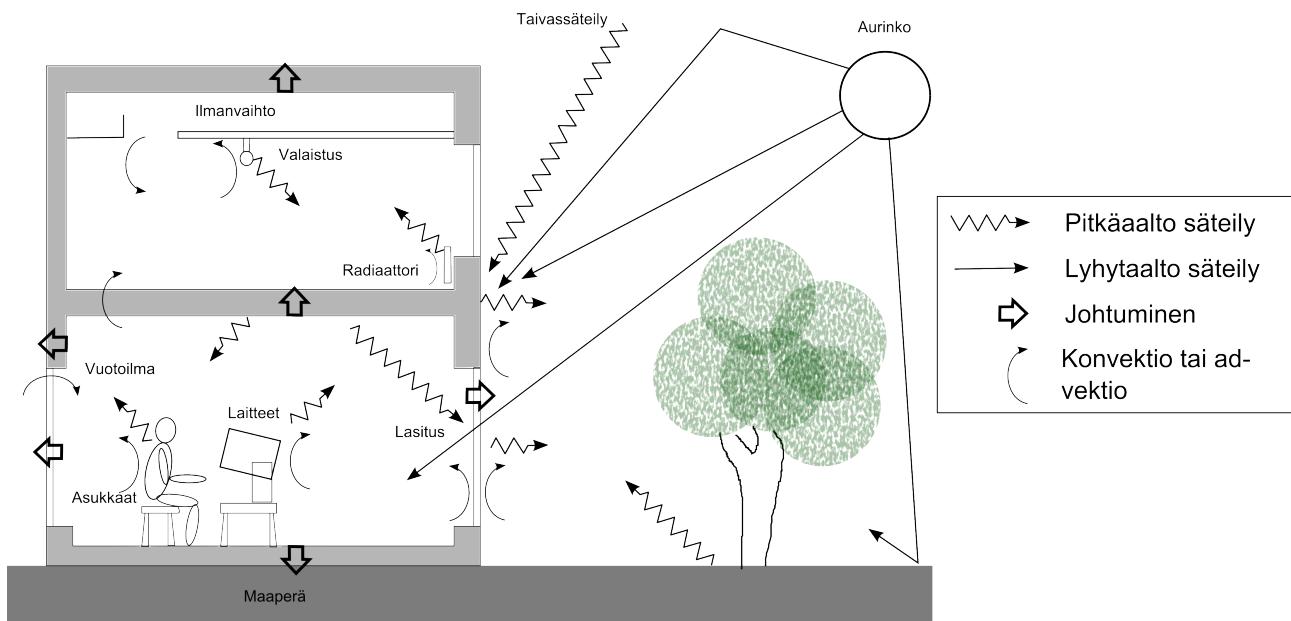
5. Operatiivinen lämpötila on sama kuin ns. tehollinen lämpötila. Eli lämpötila jonka tilassa oleva ihminen kokee.

6. Tämän voi testata itse laittamalla kädet eri lämpötiloissa oleviin vesiastioihin. Jopa asteen lämpötilan eron havaitse- minen ei ole kovin hankala tempu.

lattia mutta kylmät ulkoseinät (säteilylämpötilan epäsymmetria) tai veto voivat tehdä oloista epämu-
kavat suuremmalle osalle ihmisiä kuin on suunniteltu. Nämä tekijät johtuvat yleensä rakentamisen
aikana tai suunnittelussa tapahtuneista virheistä.

Rakennusten energiasimuloinnin kannalta on oleellista tietää, mikä operatiivinen lämpötila raken-
nuksessa on tarkoitus ylläpitää. Muut termiset tekijät eivät vaikuta energiavirtoihin. Poikkeuksen te-
kee kosteuteen sitoutunut lämpöenergia, mutta se jätetään laskelmista pois olettamalla, että rakennuk-
sessa olevat kosteusolot ovat vakiot. Tämä ei useimmiten ole kovin realistinen oletamus. Kosteuteen
sitoutunut lämpö ei kuitenkaan vaikuta mitenkään rakennuksen lämpöhäviöihin johtamalla tai sätei-
lemällä. Lisäksi kosteuden hallintaan kykenevien ilmanvaihtolaitteiden käyttö – varsinkin Suomessa
– voidaan pitää enemmänkin käyttömukavuuteen kuin energiatehokkuuteen liittyvänä asiana. Näin
ollen oletus vakioiduista kosteusoloista on sama, kuin oletus siitä, ettei kosteus vaikuta mitenkään.
Tällä oletuksella pelkän operatiivisen lämpötilan pohjalta voidaan määrittää tilojen lämmittämiseen
tarvittava energia.

3.5 Lämmön siirtymisen prosessit rakennuksissa



Kuva 3.3: Skemaattinen kuva rakennuksen tuntuvaan lämpötilaan vaikuttavista energiavirtauksista.

Rakennuksissa tapahtuu lämmönsiirtoprosesseja kaikilla kolmella tavalla: johtamalla, konvektiolla ja
säteilemällä. Kuvaan 3.3 on piirretty sisäilman ja ulkopinnan, ulkoilman ja ulkopinnan, sisäilman ja
radiaattorin väliset konvektiiviset virrat. Näissä lämpövirta on lähinnä diffusiivista, kun pinnan lähei-
syydessä olevat ilmahiukkaset lämpenevät (tai jäähtyvät). Samalla tavalla lämpö siirtyy rakennuksen
asukkaiden, laitteiden ja valaistuksen kautta sisäilmaan. Jos sisäilmaa ei sekoiteta nämä diffusiiviset
lämpövirrat aiheuttavat sisätilaan lämpötilakerrostuman, jossa lämpimämpi ilma kohoaa viileämmän
ilman yläpuolelle muodostaen erilämpöisiä ilmakerroksia. Tällöin tilassa voi esiintyä varsin voimak-
kaitakin advektiivisia virtauksia alaosan kylmistä kerroksista yläosan lämpimiin kerroksiin. Tämä
aiheuttaa tilaan ylimääräistä vetoa ja näin lämpötilakerrostumalla on merkittävä vaikutus termiseen

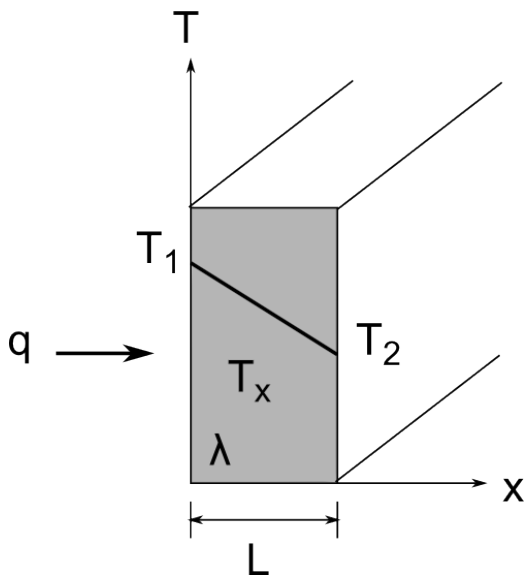
viihtyvyyteen. Lämpötilakerrostumalla on myös vaikutus energiatehokkuuteen sillä se vaikuttaa lämmitysjärjestelmän lämpöpattereiden hyötysuhteeseen; kun tilan keskilämpötila ei ole sama kuin lämpöpatteri ”kokema” lämpötila, radiaattorin termostaatti ei voi toimia optimaalisella tavalla.

Ilmanvaihtolaitteen ja rakenteiden vuotokohtien kautta tilaan sisään tuleva ilmavirta on niin ikään konvektiivinen virta, mutta tässä tapauksessa virtauksen luonne on advektiivinen. Ilmanvaihtolaitteen tuuletin pakottaa ilmaa tilaan ja sieltä pois. Vuotoilmaa ajaa rakennuksen sisä- ja ulkotilan välinen paine-ero, joka johtuu sekä ilmanvaihtojärjestelmästä että luonnollisista syistä kuten tuulen aiheuttamista paine-eroista. Usein vuotoilma johtuu rakentamisvaiheessa tapahtuneiden virheiden johdosta rakenteisiin jääneistä aukoista ja rei’istä. Vuotoilmalla on merkittävä vaikutus termiseen viihtyvyyteen yleisellä tasolla, mutta myös lokaalilla tasolla jos rakenteissa oleva reikä aiheuttaa epätasaista vetoa. Hallitsemattomat ilmanvuodot voivat lisäksi viedä kosteutta rakenteiden eristyksiin. Täysin tiivistä rakennusta on mahdoton tehdä, mutta edellä mainittujen seikkojen tähden siihen tulisi pyrkiä.

Säteilemällä siirtyvät lämpövirrat on jaettu kahteen eri tyyppiin säteilyn aallonpituuden suhteen: lyhyt- ja pitkäaaltoinen säteily [17]. Lyhytaaltoisella säteilyllä tarkoitetaan auringosta tulevaa säteilyä. Käytännössä tämä tarkoittaa säteilyä aallonpituuksien $0.3 \mu\text{m}$ ja $3.0 \mu\text{m}$ väliltä, koska maan pinnalle tulevan auringon säteilyn intensiteetti on vähäistä muilla aallonpituuksilla. Pitkäaaltoinen säteily tarkoittaa käytännössä infrapunasäteilyä jonka aallonpituudet ovat yli $3 \mu\text{m}$. Pintojen välinen säteilyvuorovaikutus on tällaista pitkäaaltoista säteilyä. Kuvaan 3.3 on piirretty auringosta tulevasta säteilystä sädemäinen säteily, diffusoitunut- ja maaperästä heijastunut säteily. Suora säteily on suoraan auringosta tulevan sädemäisen säteilyn osuus. Diffusoitunut säteily on ilmakehässä sironnutta koko taivaan laajuudelta tulevaa säteilyä.

Auringon säteily siirtyy sisätiloihin läpinäkymättömien ulkorakenteiden kautta ensin absorboituen ja siitä säteillen sisätiloissa oleviin pintoihin, ihmisiin ja esineisiin ja konvektion kautta sisäilmaa lämmittäen. Yleisimmissä tapauksissa suurin osa lämpösaannosta muuttuu säteilyhäviöksi taivaalle, mutta esimerkiksi tummien, huonosti lämpöeristettyjen tai suurten taivasta kohti olevien pintojen aiheuttamat auringon säteilyn lämpösaannot voivat olla merkittäviä koko rakennuksen tasolla. Tästä johtuen onkin tärkeää ottaa huomioon myös rakennuksesta ympäristöön, eli taivaalle säteilevän pitkäaaltoisen säteilyenergian osuus.

Lisäksi lämpöä siirtyy ilmankosteuteen sitoutuneena tällaisia prosesseja ovat mm. ihmisen uloshengittämä vesihöyry, ilmankostuttimet ja ulkoilmasta kosteuden mukana siirtyvä entalpia. Tätä lämmönsiirtoa kutsutaan latentiksi lämpösiirroksi, koska se ei vaikuta sisäilman lämpötilaan. Energiatehokkuuden näkökulmasta energiamallintamisessa ollaan kiinnostuneita ainoastaan sisälämpötilan ylläpitämisestä, koska se on ainoa rakennuksen energiankulutusta määräävä tekijä. Täten latentit lämpösaannot/-häviöt ollaan jätetty huomiotta. Latentit lämpövirrat vaikuttavat merkittävästi sisäilman kosteuteen ja sitä kautta ihmisten termiseen viihtyvyyteen, joten rakennuksen suunnittelussa latentit lämpövirrat tulee ottaa huomioon [41].



Kuva 3.4: Yksiulotteinen lämmönsiirto johtumalla

3.6 Lämmonjohtuminen

Kuvitellaan tilanne, jossa L paksuisen seinän toisella puolella on lämpötila T_1 ja toisella T_2 . Yleinen lämpöyhtälö on

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = 0. \quad (1)$$

Nyt käsitellään tasapainotilannetta jolloin lämpötilajakauma seinän sisällä ei muutu ajan suhteen, eli $\partial T / \partial t = 0$. Oletetaan lämpövuon kulkevan vain x -akselin suuntaan, jolloin yhtälö (1) saa muodon

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0, \quad (2)$$

josta integroimalla x :n suhteen saadaan

$$T = C_1 x + C_2, \quad (3)$$

missä C_1 ja C_2 ovat integroimisvakioita. Ne voidaan ratkaista sijoittamalla reunaehdot

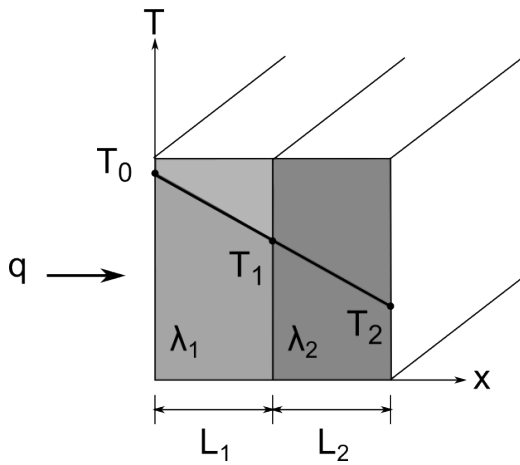
$$T = \begin{cases} T_1, & \text{kun } x = 0 \\ T_2, & \text{kun } x = L \end{cases} \quad (4)$$

josta saadaan

$$C_2 = T_1 \quad \text{ja} \quad C_1 = \frac{T_2 - T_1}{L}. \quad (5)$$

Nyt sijoittamalla nämä takaisin yhtälöön (3) saadaan lämpötilajakaumalle lineaarinen funktio

$$T = \frac{T_2 - T_1}{L} x + T_1. \quad (6)$$



Kuva 3.5: Yksiulotteinen lämmönsiirto johtumalla kahden pinnan läpi

Nyt voimme todeta, että tilanteella on seuraavat ominaisuudet: lämpövirta on tasapainotilanteessa, lämpövirta on yksiulotteista, molemmat pinnat ovat isotermisiä⁷, johtava materiaali on isotrooppista⁸, johtava materiaali on muutenkin homogeeninen ja syntyvä lämpötilagradientti on lineaarinen. Näin ollen voimme käyttää Fourier'n lakia, jonka mukaan lämpövuon q (W/m^2) ja lämpötilajakauman $T(x)$ välillä on yhteys

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}, \quad (7)$$

missä λ on materiaalin lämmönjohtavuus ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$). Miinusmerkki tulee siitä, että lämpöenergia kulkeutuu lämpötilajakauman pienenevään suuntaan. Sijoittamalla lämpötila yhtälöstä (6) yhtälöön (7) saadaan lämpövuoto

$$q = -\lambda \frac{d}{dx} \left[\frac{T_2 - T_1}{L} x + T_1 \right] = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{L} = \frac{\lambda}{L} (T_1 - T_2). \quad (8)$$

Tämä pätee yhdelle homogeeniselle materiaalikerrokselle. Yleensä rakennuksien ulkoelementit muodostuvat useista eripaksuisista materiaalikerroksista, jolloin on tapana määrittää koko seinärakenteelle ominaislämpöhäviökerroin U ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$). Tasapainotilanteessa lämpövuoto pysyy vakiona, eli

$$q = \frac{\lambda_1}{L_1} (T_1 - T_0) = \frac{\lambda_2}{L_2} (T_2 - T_1) \quad (9)$$

$$\Rightarrow q = \frac{T_0 - T_2}{L_1/\lambda_1 + L_2/\lambda_2}. \quad (10)$$

Nyt voimme määrittää, että

$$q = U(T_0 - T_2). \quad (11)$$

7. Lämpötilat ovat vakiota ja tasaiset molemmilla pinnoilla

8. Lämpövirran suunnalla ei ole merkitystä

Määritetään vielä lopuksi ominaislämpöväiökertoimen käänteisluku eli lämpövastus R ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$),

$$R = \frac{1}{U} = L_1/\lambda_1 + L_2/\lambda_2. \quad (12)$$

3.7 Konvektio

Konvektiivinen lämpövirta tarkoittaa kaasuhiukkasten liikkeen mukana siirtyvää lämpöenergiaa systeemissä. Tämä liike koostuu kahdesta mekanismista. Liike voi olla joko *diffusiivista*, jolloin sitä ajaa hiukkasten satunnainen Brownin liike, tai sitten liike voi olla *advektiivista*, jolloin liike kulkee suurien hiukkaskeräytymien tavalla. Lämpötilagradientin läsnäollessa hiukkasten liikkeen kautta syntyy liikkeen suuntainen lämpövuoto. Virtaavan hiukkaskeräytymän sisällä olevat hiukkaset säilyttävät satunnaisen liikehännän, jolloin lämmönsiirtoon vaikuttaa molempien siirtomekanismien superpositio. Tällaista lämmönsiirtoa sanotaan konvektioksi. Energian siirtymiseen virtaavan hiukkaskeräytymän mukana voidaan käyttää virtausmekaniikasta tuttua Reynoldsin kuljetusteoreemaa [51], joka yleisessä muodossaan on

$$\frac{d}{dt}(B_{\text{sys}}) = \frac{d}{dt} \left(\int_{\text{CV}} \beta \rho dV \right) + \int_{\text{CS}} \beta \rho (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dA, \quad (13)$$

missä B on virtaavan aineen jokin ominaisuus ja β tämän ominaisuuden määrä massayksikköä kohden. Olkoon tämä ominaisuus virtaavan aineen energia, jolloin $B = E$ ja $\beta = dE/dm = e$. Lyhenne CV tarkoittaa kontrollitilavuutta ja CS kontrollitilavuuden pintaa, eli rajapintaa. Lihavoiduilla symboleilla tarkoitetaan vektorikenttiä, eli \mathbf{v} on virtauksen nopeuskenttä ja \mathbf{n} on rajapintaan nähden kohtisuora yksikkövektorikenttä. Kun Reynoldsin kuljetusteoreema energian suhteen yhdistetään termodynamiikan ensimmäisen lain kanssa, saadaan

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\int_{\text{CV}} e \rho dV \right) + \int_{\text{CS}} e \rho (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dA. \quad (14)$$

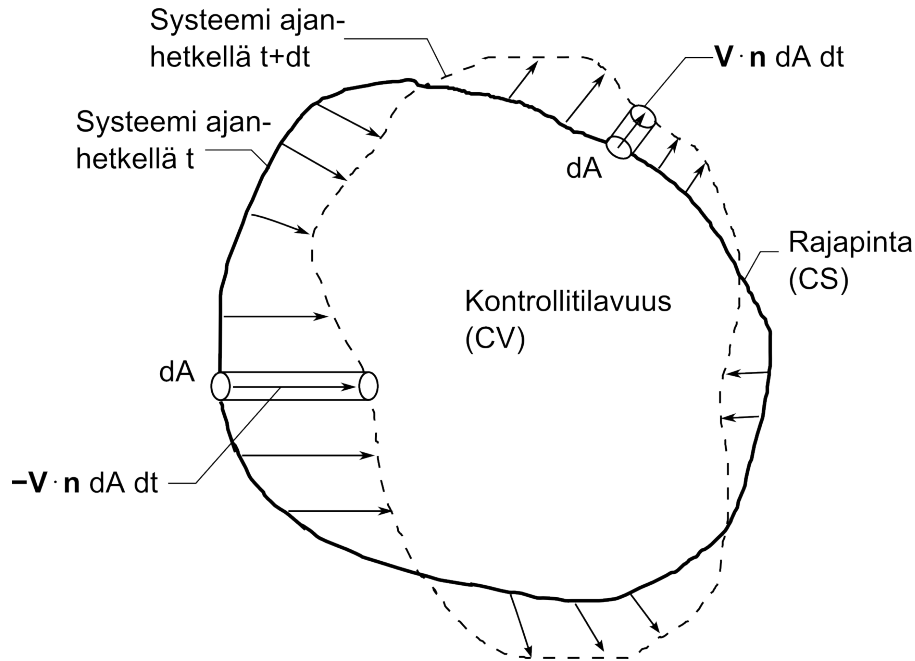
Systeemin energia massaa kohden e sisältää systeemin sisäenergian, kineettisen energian ja potentiaalienergian, eli

$$e = \hat{u} + \frac{1}{2}v^2 + gz, \quad (15)$$

missä z on etäisyys nollapotentiaalisiin suhteisiin, g gravitaatiovakio ja v virtausnopeus. Työtermi dW/dt on käsiteltävissä tapauksissa ainoastaan paineen tekemä työ rajatilavuuden pinnalla, eli

$$\frac{dW}{dt} = \int_{\text{CS}} p (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dA, \quad (16)$$

missä p on paine. Nyt lisäämällä yhtälö (16) kuljetusteoreeman energiaversioon yhtälöön (14) saadaan



Kuva 3.6: Mielivaltainen virtauskenttä mielivaltaisessa kontrollitilavuudessa

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\int_{CV} e \rho dV \right) + \int_{CS} \left(e + \frac{p}{\rho} \right) \rho (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dA. \quad (17)$$

Kun lisätään e yhtälöstä (15) huomataan, että entalpia $\hat{h} = \hat{u} + p/\rho$ esiintyy pinta-integraalitermissä. Näin ollen yleinen muoto energian kulkeutumiselle paikallaan olevassa kontrollitilavuudessa on

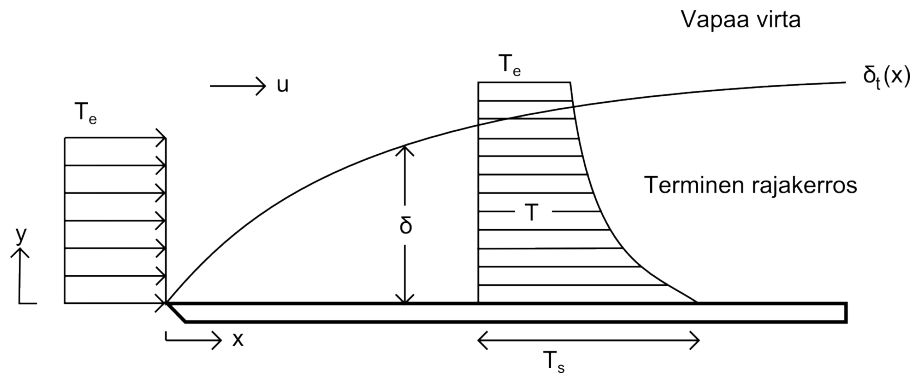
$$\frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\int_{CV} \left(\hat{u} + \frac{1}{2}v^2 + gz \right) \rho dV \right) + \int_{CS} \left(\hat{h} + \frac{1}{2}v^2 + gz \right) \rho (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dA. \quad (18)$$

Jos ajatellaan rakennuksen ilmavirtoja, niin voidaan perustellusti käsitellä yhtälöä (14) yksiulotteisena tapauksena. Tällöin oletetaan, että virtauksen ominaisuudet eivät muutu poikkileikkauksen suhteen sisään- ja ulostuloissa. Nyt pinta-integraalitermit voidaan muuttaa summatermeiksi

$$\int_{CS} \left(\hat{h} + \frac{1}{2}v^2 + gz \right) \rho (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dA = \sum_{\text{ulos}} \left(\hat{h} + \frac{1}{2}v^2 + gz \right)_i \dot{m}_i - \sum_{\text{sisään}} \left(\hat{h} + \frac{1}{2}v^2 + gz \right)_i \dot{m}_i \quad (19)$$

missä $\dot{m}_i = \rho_i A_i v_i$. Koska kontrollitilavuus on staattinen⁹, $dV = 0$ ja tilavuustermi yhtälöstä 18 katoaa. Voimme olettaa, että virtauksen kineettinen energia ei muutu kontrollitilavuudessa. Tällöin ajatellaan, että rakennukseen virrannut ilmavirta tulee rakennuksesta samalla nopeudella pois, mikä tarkoittaa myös sitä, että massavirrat sisään- ja poistuloissa ovat samat. Potentiaalienergia ei muutu rajatilavuuden ollessa staattinen, jolloin ainut energian kulkeutumiseen vaikuttava tekijä on virtauksen

9. Rakennuksen seinät pysyvät paikallaan



Kuva 3.7: Termisen rajakerroksen kehittyminen isotermisen tason yllä

entalpian muutos:

$$\frac{dQ}{dt} = \sum \hat{h}_{\text{out}} \dot{m}_{\text{out}} - \sum \hat{h}_{\text{in}} \dot{m}_{\text{in}}. \quad (20)$$

Rakennuksissa tapahtuvat virtausprosessit ovat isobaarisia. Tällöin yksittäisen ilmavirran - jolla on yksi sisääntulo ja yksi poisto - kuljettamaksi energiaksi saadaan

$$\frac{dQ}{dt} = c_p \dot{m} (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}), \quad (21)$$

missä c_p on ilman ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa. Tähän tulokseen pääsemiseksi tulee siis olettaa, että virtaukset rajapinnalla ovat yksiulotteisia, ilmavirtaan ei tehdä muuta kuin painetyötä rajapinnalla, leikkausvoimat ilmavirran sisällä ovat pieniä ja että kontrollitilavuus ei muutu. Nämä ovat kaikki varsin perusteltuja oletuksia rakennusten ilmavirtojen tapauksessa. Yllä oleva relaatio pätee lähinnä advektiivisten ja pakotettujen ilmavirtojen kuljettaman energian määrittämiseen.

Toinen yleinen rakennuksissa esiintyvä konvektiivinen prosessi löytyy rakennuspinoilta, joissa kiinteän ja kaasun väliselle rajapinnalla tapahtuu lämmönsiirtoa. Tällaisia prosesseja ovat mm. tuulen vaikutuksesta liikkuvan ilmassan osuminen rakennuksen ulkopintoihin sekä lämpötilakerrostuman aiheuttama ilmavirtaus rakennuksen sisäpinoilla. Tällöin liikkuva ilmavirta muodostaa pinnalle termisen rajakerroksen, kuten kuvassa 3.7 jossa lämpötilassa T_e oleva kaasu (tai neste) virtaa isotermisen pinnan myötäisesti nopeudella u . Pintaa lähimpänä olevat kaasuhiukkaset ovat termisessä tasapainossa pinnan kanssa, eli rajapinnalla $T = T_s$. Nämä hiukkaset siirtävät lämpöenergiaa pois pinnalta, jolloin virtaukseen muodostuu lämpötilagradientti T etäisyyden y funktiona. Sitä virtauksen osaa, missä lämpötilagradientti esiintyy, sanotaan termiseksi rajakerrokseksi. Termisen rajakerroksen paksuus δ on se y :n arvo, jolle $[(T_s - T)]/[(T_s - T_e)] = 0.99$. Termisen rajakerroksen paksuus riippuu tarkastelupisteen ja pinnan kärjen välisestä etäisyydestä x . Lokaali konvektiivisen lämpövirran teho saadaan soveltamalla Fourier'n lakia, kun $y = 0$, eli

$$q = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}. \quad (22)$$

Koska rajapinnalla ei ole virtausta ja kaikki lämpö siirtyy johtamalla. Newtonin jäähtymisyhtälöä

soveltamalla saadaan ratkaistua lokaali konvektiivinen lämpöhäviökerroin

$$h_c = \frac{-\lambda \partial T / \partial y|_{y=0}}{T_s - T_e}. \quad (23)$$

Sijoittamalla yhtälöön (23) dimensiottomat muuttujat

$$y^* = \frac{y}{L} \quad (24)$$

$$T^* = \frac{(T_e - T_s)}{(T_s - T_e)} \quad (25)$$

saadaan

$$h_c = -\frac{\lambda T_e - T_s}{L T_e - T_s} \frac{\partial T^*}{\partial y^*} \Big|_{y=0} \quad (26)$$

jonka perusteella voidaan määrittää dimensioton Nusseltin luku,

$$\text{Nu} \equiv \frac{hL}{\lambda} = \frac{\partial T^*}{\partial y^*} \Big|_{y=0}, \quad (27)$$

missä L on tilannetta kuvaava karakteristinen pituus. Valistuneesti voidaan arvata, että h riippuu kaasun ominaisuuksista (λ , c_p , μ ja ρ), ilman nopeudesta u , karakteristisesta pituudesta L ja pinnan geometriasta. Hyödyntämällä dimensiottomia ryhmiä ja muuttujia saadaan

$$T^* = f(x^*, y^*, \text{Re}, \text{Pr}, dp^*/dx^*), \quad (28)$$

missä Re on virtauksen Reynoldsin luku, Pr Prandtlin luku, $x^* = x/L$ on dimensioton pituus (kuten y^* yhtälössä (24)) ja p^* on dimensioton paine. Termi dp^*/dx^* riippuu tilanteen geometriasta, jolloin yhtälöstä (27) seuraa, että määritellylle geometrialle

$$\text{Nu} = f(x^*, \text{Re}, \text{Pr}). \quad (29)$$

Tästä funktiosta voitaisiin laskea Nusseltin luku erilaisille kaasuille ja eri u :n ja L :n arvoille, josta edelleen voitaisiin ratkaista lokaali konvektiivinen pintahäviökerroin h_c . Rakennusfysiikan kannalta ollaan kuitenkin enemmän kiinnostuneita keskimääräisestä lämpövirrasta, jolloin *keskimääräinen* konvektiivinen lämpöhäviökerroin \bar{h}_c saadaan integroimalla koko pinnan yli. Tällöin lämpöhäviökerroin ei riipu muuttujasta x^* ja *keskimääräinen* Nusseltin luku on

$$\bar{\text{Nu}} = \frac{\bar{h}_c L}{\lambda} = f(\text{Re}, \text{Pr}). \quad (30)$$

Samalla tavalla voidaan johtaa korrelaatio tilanteelle, jossa ilmavirta on alhaalta ylöspäin pystysuoraa pintaa pitkin. Tällainen tilanne tulee vastaan seinien sisäpinnoilla, missä lämpötilakerrostuman noste ajaa ilmaa ylöspäin. Tällainen virtaus on tavallisesti laminaarista, jolloin voidaan käyttää seuraavaa

empiiristä korrelaatiota [12]

$$\bar{Nu} = 0,68 + \frac{0,67Ra^{1/4}}{(1 + (0,492/Pr^{9/16})^{4/9})}, \quad \text{kun } Ra \leq 10^9 \quad (31)$$

Tässä korrelaatio perustuu Rayleighin lukuun (Ra),

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_e)L^3}{\nu\alpha} \quad (32)$$

missä ν on kineettinen viskositeetti (m^2/s), β laajenemisvakio ($1/K$), g on yleinen kiihtyvyyssvakio (m/s^2) ja α kaasun diffusiviteetti. Esimerkiksi, jos $(T_s - T_e)=15$ K, $T = 293$ K, $p = 1$ atm, $\nu = 15,3 \times 10^{-6}$ m^2/s , $\lambda = 25,7 \times 10^{-3}$, $Pr=0,71$ ja $L=A/P=0,77$. Tämä vastaa yleistä tilannetta jossa sisä- ja ulkopinnan välinen lämpötilaero on 15 °C ja sisälämpötila on 20 °C. Nyt konvektiivinen pintahäviökerroin $h_c = 2,8$ W/m^2K . Seuraava korrelaatio pätee sisäpintojen horisontaalisille pinnoille [31]

$$\bar{Nu} = 0,54Ra^{1/4} \quad (10^4 \leq Ra \leq 10^7, Pr \geq 0,7) \quad (33)$$

johon sama sijoitus antaa sisäpinnalle $h_c = 2,9$ W/m^2K . Standardissa EN 13792 kehoitetaan käyttämään arvoa $h_c = 2,5$ W/m^2K ja ASHRAE 140-2011 $h_c = 3,16$ W/m^2K samankaltaiselle tilanteelle. Suomen rakentamismääräyskokoelmassa käytetään katolle $h_c = 10$ W/m^2K , seinälle $h_c = 7,7$ W/m^2K ja lattialle $h_c = 5,9$ W/m^2K . Mittauksia on tehty myös realistisen kokoisissa tilanteissa [10], ja näiden mittauksien tulokset ovat taulukossa 2.

Taulukko 2: Konvektiivisen pintahäviökertoimen h_c (W/m^2K) arvoja realistisen kokoisessa tilassa. [10]

ΔT	h_c		
	Seinät	Lattia	Katto
5	2,0-3,4	2,8-3,3	0,25-0,8
15	2,9-4,5	4,1-4,7	0,35-1,05

Ulospäin osoittavan pinnan konvektiivinen pintahäviökerroin on huomattavasti vaikeampi määrittää. Tässä tapauksessa lämpöhäviö riippuu niin merkittävästi tuulennopeudesta, että muita empiirisiä korrelaatioita ei yleisesti edes käytetä. CIBSE kehoittaa käyttämään taulukossa 4 lueteltuja arvoja. Suomen rakentamismääräyksen mukaan ulkopinnalle $h_c = 25$ W/m^2K ja EN 13792 mukaan $h_c = 8$ W/m^2K . ASHRAE 140-2011 käytetään tuulennopeuteen ja pinnan karheuteen perustuvaa korrelaatiota

$$h_c = a_1 + a_2V + a_3V^2, \quad (34)$$

missä V on tuulennopeus ja vakiot a_1 , a_2 ja a_3 pinna karheudesta riippuvia korjauskertoimia (taulukko 3). Tähän esimerkksisijoitus $V=3$ m/s , tuottaa häviökertoimeksi $h_c = 29,3$ W/m^2K (stukko), $24,9$ W/m^2K (tiili), $23,4$ W/m^2K (betoni), $19,7$ W/m^2K (puu), $19,5$ W/m^2K (sileä rappaus), $18,2$ W/m^2K (lasi). Mainittakoon myös Loveday & Takin tutkimus [43], jossa on päädytty ”normaalioloissa” ole-

valle pinnalle arvoon $h_c = 23,6 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Taulukko 3: Konvektiivisen pintahäviökertoimen h_c laskemiseen käytettäviä materiaalienkohtaisia kertoimia yhtälöön (34). ASHRAE 140-2011 [7].

Materiaali	a_1	a_2	a_3
Stukko	11,58	5,894	0,0
Tiili/karhea	12,49	4,065	0,28
Betoni	10,79	4,192	0,0
Puu	8,23	4,0	-0,057
Sileä rappaus	10,22	3,1	0,0
Lasi	8,23	3,33	-0,036

Taulukko 4: Konvektiivisen pintahäviökertoimen h_c ($\text{W/m}^2\text{K}$) arvoja ulkopinnoille. CIBSE Guide Book A [11].

Lämpövirran suunta	Suojaisa	Normaali	Avoim
Vaaka	12,5	17	33
Ylös	14	25	50
Alas	14	25	50

3.8 Pitkäaaltoisen säteilyn lämmönsiirto

Rakennuksissa tapahtuu säteilylämmönsiirtoa kahdenlaisilla pinnoilla, läpinäkymättömillä ja läpinäkyvillä. Läpinäkyvillä pinnoilla tarkoitetaan auringon säteilyä läpäiseviä ikkunoita ja muita valoaukkoja. Lyhytaaltainen auringonsäteily ($\lambda=0,3 - 3 \mu\text{m}$) läpäisee tällaisen pinnan ja täten lämmittää rakennuksen sisäilmaa.

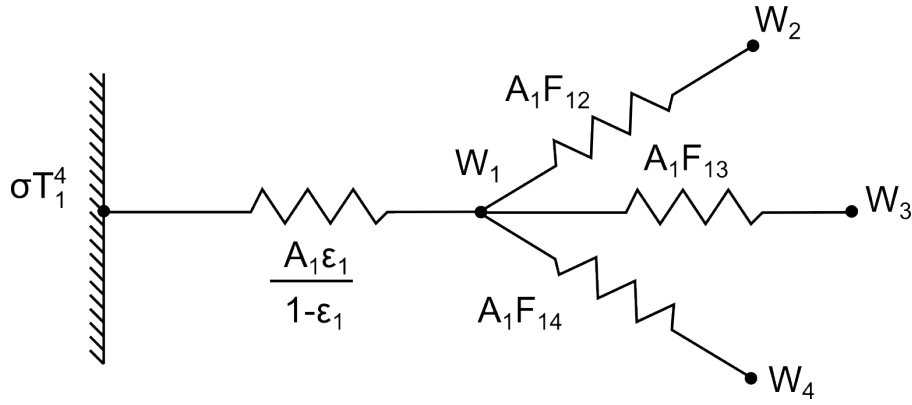
Säteilyn osuessa pinnalle osa heijastuu takaisin, osa absorboituu pintaan ja läpinäkyvien pintojen tapauksessa osa läpäisee pinnan. Näiden prosessien keskinäinen suhde määräytyy materiaalin optisista ominaisuuksista siihen osuvan säteilyn aallonpituuksilla. Nämä ominaisuudet summautuvat yhteen siten, että

$$\alpha + \rho + \tau = 1, \quad (35)$$

missä α on materiaalin absorptanssi, ρ heijastussuhde ja τ läpäisysuhde. Läpinäkymättömälle pinnalle $\tau = 0$, jolloin

$$\alpha + \rho = 1. \quad (36)$$

Kokemusperäisesti voidaan todeta, että kuuma kappale hohkaa lämpöä. Tämä johtuu ihon ja kappaleen pinnan välisestä säteilyvuorovaikutuksesta, jossa iho absorboi kappaleen emittoimaa säteilyä. Emittoituva säteily määräytyy kappaleen pinnan emissiivisyydestä ϵ . Täydellisesti säteilyä absorboivaa ja emittoivaa kappaletta sanotaan mustaksi kappaleeksi, tällöin $\epsilon = 1$. Suurimmalle osalle rakennusmateriaaleista voidaan käyttää arvoa $\epsilon = 0,9$. Näitä kutsutaan termisesti harmaiksi pinnoiksi. Esimerkkeinä voidaan mainita tiili, betoni, lasi, valkoinen paperi ja tavalliset maalit. Metalliset pinnat



Kuva 3.8: Terminen ekvivalenttipiiri säteilyvuorovaikutukselle pinnan 1 ja muiden pintojen välillä. Pinta 1 vuorovaikuttaa säteilemällä pintojen 2, 3 ja 4 kanssa. Kunkin pinnan lämpösäteilyn kokonaisvuo on W (W/m^2), A_1 on pinnan 1 kokonaispinta-ala ja $F_{1,j}$ pintojen välinen muotokerroin, joka ilmoittaa sen osan, kuinka paljon pinnat 1 ja j ($j = 2,3,4$) 'näkevät' toisistaan.

muodostavat poikkeuksen, sillä niiden emissiivisyys on lähes aina huomattavasti pienempi kuin 0,9, eikä niitä voida pitää termisesti harmaina pintoina. Emission teho q_{em} (W/m^2) riippuu absoluuttisesta lämpötilasta T ja pinnan emissiivisyydestä Stefanin lain mukaisesti

$$q_{em} = \epsilon \sigma T^4, \quad (37)$$

missä σ on Stefanin-Boltzmannin vakio $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$. Absorboitu säteily nostaa pinnan lämpötilaa, ellei se emittoitu pois. Näin ollen tasapainotilanteessa kaikki absorboitu säteily emittoituu pinnasta ympäristöön ja $\alpha = \epsilon$. Rakennusfysiikan kannalta mielenkiintoisin on tilanne, jossa eri lämpötiloissa olevat pinnat vuorovaikuttavat säteilemällä. Oletetaan kuvan 3.8 mukainen tilanne, jossa pinta 1 vuorovaikuttaa säteilemällä pintojen 2, 3 ja 4 kanssa. Kunkin pinnan lämpösäteilyn kokonaisvuo on W (W/m^2), joka ilmoittaa pinnan emittoiman ja heijastaman säteilyn. A_1 on pinnan 1 kokonaispinta-ala ja $F_{1,j}$ pintojen välinen muotokerroin, joka ilmoittaa kuinka paljon pinnat 1 ja j ($j = 2,3,4$) 'näkevät' toisistaan.

Nyt lämpösäteilyn teho pinnasta j pinnalle 1 on $W_j A_1 F_{1,j}$. Samalla pinta 1 säteilee muihin pintoihin teholla $A_1 W_1$ joka on sama kuin $\sum W_j A_1 F_{1,j}$. Ja pinnalta 1 lähtevä lämpösäteily koostuu pinnan emittoimasta säteilystä, $A_1 \epsilon_1 \sigma T_1^4$, sekä pinnalta heijastuvasta säteilystä jonka osuus on $1 - \epsilon$ pinnalle tulevasta kokonaissäteilystä. Energia säilyy pinnalla, joten

$$Q_1 + \sum W_j A_1 F_{1,j} = \sum W_1 A_1 F_{1,j} = A_1 \epsilon_1 \sigma T_1^4 + (1 - \epsilon) \sum W_1 A_1 F_{1,j} \quad (38)$$

missä Q_1 on pinnan 1 kokema säteilylämpövirta. Tästä saadaan johdettua seuraavat relaatiot:

$$Q_1 = \frac{A_1 \epsilon_1}{1 - \epsilon} (\sigma T_1^4 - W_1) \quad (39)$$

$$Q_1 = \sum A_1 F_{1,j} (W_1 - W_j) \quad (40)$$

Tilanteesta voidaan muodostaa ekvivalentti piiri, kuten kuvassa 3.8, jonka potentiaaleja ovat koko-

naissäteily W_j ja emittanssit σT_j^4 . Vastuksien konduktanssit riippuvat ainoastaan systeemin geometriasta, ja niiden yksikkö on m^2 . Potentiaalien W_1 ja σT_1^4 välinen konduktanssi riippuu pinnan pinta-alasta ja emissiivisyydestä $A_1\epsilon_1/1 - \epsilon$, ja pintojen välinen johtavuus riippuu pinta-alasta ja muotokertoimesta, eli $1, j = A_1 F_{1,j}$. Mustalle kappaleelle pinnan emissiivisyys $\epsilon = 1$, jolloin $A_1\epsilon_1/1 - \epsilon$ lähestyy ääretöntä ja sen edustama vastus häviää piiristä.

Tässä tilanteessa ollaan eniten kiinnostuneita säteilylämmönsiirron vaikutuksesta pintojen 1, 2, 3 ja 4 rajoittaman tilan sisäilmaan. Joten lisätään yhtälöihin sisäilmaa kuvaava potentiaali W_{rs} . Tällöin jokaisesta potentiaalista W_j ja σT_j^4 vähennetään W_{rs} . Sen jälkeen muutetaan potentiaalit W_{rs} ja W_j muotoon σT_{rs}^4 ja σT_{jb}^4 , missä T_{jb} on pinnan j lämpötila jos se olisi musta kappale. Lämpövirta pinnasta j sisäilmaan rs saadaan täten lineaariseen muotoon

$$Q_j = A_j(W_j - A_{rs}) = A_j\sigma(T_{jb}^4 - T_{rs}^4) = A_j h_r (T_j - T_{rs}) \quad (41)$$

missä

$$h_r = \sigma(T_{jb} + T_{rs})(T_{jb}^2 + T_{rs}^2) \quad (42)$$

Lämpövastus h_r auttaa linearisoimaan ongelman, mutta nyt se riippuu tunnetun globaalien muuttujan T_{rs} lisäksi - ei niin hyvin tunnetusta - lokaalista muuttujasta T_{jb} . Yleensä rakennusten lämpimien tilojen pintojen väliset lämpötilaerot ovat pieniä verrattuna absoluuttiseen lämpötilaan. Ratkaisuna onkin arvioida $T_{jb} \approx T_{rs}$, jolloin saadaan ”tarpeeksi tarkka” globaali vakio $h_r = 4\sigma T_{rs}^3$. Tyypillisessä huoneenlämpötilassa 20°C , eli 293 K , saadaan säteilyn pintavastukseksi $h_{ri} = 5,7\text{ W/m}^2\text{K}$. Samalla yhtälössä 41 piirin vastusten geometriset johtavuudet (yksikössä m^2) ollaan nyt korvattu fysikaalisesti todenmukaisella suurella $A_j h_r$ jonka yksikkö on W/K .

Määritetään vielä kahden pinnan (esim. 1 ja 2) välinen kokonaisjohtavuus. Tässä ongelmana on muotokertoimien F määrittäminen. Kokonaan niistä päästään eroon yksinkertaisella oletuksella, jonka mukaan ainoastaan vastakkaiset pinnat näkevät toisensa. Tällöin muotokertoimet $F = 1$ kaikille säteilyvirroille. Kokonaiskonduktanssi muodostuu siten pinnan 1 emissiosta, pintojen välisestä vastuksesta ja pinnan 2 emissiosta, eli

$$H_{12} = \frac{A_1\epsilon_1 h_{ri}}{1 - \epsilon_1} + \frac{1}{A h_{ri}} + \frac{A_2\epsilon_2 h_{ri}}{1 - \epsilon_2} = \frac{A h_{ri}\epsilon_1\epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1\epsilon_2} \quad (43)$$

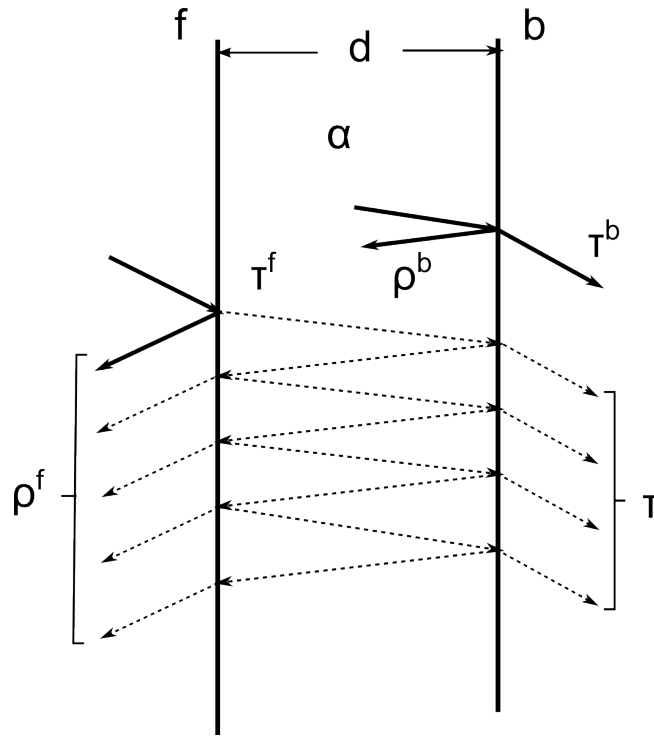
Jos ϵ_1 ja ϵ_2 ovat molemmat 0,9, niin pintojen väliseksi konduktanssiksi saadaan

$$H_{12} = 1,2 A h_{ri}. \quad (44)$$

3.9 Lyhytaaltoisen säteilyn lämmönsiirto

3.9.1 Lyhytaaltainen säteily läpinäkyvien pintojen läpi

Aineesta toiseen kulkevasta säteilystä osa heijastuu rajapinnalla ja osa absorboituu väliaineessa. Sellainen materiaali, joka ei absorboi kaikkea säteilyä, on läpinäkyvä. Näitä ovat muun muassa lasi ja



Kuva 3.9: Lasikerroksen optiset parametrit.

ilma. Auringon säteily lasin läpi on hahmoteltu kuvaan 3.9. Auringon yksittäinen säde heijastuu useita kertoja lasikerroksen sisällä kuvan osoittamalla tavalla. Näiden perättäisten heijastumisien yhteisvaikutus muodostaa koko lasituksen kokonaisläpäisyysuhteen τ ja -heijastussuhteen ρ . Kokonaisheijastussuhde voi olla erisuuruinen lasin etu- ja takapuolella, joten niitä merkitään eri indekseillä: etupuolelle ρ_f ja takapuolelle ρ_b . Tämänlainen tilanne saadaan aikaan esim. pinnoitteilla tai tilanteessa jossa lasin takana on jotain muuta materiaalia kuin ilmaa¹⁰. Energian säilymisen takia on kuitenkin $\tau_f = \tau_b \equiv \tau$. Jolloin yhtälöstä (35) seuraa, että α_f ja α_b voivat olla erisuuruisia.

Tietyllä ajanhetkellä ikkunan lasitukselle osuvan auringon säteilyn vuo on

$$q_{\text{sol,d}} = G_{\text{sol}}(\rho_f + \alpha_f + \alpha_b + \tau), \quad (45)$$

missä G_{sol} on auringon säteilyn intensiteetti (W/m^2). Termien fysikaaliset tulkinnat ovat oikealta vasemmalle lueteltuna: säteily joka heijastuu takaisin taivaalle, säteily joka absorboituu ja emittoituu ulkoilmaan, säteily joka absorboituu ja emittoituu sisäilmaan ja säteily joka läpäisee lasituksen. Näistä osista vain sisätilaan saapuvat säteilyvuot ovat rakennusten energialaskennan kannalta kiinnostavia. Suoraan lasituksen läpäisevää säteilyä sanotaan primääriseksi saannoksi ja absorboituen ja edelleen emittoituen siirtyvä komponentti on nimeltään sekundäärinen saanto. Primäärinen lämpösiirto riippuu lasituksen läpäisyysuhteesta τ . Sekundäärinen saanto on säteilyenergiaa jonka ikkuna ensin absorboi ja sitten luovuttaa sisätiloihin johtumalla, konvektiolla tai säteilemällä. Tätä lämpösiirtoa dominoi lasituksen absorptanssi α . Näiden komponenttien ratkaisemiseen lasituksen optisista ominaisuuksista tulee tietää lasituksen läpäisykerroin g_{gl} , auringon säteilyn suora läpäisyysuhde τ ja tulokulmasta riip-

10. Olettaen että lasin edessä on ilmaa

puvainen läpäisyysuhde $\tau(\theta)$. Kun lasituksen absorptanssi on α ja N kuvaa tämä absorboidun säteilyn sisäänpäin emissoitunutta osaa, saadaan lämpövirran $q_{\text{sol,d}}$ ja läpäisykertoimen g_{gl} :n relaatioksi

$$q_{\text{sol,d}} = G_{\text{sol}}(\tau + N\alpha) = G_{\text{sol}}g_{\text{gl}}.$$

Koska nykyaikaisten ns. selektiivisten lasitusten optiset ominaisuudet τ ja α voivat riippua voimakkaastikin säteilyn aallonpituudesta λ , on tarpeen määrittää $q_{\text{sol,d}}(\theta)$ ottaen huomioon säteilyn intensiteetti koko spektrin yli,

$$q_{\text{sol,d}}(\theta) = \int_{\lambda} G_{\text{sol}}(\lambda)[\tau(\theta, \lambda) + N\alpha(\theta, \lambda)] d\lambda = \int_{\lambda} G_{\text{sol}}(\lambda)g_{\text{gl}}(\theta, \lambda) d\lambda.$$

Tässä tulokulma- ja aallonpituusriippuvainen $g_{\text{gl}}(\theta, \lambda)$ on siis

$$g_{\text{gl}}(\theta, \lambda) = \tau(\theta, \lambda) + N\alpha(\theta, \lambda). \quad (46)$$

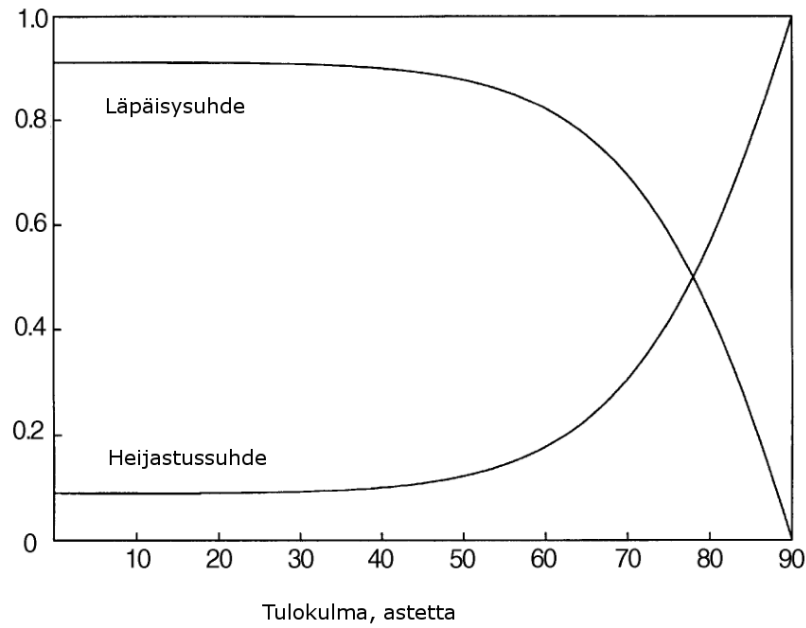
Auringon säteilyenergian lämpövirran laskeminen yksityiskohtaisesti ajan suhteen muuttuvan säteilyspektrin suhteen on kuitenkin työläs prosessi ja harvassa tapauksessa edes mahdollista säädätän puutteellisuuden takia. Määritetään siis g_{gl} pelkän tulokulman θ funktiona. Tämä tehdään määrittelemällä lasituksen optiset parametrit annetulle tulokulmalle jonkun standardoidun spektrin aallonpituuksien suhteen. Nämä parametrit sitten keskiarvoistetaan yhtälön (47) mukaan, ja pelkästään tulokulmasta riippuvaksi g_{gl} :ksi saadaan:

$$g_{\text{gl}}(\theta) = \frac{\int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} G_0(\lambda)[\tau(\theta, \lambda) + N(\lambda)\alpha(\theta, \lambda)] d\lambda}{\int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} G_0(\lambda) d\lambda}. \quad (47)$$

Lopuksi g_{gl} normitetaan ajan suhteen, tulokulman ja säteilyn intensiteetin muuttuessa

$$g_{\text{gl}} = \frac{\int_t G_{\text{sol}}(t)g_{\text{gl}}(\theta(t))dt}{\int_t G_{\text{sol}}(t) dt} \quad (48)$$

Erialaisten lasitusten läpäisykertoimia - eli g-arvoja - on taulukoitu runsaasti. Taulukoissa on yleensä otettu seuraavat seikat huomioon: lasituslevyjen määrä, paksuus, väri, levyjen välisen ilmaraon paksuus, ilmaraon täytekaasu (esim. Argon) ja itse lasituslevyjen optiset ominaisuudet (esim. selektiiviset lasit). G-arvon määrittämiseen on myös saatavilla yksityiskohtaisia simulointiohjelmiä, kuten WINDOW 6.3. Useimmiten on kuitenkin riittävää käyttää valmiiksi taulukoita arvoja. Taulukkoarvoja löytyy mm. ASHRAEn käsikirjoista [8] ja CEN -standardeista kuten EN 13790 [25]. On kuitenkin huomioitava, että näiden läpäisykertoimien määrittämisessä käytetään erilaisia standardiolosuhteita, ja siksi ne poikkeavat hieman toisistaan. ASHRAE:n ilmoittamissa g-arvoissa standardiolosuhteet ovat NFRC:n *Technical Document 200* [44] ja CEN -standardeissa EN13363-2 [23] mukaiset. ASHRAEN -käsikirjoissa g-arvo on sama kuin ”solar heat gain factor”, eli SHGC -arvo.



Kuva 3.10: Normaalin yksilasisen ikkunan läpäisysuhde ja heijastussuhde tulokulman (incident angle) suhteen. Taittokerroin $n=1,55$, paksuus $d=3,2$ mm, absorptanssi $\alpha =0,01/m$. Kuva laadittu lähteen [8] pohjalta.

Läpäisykerroin on lasituksen standardoitu ominaisuus, joka on siis yleensä tiedossa. Energiasimulaatioiden suorittamiseen tulee pystyä erottamaan primäärinen ja sekundäärinen saannon osuus, eli

$$q_{\text{sol,d}} = gG_{\text{sol}} = G_{\text{P}} + G_{\text{S}}, \quad (49)$$

missä G_{P} on primäärinen saannon osuus ja G_{S} sekundäärinen saannon osuus. Määritelmän mukaisesti sekundäärinen saanto on kokonaissaannon ja suoraan läpäisseen säteilyosan välinen erotus

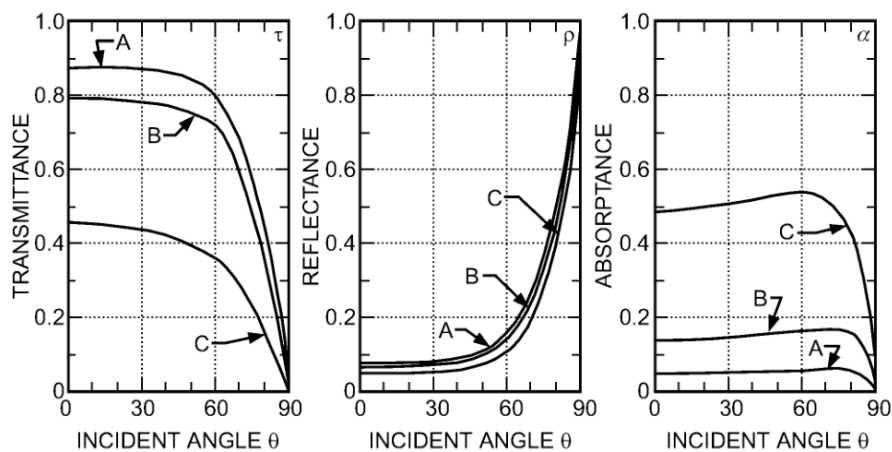
$$I_{\text{S}} = (g - \tau)I_{\text{sol}}. \quad (50)$$

Tämä on vakio kaikille tulokulmille, koska muutokset läpäisysuhteessa $\tau(\theta)$ pääosin kompensoituvat heijastussuhteen $\rho\tau$ muutoksilla (kuvat 3.10). Tämä suuntariippuvuus vaikuttaa vain ulkoilman ”saantoihin”, joten sitä ei tarvitse ottaa huomioon. Näin ollen sekundäärinen saanto riippuu vain lasituksen absorptanssista, joka on kohtuullisella tarkkuudella vakio suurille tulokulmille asti (kuva 3.11). Sekundäärinen saannon läpäisykerroin on siten

$$S_{\text{f},2} = \alpha \frac{U}{h_{\text{e}}} \quad (51)$$

ja loput saannosta on primääristä,

$$S_{\text{f},1} = g - S_{\text{f},2}. \quad (52)$$



Kuva 3.11: Lasitusten optisten parametrien vaihtelu tulokulman suhteen. (A) Kaksinkertainen lasitus, (B) Yksinkertainen lasitus ja (C) Auringonsuojalasisitus. Transmittance = läpäisy-suhte, reflectance = heijastussuhte, absorptance = absorptanssi ja incident angle = tulokulma. ASHRAE Fundamentals [8].

3.9.2 Verhojen ja varjostimien vaikutus

Auringonsäteilyn läpäisevyyttä kuvataan kolmella dimensiottomalla kertoimella, jotka ovat läpäisykerroin, eli ns. g-arvo g_{gl} , verhokerroin F_c ja varjostinkerroin F_{sh} siten, että koko ikkunajärjestelmä lasitus, verhot ja varjostimet yhtenä kokonaisuutena saa kokonaisläpäisykerroimen $g_{tot} = g_{gl}F_cF_{sh}$.

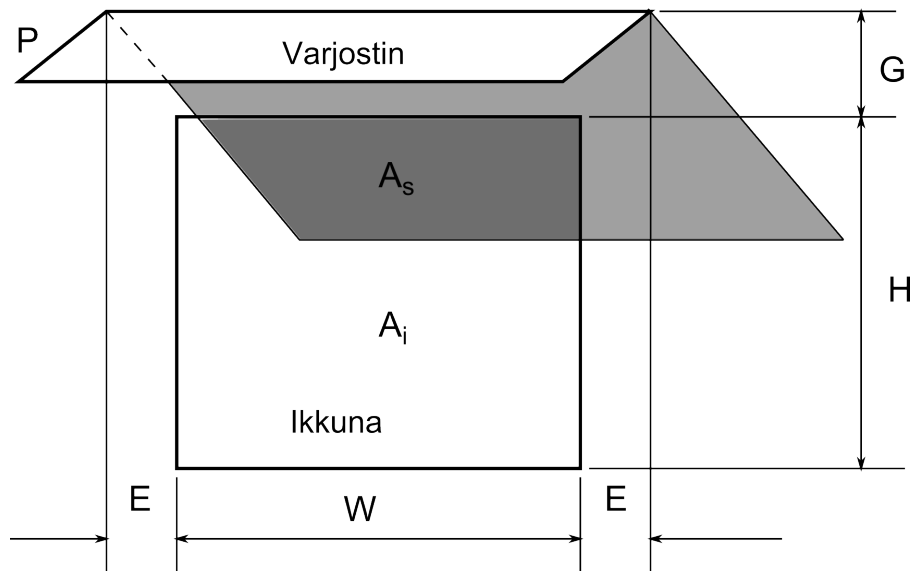
Verhokerroin F_c kuvaa ikkunan verhojen vaikutusta koko ikkunajärjestelmän auringonsäteilyn lämpövirran läpäisevyyteen. Verhojen ajatellaan olevan koko ikkunapinnan alueella pinnan kanssa yhdensuuntaisia olevia valoa läpäiseviä materiaaleja. Verhoiksi lasketaan mm. tekstiiliverhot, ikkunasäleiköt, rullaverhot, hyttysverhot ja sälekaihtimet. Verhot ovat usein irrallaan ikkunan lasituksesta, ja tämä mahdollistaa verhopinnan konvektiivisen lämpövuorovaikuttamisen muidenkin kuin sen vieressä olevien pintojen kanssa. Verhoilemattomassa ikkunassa yksi lasituskerros voi vuorovaikuttaa termisesti vain sen viereisten pintojen kanssa. Verhot ovat luonteeltaan diatermisiä, eli ne päästävät läpi pitkä- ja lyhytaaltoista auringon säteilyä. Täten myös radiatiivinen vuorovaikutus on mahdollista muuten kuin vain viereisten pintojen välillä. Verhokertoimen määrittämiseksi ikkunasäleiköille ja sälekaihtimille löytyy artikkeleista [13], [39] ja [53], verhoille [36], rullaverhoille [38] sekä hyttysverkoille [37]. Verhokertoimista on myös olemassa valmiita taulukkoarvoja ASHRAEn Fundamentals [8] käsikirjassa. Nämä taulukkokertoimet on määritetty kokeellisiin tuloksiin perustuen validoidulla ASHWAT-menetelmällä [52]. Tässä tutkielmassa verhokerroin määritetään yleisellä tasolla ikkunajärjestelmän läpäisevyyden suhteen verhojen kanssa g_{gl} ja ilman verhoja $g_{gl,c}$ siten, että $F_c = g_{gl}/g_{gl,c}$, pätee keskiarvoisesti ajan suhteen eri säteilyn tulokulmille.

Varjostinkerroin F_{sh} kuvaa varjostetulle ikkunalle tulevan säteilyn suhdetta verrattuna varjostamattomaan ikkunaan. Varjostinkertoimen - kuten verhokertoimen - voidaan ajatella olevan ikkuna g-arvoa korjaava kerroin, jolla otetaan huomioon varjostimen vaikutus koko ikkunasysteemille auringonsäteilyn läpäisevyyteen. Varjostimia ovat ikkunaan integroidut ylä- ja sivuvarjostimet, räystäät, markiisit ja muut ikkunaa varjostavat arkkitehtuuriset ratkaisut, kuten parvekkeet. Toisin kuin verhokertoimen tapauksessa, nyt voidaan olettaa että varjostin ei ole optisesti läpäisevä. Näin ollen tilanne on täy-

sin riippuvainen varjostimen ja ikkuna-aukon geometriasta sekä auringon säteilyn tulokulmasta. Jos tietyllä ajanhetkellä auringonsäteilyltä varjostuvan pinnan ala on A_s ja koko ikkunan ala A_i , niin hetkellinen varjostinkerroin on suoraan näiden suhde $f_{sh,i} = A_i - A_s/A_i$ (kuva 3.12). Aika-asteleelle tämä voidaan laskea keskiarvona ikkunan säteilysaannosta ilman varjostinta ja varjostimen kanssa.

$$\overline{f_{sh,i}} = \frac{\int G_b R_b f_{sh,i} dt}{\int G_b R_b}, \quad (53)$$

missä R_b on geometrinen tekijä (yhtälö (54)) ja G_b ikkunalle osuvan sädemäisen auringonsäteilyn teho W/m^2 . Utzinger ja Klein [49] ovat määrittäneet varjostuskertoimen kuukausikeskiarvoja erilaisille tilanteille. Geometrian määrittämiseen käytetään dimensiottomia muuttujia p , w , g ja e , joiden karakteristisena pituutena käytetään ikkunan korkeutta H . Eli, $p = P/H$, $w = W/H$, $g = G/H$ ja $e = E/H$. Varjostimen ikkunan ylittämän osuuden E oletetaan olevan sama molemmilla puolilla.

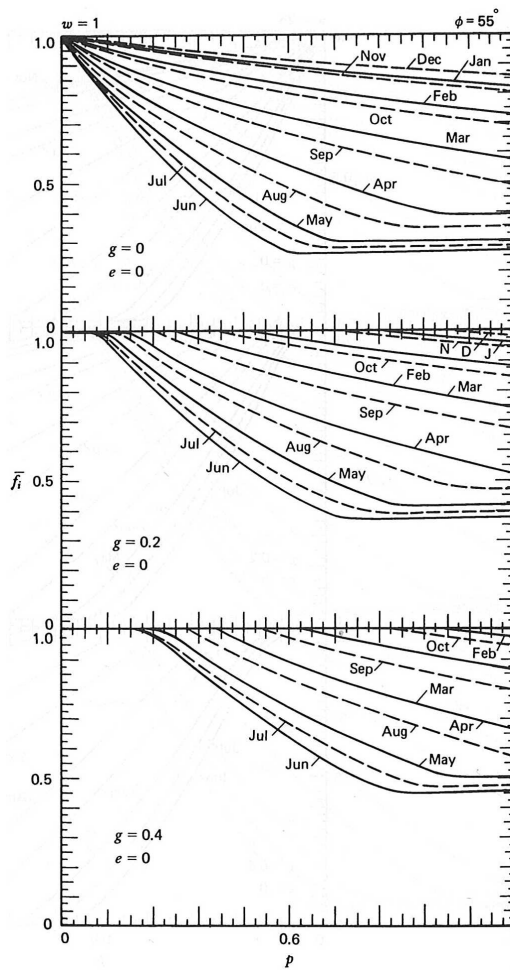


Kuva 3.12: Varjostimen geometria. Varjostettu ala A_s ja ikkunan ala A_i .

Varjostinkertoimia on määritetty myös koko vuoden keskiarvona standardissa EN 13790 [25]. Näissä geometrian määrittämiseen käytetään yksinkertaisesti varjostinkulmaa α_{sh} , joka on määritetty kuvan 3.14 mukaisesti. Varjostuskertoimet on esitetty taulukoissa 5 ylävarjostimille ja taulukossa 6 sivuvarjostimille. Väliarvot voidaan interpoloida lineaarisesti, jolloin näistä taulukoista voidaan ratkaista F_{sh} mille tahansa ilmansuunnalle tai varjostuskulmalle.

Taulukko 5: Sivulla olevan varjostuksen varjostuskerroin F_{sh} [25].

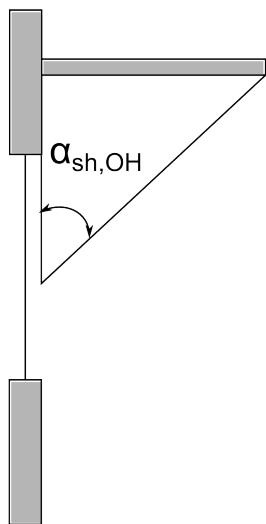
$\alpha_{sh,fin}$	45° pohjoista leveyttä			55° pohjoista leveyttä			65° pohjoista leveyttä		
	etelä	itä/länsi	pohj.	etelä	itä/länsi	pohj.	etelä	itä/länsi	pohj.
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
30°	0,94	0,92	1,00	0,94	0,91	0,99	0,94	0,91	0,98
45°	0,84	0,84	1,00	0,86	0,83	0,99	0,85	0,82	0,98
60°	0,72	0,75	1,00	0,74	0,75	0,99	0,73	0,73	0,98



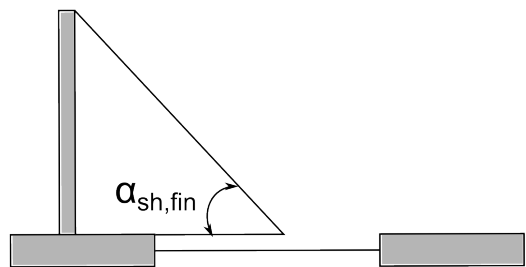
Kuva 3.13: Varjostukertoimen (\bar{f}_i) arvoja eri kuukausille leveysasteella 55° . Karakteristiset pituudet p , w , g ja e kuvaavat ikkunan ja varjostimen geometriaa. [49]

Taulukko 6: Yläpuolisen varjostuksen varjostuskerroin F_{sh} [25].

$\alpha_{sh,OH}$	45° pohjoista leveyttä			55° pohjoista leveyttä			65° pohjoista leveyttä		
	etelä	itä/länsi	pohj.	etelä	itä/länsi	pohj.	etelä	itä/länsi	pohj.
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
30°	0,90	0,89	0,91	0,93	0,91	0,91	0,95	0,92	0,90
45°	0,74	0,76	0,80	0,80	0,79	0,80	0,85	0,81	0,80
60°	0,50	0,58	0,66	0,60	0,61	0,65	0,66	0,65	0,66



(a) Yläpuolinen varjostus



(b) Sivulla oleva varjostus

Kuva 3.14: Varjostuskulma α_{sh} yläpuolisen ja sivulla olevan varjostuksen tapauksessa.

3.10 Auringon säteilyenergia kallistetulle pinnalle

Yleinen rakennusten energiasimuloinnissa vastaan tuleva ongelma on kallistetulle pinnalle, kuten ikkunoille, seinille ja katolle osuvan auringon säteilyenergian tehon määrittäminen vaakapinnalle ilmoitetun referenssivuoden säteilydatan perusteella. Pelkästään sädemäiselle säteilylle voidaan määrittää geometrinen tekijä R_b joka ilmoittaa horisontaaliselle ja kallistetulle pinnalle tulevan säteilyn (I ja I_T) suhteen mille tahansa ajanhetkelle siten, että $I_T = IR_b$. Kuvasta 3.15 huomataan, että

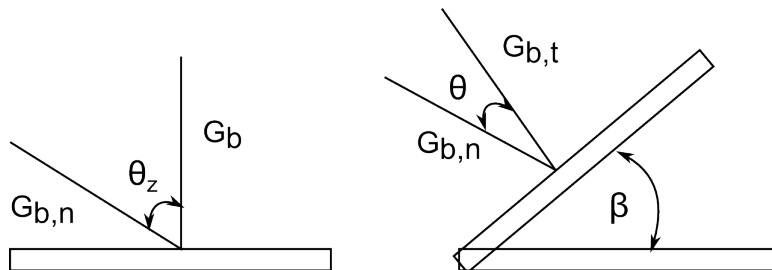
$$R_b = \frac{G_{b,T}}{G_b} = \frac{G_{b,n} \cos \theta}{G_{b,n} \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}, \quad (54)$$

missä tulokulmat θ_z ja θ ovat pinnalle osuvan säteilyn ja pinnan normaalin välinen kulma. Näin ongelmaksi jääkin vain säteilyn tulokulmien ratkaiseminen vaakapinnalle ja kallistetulle pinnalle. Säteilyn tulokulma riippuu auringon ja maan välisestä geometriasta sekä sijainnista maanpinnalla. Tilanteen geometriaa on hahmoteltu kuviin 3.18 ja 3.17. Tulokulman θ voi mille tahansa tilanteelle ratkaista yhtälöstä:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega, \end{aligned} \quad (55)$$

missä δ on auringon deklinaatio, ϕ on paikan leveysaste ja ω auringon tuntikulma. Leveysaste on paikan ja päiväntasaajan välinen kulma, joka saa arvoja $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ s.e. pohjoiseen osoittava kulma on positiivinen¹¹. Tuntikulma ω tarkoittaa maapallon pyörimisliikkeen aiheuttamaa auringon kulmapoikkeamaa meridiaanista (kuva 3.17). Deklinaatio on auringon ja päiväntasaajan välinen kulma, kun aurinko on meridiaanissa. Deklinaatio riippuu maapallon liikkeestä auringon ympäri ja saa yhden kierroksen aikana arvoja väliltä $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$. Deklinaation voi laskea seuraavasta

11. Tällaisen kulmajaon takia tässä esitetyt yhtälöt poikkeavat jonkin verran eteläisellä pallonpuoliskolla olevalle paikalle. Nämä tapaukset jätetään tässä kuitenkin käsittelemättä.



Kuva 3.15: Sädesäteilyn geometria horisontaaliselle ja kallistetulle tasolle. $G_{b,n}$ on pinnalle osuvan säteilyn intensiteetti, G_b ko. säteilyn horisontaalinen komponentti ja $G_{b,T}$ kallistetun pinnan suuntainen komponentti. Kaikki yksikössä W/m^2 .

yhtälöstä [48]:

$$\begin{aligned} \delta = & 0,006918 - 0,399912 \cos B + 0,070257 \sin B \\ & - 0,006758 \cos 2B + 0,000907 \sin 2B \\ & - 0,002697 \cos 3B + 0,00148 \sin 3B, \end{aligned} \quad (56)$$

missä B riippuu vuoden päivästä n , siten että

$$B = (n - 1) \frac{360^\circ}{350}. \quad (57)$$

Yhtälöä (56) ei voi käyttää paikoille, joiden $|\phi| > 66.5^\circ$, koska näissä paikoissa esiintyy polaarinen päivä ja -yö päivänseisauksien aikaan, eikä tätä ole yhtälössä [34] otettu huomioon. Tämä on huomattava rajoite suomalaisille rakennuksille, sillä $66,5^\circ$ leveyspiiri kulkee noin Rovaniemen korkeudella.

Yhtälössä (55) tulokulma θ voi saada arvoja yli 90° , mikä tarkoittaa sitä, että aurinko on pinnan takapuolella. Yhtälön (55) käytössä pitää myös varmistua, että maapallo ei ole auringon tiellä¹². Tämän välttämiseksi määritetään auringon laskun tuntikulma ω_{ss} . Nyt ollaan kiinnostuneita vain horisontaalisista pinnoista, joten $\beta=0$ ja yhtälö (55) yksinkertaistuu muotoon

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta. \quad (58)$$

Auringon laskiessa $\theta_z = 90^\circ$, joten yhtälöstä (58) saadaan

$$\cos \omega_{ss} = -\frac{\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta} = -\tan \phi \tan \delta, \quad (59)$$

ja noustessa $\theta_z = -90^\circ$, joten $\omega_{sr} = -\omega_{ss}$. Siis, jos tuntikulma $|\omega_{ss}| > \omega$, on päivä ja yhtälöä (55) voidaan käyttää ja R_b voidaan ratkaista yhtälöstä (54). Kun aurinko laskee aika-askelen aikana, zenittiikulman kosini on nolla ja R_b menee äärettömään. Tämä johtaa ilmeisiin ongelmiin. Onkin järkevämpi formalisoida R_b yleisemmällä tasolla integroimalla aika-askelen yli ω_1 :stä ω_2 :een:

$$R_{b,ave} = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \cos \theta \, d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \cos \theta_z \, d\omega}. \quad (60)$$

Kun ω_1 ja ω_2 edustavat perättäisiä tunteja päiväsaikaan, on $R_b \approx R_{b,ave}$. Jos jompikumpi ω_1 tai ω_2 edustaa auringonlaskua tai -nousua, R_b muuttuu nopeasti ja integroiminen on tarpeen. Tällöin

$$R_{b,ave} = \frac{a}{b}, \quad (61)$$

12. Jolloin on yö.

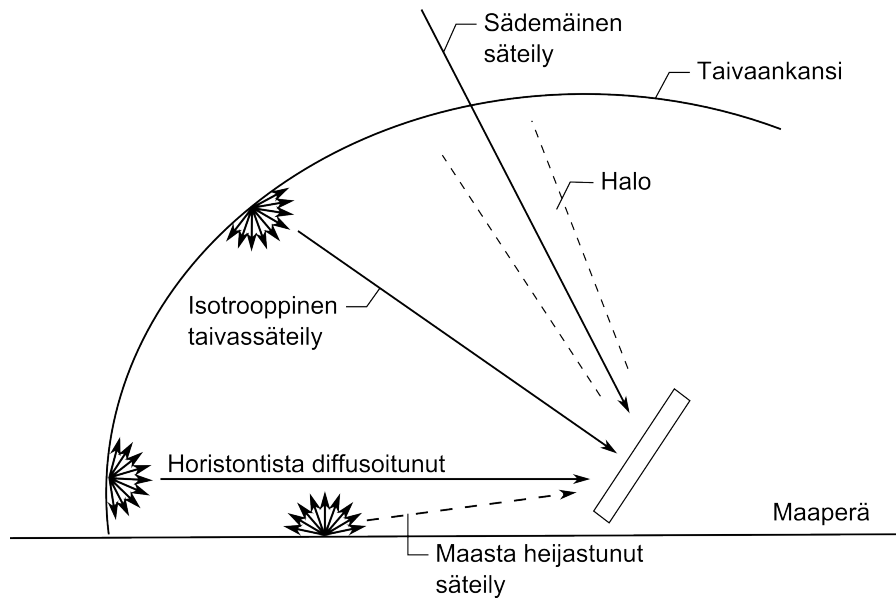
missä

$$\begin{aligned}
 a = & (\sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma) \times \frac{1}{180}(\omega_2 - \omega_1)\pi \\
 & + (\cos \delta \cos \phi \cos \beta + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma) \times (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) \\
 & - (\cos \delta \sin \beta \sin \gamma) \times (\cos \omega_2 - \cos \omega_1)
 \end{aligned} \tag{62}$$

ja

$$b = (\cos \phi \cos \delta) \times (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + (\sin \phi \sin \delta) \times \frac{1}{180}(\omega_2 - \omega_1)\pi. \tag{63}$$

Nyt $R_{b,ave}$ ilmoittaa kuitenkin vain sädemäisen säteilyn osuuden kaltevalle pinnalle. Todellisuudessa tilanteessa on paljon myös diffusoitunutta säteilyä. Diffusoitunut säteily jaetaan kolmeen osaan. Isotrooppinen osa $I_{T,d,iso}$ on diffusoituneen säteilyn tasaisesti koko taivaalle hajautunut osa. Toisekseen on auringon ympärille muodostuvan halon osuus $I_{T,d,cs}$ ¹³ ja kolmanneksi on horisontista diffusoitunut $I_{T,d,hz}$. Lisäksi on maaperästä heijastunut säteily $I_{T,ref}$. Tilanne on hahmoteltu kuvassa 3.16.



Kuva 3.16: Diffusoituneen säteilyn eri komponentit [46].

Diffusoituneen säteilyn intensiteetin jakauma taivaankannen poikki on riippuvainen hankalasti määritettävistä ja voimakkaasti muuttuvista tekijöistä kuten pilvisyydestä ja ilmakehän kirkkaudesta. Tämän mallintamiseen on kehitetty useita matemaattisia malleja, joista tässä esitellään HDKR -malli¹⁴. Tämän mukaan säteily kaltevalle tasolle on

$$I_T = (I_b + I_d A_i) R_b + I_d (1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[1 + f \sin^3 \frac{\beta}{2} \right] + I \rho_g \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right), \tag{64}$$

13. Englanninkielinen termi "circumsolar diffuse" havainnollistaa paremmin, mitä tarkoitetaan.

14. Hay ja Davies [32] kehittivät mallin jossa diffusoitunut säteily oli kahdessa osassa: isotrooppinen ja halon osuus. Klutcher [35] kehittää horisontin vaikutukselle termin, jonka sitten Reindel ym. [47] lisäsivät Hay ja Daviesin malliin. Näin saatiin kehittämiseen osallistuneiden sukunimien etukirjaimien mukaisesti nimeksi HDKR -malli.

missä

$$f = \sqrt{\frac{I_b}{I}} \quad (65)$$

$$A_i = \frac{I_b}{I_o} \quad (66)$$

ja I_o on yhtälöstä (71).

Joskus säteilydata on annettu säteilyn hetkellisinä intensiteetin arvoina tietyille ajanhetkelle, eli esim. tasan klo 12:00 kokonaisintensiteetti on 100 W/m^2 , 13:00 110 W/m^2 jne. Tässä tilanteessa hetkelliset arvot tulee muuttaa tunnin kokonaissaannoksi I , joka on yksikköä Ws/m^2 . Oletetaan, että säädatasta voidaan jotenkin ratkaista säteilyn sädeosan G_b ja diffusoidun osan G_d hetkellinen tehot (yksikössä W/m^2) s.e. kokonaisteho $G = G_b + G_d$. Nyt peräkkäisten tuntien $t_{h,1}$ ja $t_{h,2}$ välisenä aikana saatu säteilyenergian määrä ajatellaan tulevan aika-askeleen ajan tunnin alun ja lopun hetkellisten tehojen keskiarvona, eli

$$I = \frac{G_1 + G_2}{2}(t_{h,2} - t_{h,1}). \quad (67)$$

Ongelmia tulee, jos aurinko on noussut tai laskenut aika-askeleen aikana, eli $G_1=0 \text{ W/m}^2$ tai $G_2=0 \text{ W/m}^2$. Nyt keskiarvon käyttäminen johtaa suuriin virheisiin. Tällaisessa tapauksessa määritetään auringonlaskun $t_{h,ss}$ tai nousun $t_{h,sr}$ hetki ja käytetään niitä yhtälössä (67):

$$I = \begin{cases} \frac{G_2}{2}(t_{h,2} - t_{h,sr}) & \text{Aurinko nousee tunnin aikana} \\ \frac{G_1}{2}(t_{h,ss} - t_{h,1}) & \text{Aurinko laskee tunnin aikana} \end{cases} \quad (68)$$

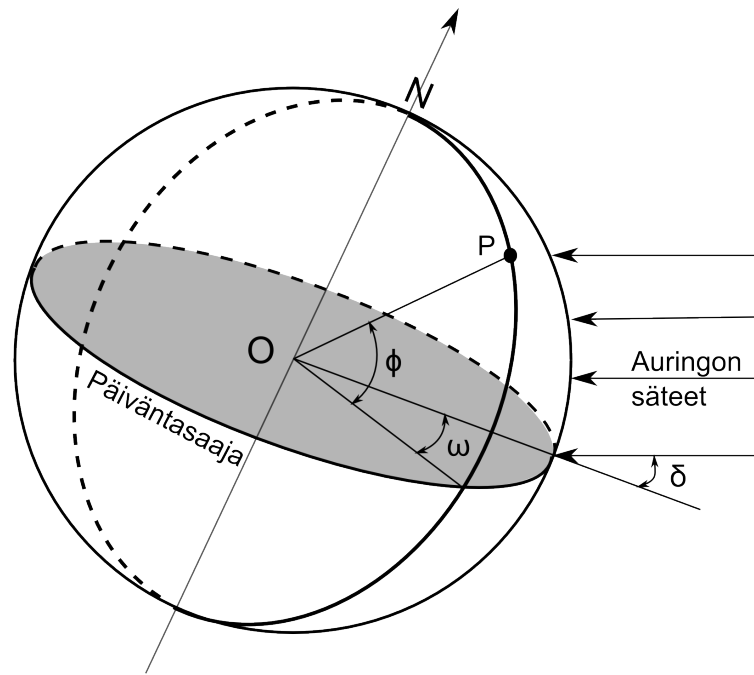
Hetki, jolloin aurinko nousee ja laskee tiettyinä päivinä, voidaan määrittää aikasemmin määritetystä auringonlaskun tuntikulmasta yhtälöstä 59. Koska tuntikulman muutosnopeus on tasan 15° tunnissa ja kun aurinko on zeniitissä ja $\omega(t_h=12)=0$, saadaan tuntikulman ja päivän tunnin väliseksi relaatioksi

$$t_h = \frac{\omega}{15} + 12 \quad (69)$$

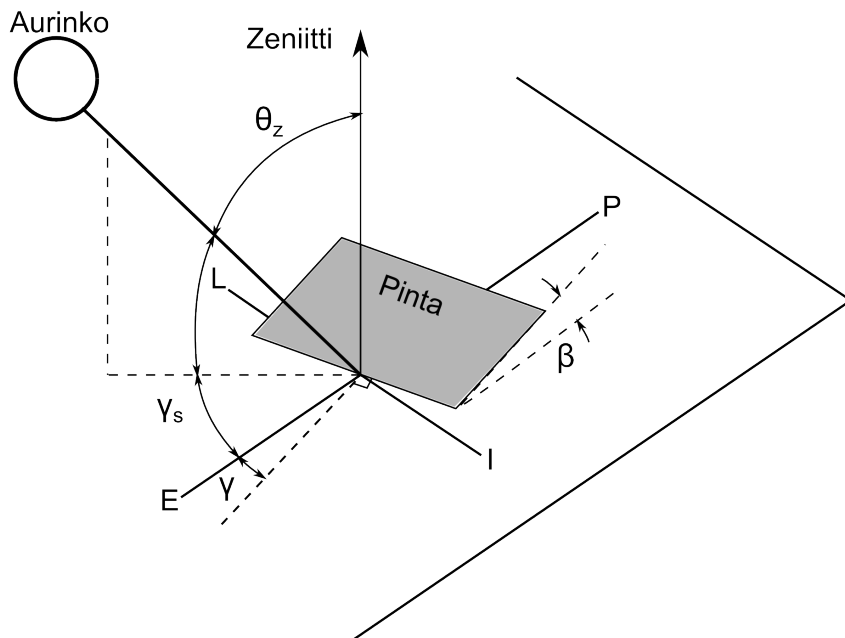
Nyt sijoittamalla $\cos \omega_{ss}$ tai $\cos \omega_{sr}$ yhtälöön (69) saadaan ratkaistua $t_{h,sr}$ tai $t_{h,ss}$ ja edelleen kokonais-säteilyn määrä horisontaaliselle pinnalle I yhtälöstä (68). Joissakin tapauksissa on annettu vain pelkkä kokonaissäteilyn määrä, ilman jaottelua diffusoituneeseen ja sädemäiseen säteilyyn. Tällöin yleinen tapa on korreloida diffusoituneen säteilyn osa I_d/I kirkkausindeksin k_t kanssa. Kirkkausindeksi on se kokonaissäteilyn osa, joka on läpäissyt ilmakehän, eli

$$k_t = \frac{I}{I_o} \quad (70)$$

missä I_o on säteilyn määrä horisontaaliselle pinnalle jos ilmakehää ei olisi, eli ns. maksimaalinen säteilyn arvo. Tämä saadaan laskettua aurinkovakiosta G_{sc} , joka ilmoittaa aurinkoon päin osoittavan



Kuva 3.17: Leveysaste ϕ , tuntikulma ω ja auringon deklinaatiokulma δ pisteessä P .



Kuva 3.18: Zeniittikulma, eli säteilyn tulokulma horisontaaliselle tasolle, θ_z , kallistuskulma β , pinnan atsimuuttikulma γ ja auringon atsimuuttikulma γ_s kallistetulle pinnalle, jonka kallistuskulma on β .

pinnan saamaan auringonsäteilyn intensiteetin ulkoilmakehässä maapallon keskimääräisellä etäisyydellä auringosta. Tässä käytetään WRC:n (The World Radiation Center) suosittamaa arvoa $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$. Täten,

$$I_o = \frac{12 \times G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360^\circ n}{365} \right) \times \left(\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \right) \quad (71)$$

missä ω_1 on tuntikulma aika-askeleen alussa ja vastaavasti ω_2 aika-askeleen lopussa. On tärkeää et-
tä aurinko ei laske aika-askeleen aikana, ja jos laskee, niin käytetään tuntikulmien sijasta auringon
nousun ja -laskun tuntikulmia kuten edellä on tehty (esim. yhtälössä (68)). Diffusoituneen osan rat-
kaisemiseksi käytetään tässä Erbsin korrelaatiota [16]

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,0 - 0,09k_t & \text{kun } k_t \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604k_t + 4,388k_t^2 - 16,638k_t^3 + 12,336k_t^4 & \text{kun } 0,22 < k_t \leq 0,80 \\ 0,165 & \text{kun } k_t > 0,8 \end{cases} \quad (72)$$

4 Tuntimenetelmä

4.1 Tilan lämmityksen- tai jäähtymisen nettotarve

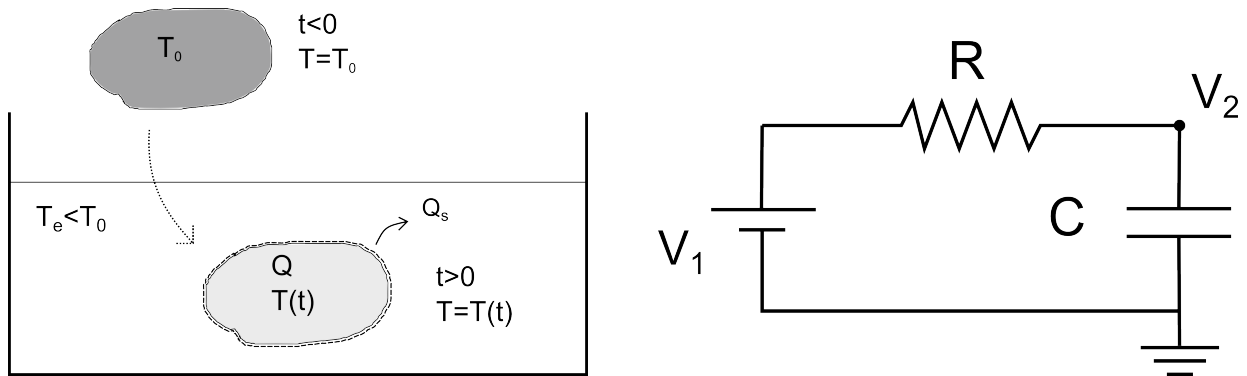
Käytetty tuntimenetelmä perustuu sähköpiirien ekvivalenttiin resistanssi-kapasitanssi -malliin [15]. Menetelmässä tilan lämpövirrat ja lämpötila ratkaistaan luomalla tilasta sähköpiirien kanssa analoginen terminen virtapiiri. Yleinen esimerkki ekvivalentista virtapiiristä käsittelee kiinteää kappaletta joka jäähtyy nopeasti ympäristön äkillisen muutoksen takia, esimerkiksi kuuma kivi joka laitetaan kylmään vesiastiaan (kuva 4.1). Jos kappaleen lämpötilajakauman gradientti sisäpuolella on vakio, voidaan lämpötilan muutos ajan suhteen $T(t)$ ratkaista lineaarisella differentiaaliyhtälöllä

$$C \frac{dT(t)}{dt} = -HT(t), \quad (73)$$

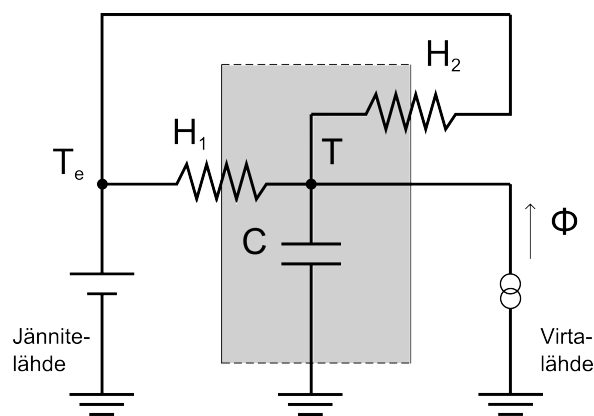
missä C on lämpökapasiteetti ja H lämpöhäviökerroin. Tilanteella on analoginen vastine elektronii-
kassa, kun RC -alipäästösuodatin purkautuu jännitteiden V_1 ja V_2 välillä. Tällöin jännite kondensaattorin yli V voidaan ratkaista samanlaisella lineaarisella differentiaaliyhtälöllä.

$$C \frac{dV(t)}{dt} = -\frac{1}{R}V(t) \quad (74)$$

Näin ajan suhteen muuttuvia termodynaamisia prosesseja voidaan ratkaista luomalla niille ekviva-
lentti RC -piiri, josta ratkaistaan lämpövirrat ja lämpötilat. Yksinkertaisimmillaan rakennuksen ekvi-
valentti piiri olisi 2R1C -piiri joka koostuu kahdesta vastuksesta ja yhdestä kondensaattorista (ku-
va 4.2). Algebran selkeyttämiseksi vastuksia merkitään lämpökonduktanssin symbolilla H , jolle pätee



Kuva 4.1: Kiinteän kappaleen jäähtyminen ajan suhteen ja tilanteen ekvivalentti RC-piiri. Vasemmal- la kappale on aluksi termisessä tasapainossa ympäristön kanssa, joten kappaleen lämpötila $T = T_0$ on sama kuin ympäristön lämpötila. Ympäristön olosuhdemuutosta kuvaa kappaleen laittaminen 'kyl- pyyn', jonka lämpötila on $T_e < T_0$. Q on kappaleen lämpömäärä uudessa ympäristössä (Ws) ja Q_s kappaleen luovuttama lämpömäärä uuteen ympäristöön. Jännite-ero $V_2 - V_1$ kuvaa kappaleen kokemaa lämpötilanmuutosta, vastus R lämmönjohtumista kappaleen pinnan läpi ympäristöön ja kapasitanssi C kappaleen lämpökapasiteettia.



Kuva 4.2: Rakennuksen yksinkertainen 2R1C -ekvivalenttipiiri. Harmaa alue kuvaa rakennuksen ul- korakenteita. Jännitelähde kuvaa sisä- ja ulkolämpötilaerojen aiheuttamaa potentiaalia. Virtalähde ku- vaa rakennuksen sisäisiä lämmönlähteitä.

$H = 1/R$. Jännitelähde kuvaa ulkoilmaa, joka on lämpötilassa T_e . Ulkoseinän ulkopinnan lämpövastus on H_1 ja toinen vastus H_2 kuvaa kaikkia muita vastuksia. Rakennuksen massan lämpökapasiteetti on C ja virtalähde (lämpövirta Φ) kuvaa sisätilan lämmitysjärjestelmää. Lämpötila T (rakennuksen massan lämpötila) saadaan differentiaaliyhtälöstä

$$C \frac{dT(t)}{dt} = -HT(t) + \Phi, \quad (75)$$

missä $H = H_1 + H_2$ (vrt. $1/R=1/R_1+1/R_2$). Modifioidulla Eulerin menetelmällä [9] ongelma saadaan lineaariseen muotoon. Lämpötila kuluvalle ajanhetkelle T_n on siten

$$T_n = T_{n-1} + \frac{t}{2} \left(\frac{dT_{n-1}}{dt} + \frac{dT_n}{dt} \right), \quad (76)$$

missä t on aika-askeleen pituus. Nyt sijoittamalla $dT(t)/dt$ yhtälöstä (75) saadaan:

$$T_n = T_{n-1} + \frac{t}{2} \left(-\frac{H}{C}T_{n-1} - \frac{H}{C}T_n + \frac{2\Phi}{C} \right), \quad (77)$$

ja edelleen,

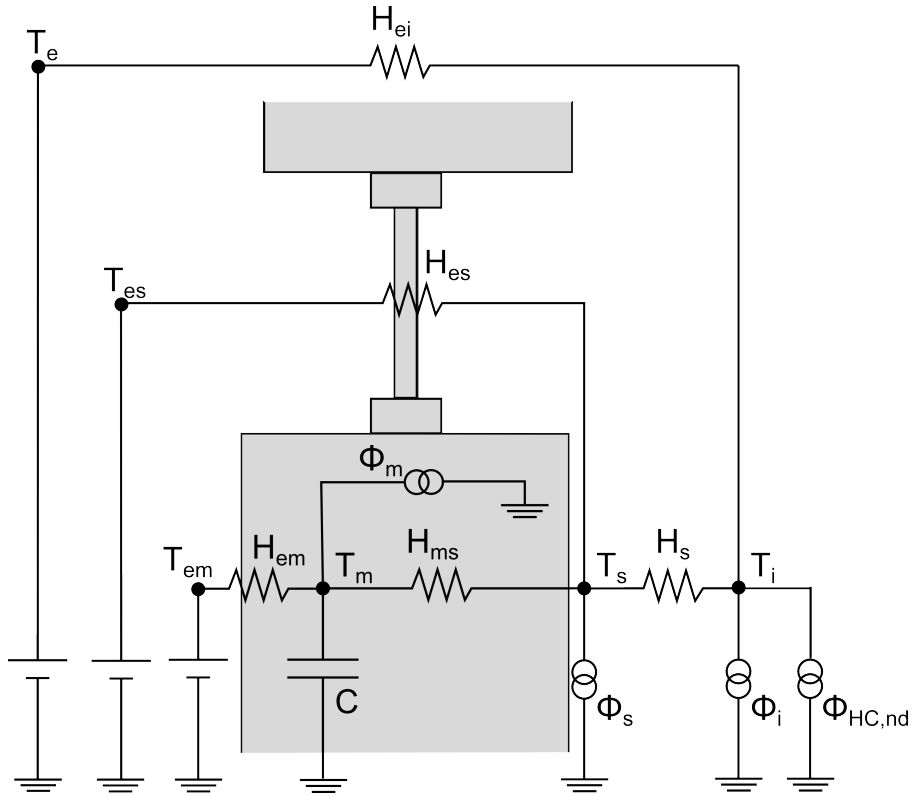
$$T_n = \frac{T_{n-1} \left(\frac{C}{t} - \frac{1}{2}(H_1 + H_2) \right) + \frac{\Phi}{t}}{\frac{C}{t} + \frac{1}{2}(H_1 + H_2)}. \quad (78)$$

Modifioidusta Eulerin menetelmästä poiketen T_n lasketaan vielä uudestaan käyttäen Crank-Nicholsonin diskretisointia. Nyt lopullinen lämpötila aika-askeleelle arvioidaan olevan edellisen lämpötilan ja Eulerin menetelmällä saadun nykyisen lämpötilan (kaava (78)) keskiarvo, eli

$$T_{n,uusi} = \frac{1}{2}(T_n + T_{n-1}). \quad (79)$$

Yllä olevat yhtälöt (78) ja (79) muodostavat yleisen ratkaisumenetelmän mille tahansa piirille, jossa on yksi kondensaattori C ja vastukset voidaan yhdistää superpositioperiaatteella yhdeksi vastukseksi H_2 . Tuntimenetelmän pohjaksi valittiin kuvan 4.3 mukainen 5R1C -piiri ja sen ratkaisu esitetään seuraavaksi.

Lämmitys- ja/tai jäähdytystarve määritetään laskemalla tunneittain lämmitys- tai jäähdytystehon tarve $\Phi_{HC,nd}$, joka on toimitettava sisäilman solmupisteestä tai solmupisteeseen T_i , jotta lämpötilan asetusarvon minimiä ei aliteta tai maksimia ylitetä. Lämpötilan asetusarvo on ilman ja tehollisen lämpötilan painotettu keskiarvo. Ilmanvaihdon lämmönsiirron vastus $H_{ei} = H_{ht,inf} + H_{ht,AHU}$ (kaavat (99) ja (101)) liittyy suoraan ilman lämpötilan solmupisteeseen T_i ja tuloilman lämpötilan solmupisteeseen T_e . Johtumislämmönsiirto jaetaan ikkunan osuuteen H_{es} (yhtälöstä (97)), jonka terminen massa on nolla. Ja muuhun osuuteen H_{op} , joka jaetaan kahteen vastukseen joiden konduktanssit ovat H_{em} ja



Kuva 4.3: Rakennuksen 5R1C -ekvivalenttipiiri. Harmaa alue kuvaa rakennuksen ulkorakenteita. H_1 on ulkorakenteiden ulkopinnan lämpövastus ja toinen vastus H_2 kuvaa kaikkia muita vastuksia. Rakennuksen massan lämpökapasiteetti on C ja virtalähde – lämpövirta Φ – kuvaa sisätilan lämmitysjärjestelmää. Lämpötila T voidaan ratkaista yhtälöstä (75).

H_{ms} siten, että

$$H_{ms} = h_{ms}A_{mass}, \quad (80)$$

missä h_{ms} kuvaa solmupisteen m ja s välistä konduktanssia ja on muotoa $h_{ms} = h_{ci} + 1, 2h_{ri}$. Tässä h_{ci} on sisäpinnan konvektiivinen pintavastus ja h_{ri} on sisäpinnan radiatiivinen pintavastus. Kerroin 1,2 tulee yhtälöstä (44). Ulkoilman ja solmupisteen m väliseksi konduktanssiksi jää siten

$$H_{em} = \frac{1}{1/H_{op} - 1/H_{ms}}. \quad (81)$$

Kytöntäkonduktanssi sisäilman solmupisteen T_i ja solmupisteen T_s välillä

$$H_s = \frac{A_{tot}}{1/h_{ci} - (1/(h_{ci} + 1, 2h_{ri}))}. \quad (82)$$

Kondensaattoria edustaa rakennuksen lämpökapasiteetti C_m (J/K). Ekvivalentit ideaaliset jännitelähteet ovat ulkoilman lämpötila T_e , läpinäkyvien ulkopintojen lämpötila T_{es} ja rakennusmassan lämpötila T_{em} . Auringon- ja sisäinen lämpösaanto muodostavat ekvivalentit ideaaliset virtalähteet Φ_i , Φ_s ja

Φ_m . Näin muodostuu 5R1C -piiri, jolle

$$T_e = T_e \quad (83)$$

$$T_{es} = T_e + \frac{\Phi_{sd,W}}{H_{es}} \quad (84)$$

$$T_{em} = T_e + \frac{\Phi_{sh,O}}{H_{op}} \quad (85)$$

ja

$$\Phi_i = \Phi_{int,c} + f_{sa}\Phi_{sd,W} \quad (86)$$

$$\Phi_s = \frac{A_{total} - A_{mass} - H_{es}/h_{ms}}{A_{total}}(1 - f_{sa})\Phi_{int,r} + \frac{A_{total} - A_{mass} - A_w - H_{es}/h_{ms}}{A_{total} - A_w}\Phi_{sd,W} \quad (87)$$

$$\Phi_m = \frac{A_{mass}}{A_{total}}(1 - f_{sa})\Phi_{int,r} + \frac{A_{mass}}{A_{total} - A_w}\Phi_{sd,W} \quad (88)$$

missä $\Phi_{sh,O}$ on läpinäkymättömien rakenteiden kautta absorboitu lämpösaanto taivashäviöt huomioiden ja $\Phi_{sl,W}$ vastaavasti ikkunoiden kautta sekä $\Phi_{sd,W}$ on suoraan ikkunoiden kautta tuleva säteilyn lämpösaanto. A_{mass} tehollisen massan ekvivalentti pinta-ala, A_{total} on kaikkien pintojen ala (sisä- ja ulkopinnat), $\Phi_{int,c}$ ja $\Phi_{int,r}$ ovat sisäisen lämpölähteen konvektiivinen ja radiatiivinen osa. Korjauskerroin f_{sa} kuvaa sitä ikkunoiden kautta tulevan säteilyenergian osuutta, joka muuttuu tilaa suoraan lämmittäväksi lämpövirraksi. Tämä kerroin riippuu tilassa olevien pienen lämpökapasiteetin omaavien esineiden – kuten matot, sohvot ja muut huonekalut – määrästä. Virtapiirin ratkaisemiseksi määritetään

$$H_{z1} = \frac{H_{ei}H_s}{H_{ei} + H_s} \quad (89)$$

$$H_{z2} = H_{z1} + H_{es} \quad (90)$$

$$H_{z3} = \frac{H_{z2}H_{ms}}{H_{z2} + H_{ms}}. \quad (91)$$

Sijoittamalla $H_{z3} = H_2$ ja $H_{em} = H_1$ yhtälöön (78) saadaan rakennuksen massan lämpötila

$$T_{m,n} = \frac{T_{m,n-1}(C_m - 0.5(H_{z3} + H_{em})) + \Phi_{m,tot}}{C_m + 0.5(H_{z3} + H_{em})}. \quad (92)$$

Kokonaisvirta $\Phi_{m,tot}$ solmupisteeseen T_m on

$$\Phi_{m,tot} = \Phi_m + H_{em}T_{em} + \frac{H_{z3}}{H_{z2}} \left(\Phi_s + H_{es}T_{es} + H_{z1} \left(\frac{\Phi_i + \Phi_{HC}}{H_{ei}} + T_e \right) \right) \quad (93)$$

josta edelleen voidaan ratkaista Kirchhoffin lain mukaan

$$T_s = \frac{H_{ms}T_m + \Phi_s + H_{es}T_{es} + H_{z1} \left(\frac{\Phi_i + \Phi_{HC}}{H_{ei}} + T_e \right)}{H_{ms} + H_{es} + H_{z1}} \quad (94)$$

ja

$$T_i = \frac{H_{z3}T_s + H_{ei}T_e + \Phi_i + \Phi_{HC}}{H_s + H_{ei}}. \quad (95)$$

Lämmitys- ja jäähdytystehon tarpeen määrittämiseksi tulee määrittää lämpötilarajat $T_{i,min}$ ja $T_{i,max}$. Jos tasapainotilanteessa (kun $\Phi_{HC} = 0$ W) sisälämpötila T_i ei ole rajojen sisällä, ratkaistaan yllä olevista yhtälöistä (92)... (95) tarvittava teho. Yleensä tilan lämmitys- ja jäähdytysteho on myös rajoitettu, jolloin saadaan viisi mahdollista tapausta:

1. Tilassa on lämmityksen tarve ja lämmitysteho ei ole riittävä asetusarvo saavuttamiseen. Tällöin $\Phi_{HC,nd} > \Phi_{H,max}$ ja $T_i < T_{i,min}$.
2. Tilassa on lämmityksen tarve ja lämmitysteho on riittävä. Tällöin $\Phi_{HC,nd} \leq \Phi_{H,max}$ ja $T_i = T_{i,min}$.
3. Tilassa ei tarvita lämmitystä eikä jäähdytystä (tasapainotilanne). Tällöin $\Phi_{HC,nd} = 0$ ja $T_{i,min} \leq T_i \leq T_{i,max}$.
4. Tilassa on jäähdytyksen tarve ja jäähdytysteho on riittävä. Tällöin $\Phi_{HC,nd} \geq \Phi_{C,max}$ (jäähdytystehot ovat negatiivisia) ja $T_i = T_{i,max}$.
5. Tilassa on jäähdytyksen tarve ja jäähdytysteho ei ole riittävä asetusarvon saavuttamiseen. Tällöin $\Phi_{HC,nd} < \Phi_{C,max}$ ja $T_i > T_{i,max}$.

Menetelmässä eritellään sisäilman lämpötila ja sisäpintojen keskimääräinen lämpötila, jolloin voidaan ottaa huomioon rakennusmassan tuoma dynaamisuus rakennuksen lämpötaseessa. Mallia voidaan täten käyttää myös lämpöviihtyvyyden tarkistamiseen. Tarkkuus paranee myös kun voidaan ottaa huomioon auringon, valaistuksen ja sisäisen lämpösaannon säteilyn ja konvektion osuudet erikseen. Laskentamenetelmä perustuu sisä- ja ulkoympäristön välisten lämmönvirtojen aika rankkoihin yksinkertaistuksiin, ja tästä syystä menetelmän antamat tulokset eivät ole luotettavia tuntitasolla. Menetelmä mahdollistaa vastuksien lisäämisen loputtomasti, kunhan uusia solmupisteitä ei synny tai kondensaattoreita lisätä.

4.2 Lämpövastusten konduktanssien määrittäminen

4.2.1 Ulkorakenteet

Ulko- ja sisäilman välisiä läpinäkymättömiä rakenteita kuvaava vastus H_{op} on yksinkertaisesti rakenteen lämmönläpäisykerroin U kertaa rakenteen pinta-ala A . Näiden tulojen yhteenlaskettu summa on koko tilan ulkorakenteiden lämpökonduktanssi, eli

$$H_{op} = \sum_i U_{op,i} A_{op,i}, \quad (96)$$

missä i on yksittäistä rakennetta kuvaava indeksi. Tämä termi sisältää vain ulkoilmaa vasten olevat rakenteet joilla on termistä massaa. Vastaavasti ikkunoille sekä muille valoaukoille määritetään oma

vastus

$$H_{es} = \sum_i U_{w,i} A_{w,i}, \quad (97)$$

missä i on yksittäistä ikkunaa kuvaava indeksi. Lämmönläpäisykerroin U määritetään eri menetelmillä ikkunoille, oville ja muille valoaukoille [22] sekä läpinäkymättömille rakenteille [28]. Lisäksi otetaan huomioon ulkorakenteiden liitosten välisten kylmäsiltojen kautta aiheutuva lisäkonduktanssi kertomalla liitoksen ominaiskonduktanssi ψ_{cb} (W/m·K) kylmäsiltojen pituudella L_{cb} eli

$$H_{d,cb} = \sum_i \psi_{cb,i} L_{cb,i}. \quad (98)$$

Lisäkonduktanssi tulisi laskea ainakin seuraaville rakennusliitoksille: alapohjan ja seinän, yläpohjan ja seinän, välipohjan ja seinän, seinien nurkkien, ikkunan ja seinän sekä oven ja seinän välisille liitoksille [29, 26, 30].

4.2.2 Ulkorakenteiden ilmanvuoto

Ilmanvuoto on rakennuksen ulkorakenteiden liitosten ja muiden tahattomien vuotokohtien kautta ulkoilmasta suoraan rakennukseen hallitsemattomasti tuleva ilmavirta. Vuotoilman määrä riippuu ulkorakenteiden lisäksi ulko- ja sisätilan välisestä paine-erosta sekä sisätilojen ilman stratifikaatiosta. Vuotoilman aiheuttaman termisen vuorovaikutuksen konduktanssi määritetään yleisellä tasolla

$$H_{inf} = \rho_a c_a q_v, \quad (99)$$

missä q_v on ilmanvuodon hetkellinen arvo m^3/s , ρ_a on ilman tiheys ja c_a on ilman ominaislämpökapasiteetti. Ongelmaksi muodostuu vuotoilman määrän arvioiminen, joten onkin tapana määrittää $H_{ht,inf}$ koko rakennukselle tai sen osalle ominaisen ilmanvuotoluvun q_{50} ($m^3/h \cdot m^2$) perusteella. Ilmanvuotoluku on mitattava suure, joka ilmoittaa tilan ilmanvaihtuvuuden vaipan pinta-alaa kohden kun sisätilojen ja ulkotilojen välinen paine-ero on 50 Pa. Ilmanvuotoluvun määrittäminen on standardoitu [21]. Lämpöhäviökerroin on täten vakio

$$H_{ht,inf} = \frac{\rho_a c_a q_{50} A_e}{3600 \times x}, \quad (100)$$

missä ρ_a on ilman tiheys, A_e on tilan ulkovaipan pinta-ala ja x on kokeellisesti määritetty korjauskerroin joka riippuu rakennuksen kerroslukumäärästä. Kerroin on yksikerroksisille rakennuksille 35, kaksikerroksisille 24, kolmikerroksisille 20 ja viisikerroksisille tai korkeammille rakennuksille 15. [54]

Suunnitteluvaiheessa olevalle rakennukselle ei voida määrittää q_{50} :tä mittaamalla, joten arvioiminen on tarpeen.

4.2.3 Hallittu ilmanvaihto

Hallitulla ilmanvaihdolla tarkoitetaan ilmavirtoja, joiden tarkoitus on tilan sisäilman laadun ylläpitäminen ja joiden virtausmäärät ovat tarkasti määriteltävissä sekä ohjattavissa. Käytännössä tämä tarkoittaa koneellista ilmanvaihtolaitetta, mutta myös ns. painovoimainen ilmanvaihto kuuluu tähän kategoriaan. Vaikka hallinnan taso ei ole koneelliseen ilmanvaihtoon verrattavissa. Hallitun ilmanvaihdon termisen vastuksen konduktanssi yleisessä muodossaan on

$$H_{AHU} = \rho_a c_a v_v, \quad (101)$$

missä v_v on ilmavirran vuo m^3/s , ρ_a on ilman tiheys ja c_a on ilman ominaislämpökapasiteetti. Tuntitason laskennassa v_v määritetään tunnikohtaisesti käyttäjän syöttämien toiminta-aikojen perusteella. Hallittu ilmanvaihto mahdollistaa lämpöenergian siirtämisen poistoilmasta tuloilmaan käyttäen tarkoitukseen suunniteltuja lämmönvaihtimia, jotka siirtävät poistoilmasta tuloilmaan lämpöenergiaa jollain hyötysuhteella η_{AHU} , siten että

$$\eta_{AHU} = \frac{Q_{AHU,HR}}{Q_{AHU,nHR}}, \quad (102)$$

missä $Q_{AHU,HR}$ on ilmanvaihdon lämpöhäviöt lämmöntalteenoton kanssa ja $Q_{AHU,nHR}$ ilman lämmöntalteenottoa [24]. Näille lämmöntalteenottojärjestelmille (lyh. LTO) voidaan määrittää kokeellisesti lämpötilahyötysuhteeksi kutsuttu vakio $\eta_{AHU,dry}$ [18]. Joissakin tapauksissa poistoilman ja tuloilman määrät eivät ole samat, joten on hyödyllistä määrittää lämpötilahyötysuhde molemmille ilmavirroille erikseen, eli

$$\eta_{AHU,dry,in} = \frac{T_{sup} - T_{ext}}{T_{in} - T_{ext}} \quad (103)$$

$$\eta_{AHU,dry,out} = \frac{T_{in} - T_{exh}}{T_{in} - T_{ext}} \quad (104)$$

missä T_{sup} on tilaan sisäänpuhalletun ilman lämpötila ja T_{exh} jäteilman lämpötila. Eli T_{sup} on tuloilma LTO:n jälkeen ja T_{exh} poistoilma LTO:n jälkeen. Ulkoilman lämpötila on T_{ext} ja sisäilman lämpötila T_{in} . Alaindeksi "in" tarkoittaa lämmöntalteenottolaitteiston tuloilmapuolta ja "out" poistoilmapuolta. Nyt huomataan, että yhtälöt (101) ja (104) yhdistämällä saamme

$$\eta_{AHU} = \frac{Q_{AHU,HR}}{Q_{AHU,nHR}} = \frac{\rho_a c_a q_v (T_{in} - T_{exh})}{\rho_a c_a q_v (T_{in} - T_{ext})} = \frac{T_{in} - (T_{in} - \eta_{AHU,dry,out} (T_{in} - T_{ext}))}{T_{in} - T_{ext}} = \eta_{AHU,dry,out} \quad (105)$$

Samalla tavalla voidaan todeta, että $\eta_{AHU} = \eta_{AHU,dry,in}$. Useimmissa ilmanvaihtojärjestelmissä jäteilman lämpötilalle on asetettu alaraja $T_{exh,min}$ lämmönvaihtimien jäätyminenestön takia ja joissakin tapauksissa sisäänpuhalletulle ilmalle on asetettu maksimiarvo $T_{sup,max}$ sisäilman laadun takia. Eli, jos tasapainotilanteessa $T_{exh} < T_{exh,min}$ tai $T_{sup} > T_{sup,max}$ lämmöntalteenotto ei voi toimia optimaalisella tavalla ja sitä pitää rajoittaa siten, että lämpötilarajojen sisällä pysytään. Tällöin lämmöntalteenoton

hyötysuhde on

$$\eta_{\text{AHU}} = \begin{cases} \eta_{\text{AHU,dry,out}} & \text{jos } T_{\text{exh}} \geq T_{\text{exh,min}} \text{ ja } T_{\text{sup}} \leq T_{\text{sup,max}} \\ \frac{T_{\text{int}} - T_{\text{exh,min}}}{T_{\text{in}} - T_{\text{ext}}} & \text{jos } T_{\text{exh}} < T_{\text{exh,min}} \text{ tasapainotilanteessa} \\ \frac{T_{\text{sup,max}} - T_{\text{ext}}}{T_{\text{in}} - T_{\text{ext}}} & \text{jos } T_{\text{sup}} > T_{\text{sup,max}} \text{ tasapainotilanteessa} \end{cases} \quad (106)$$

Ilmanvaihtojärjestelmän talteenottama energia voidaan täten vähentää suoraan lämpöhäviökertoimesta, jolloin aika-askelelle

$$H_{\text{AHU}} = \rho_a c_a v_v (1 - \eta_{\text{AHU}}). \quad (107)$$

4.2.4 Maanvastaiset rakenteet

Maanvastaisten rakenteiden konduktanssi määritetään tässä menetelmässä kuukausitasolla vakioksi. Konduktanssi H_g sisältää alapohjan ja sen vastaisen maakerroksen yhteisvastuksen. Eli lämpövirta sisätiloista alapohjan kautta maakerrosten kautta ulkoilmaan ja maaperään. Lämpövirta oletetaan jokaiselle kuukaudelle vakioksi, koska maaperän lämpötila voidaan helposti määrittää ulkoilman lämpötilan kuukausikeskiarvon funktiona. Alapohjan konduktanssia ei määritetä pelkästään tasapainotilanteen mukaan (kuten ilman vastaisille rakenteille), koska silloin ei voida ottaa huomioon maaperän lämpökapasiteetin vaikutusta [27]. Siten

$$H_g = \frac{\Phi_g}{T_{\text{in}} - T_{\text{ext}}}, \quad (108)$$

missä Φ_g on alapohjan läpäisevän lämpövirran keskiarvo kuukauden aikana. Eli tarkemmin,

$$\Phi_g = H_{g,ss}(\bar{T}_{\text{in}} - \bar{T}_{\text{ext}}) + H_{pe}(\bar{T}_{\text{ext}} - T_g) \quad (109)$$

missä $H_{g,ss}$ on alapohjan lämpökonduktanssi tasapainotilanteessa, \bar{T}_{in} ja \bar{T}_{ext} ovat sisä- ja ulkoilman vuosikeskiarvot, T_g maaperän lämpötila aika-askeleella ja H_{pe} periodinen lämpökonduktanssi. Tässä ensimmäinen termi $H_{g,ss}(\bar{T}_{\text{in}} - \bar{T}_{\text{ext}})$ kuvaa lämpövirtaa tasapainotilanteessa suoraan ulkoilmaan ja toinen termi $H_{pe}(\bar{T}_{\text{in}} - \bar{T}_{\text{ext}})$ ottaa huomioon maaperän aiheuttaman lämmönvastuksen alapohjan maanvastaisesta pinnasta ulkoilmaan ja maaperän lämpöinertian.

Alapohjan ja maaperän termisen vuorovaikuttamisen mallintamisessa suurin ongelma on löytää luotettavia maaperän lämpötilatilastoja. Tästä syystä maaperän lämpötila T_g määritetään ulkolämpötilan funktiona. Maaperän lämpötila riippuu maaperän termisestä johtavuudesta λ_g (W/m·K) ja lämpökapasiteetista $\rho_g c_g$. Näiden perusteella voidaan määrittää maaperän periodinen penetraatiosyvyys δ_g , joka kertoo syvyyden missä yksiulotteisen lämpövirran aiheuttama lämpötilan vaihtelujen amplitudi on $1/e$ siitä, mitä se on maan pinnalla. Tässä e on luonnollisen logaritmin kanta ($e = 2,718$). Vuoden

mittaiselle lämpötilasyklille δ_g on

$$\delta_g = \sqrt{\frac{t_a \lambda_g}{\pi \rho_g c_g}}, \quad (110)$$

missä t_a on vuoden sekunnit. Periodisen penetraatiosyvyyden perusteella voidaan määrittää ulkolämpötilan vaihe-erotermin β_g kaavalla

$$\beta_g = 1,5 - 0,42 \ln \left(\frac{\delta_g}{d_f + 1} \right), \quad (111)$$

missä d_f on alapohjarakenteen ekvivalentti paksuus. Ekvivalentti paksuus määritetään kaavalla

$$d_f = w + \lambda(R_{si} + R + R_{se}), \quad (112)$$

missä w on lattiarakenteen vastaisen seinän paksuus (m), R on lattiarakenteen lämpövastus ($\text{m}^2\text{K/W}$), R_{si} on lattiarakenteen pintavastus sisäpuolella sekä R_{se} on maanpinnan pintavastus ulkona. Nyt voidaan määrittää, että maaperän lämpötila muuttuu vuoden aikana sinimuotoisesti ulkolämpötilan keskiarvon \bar{T}_{ext} ja lämpövaihtelun amplitudin \hat{T}_{ext} mukaan

$$T_g = \bar{T}_{\text{ext}} - \hat{T}_{\text{ext}} \cos \left(2\pi \frac{m - \tau_{\text{ext}} - \beta_g}{12} \right), \quad (113)$$

missä m on kuukauden järjestysnumero ja τ_g sen kuukauden järjestysnumero, jolloin ulkolämpötila saavuttaa minimiarvon. Yhdistämällä yhtälöt (109) ja (113) saadaan

$$\Phi_G = H_{g,ss}(\bar{T}_{\text{in}} - \bar{T}_{\text{ext}}) + H_{pe} \hat{T}_e \cos \left(2\pi \frac{m - \tau_{\text{ext}} - \beta_g}{12} \right). \quad (114)$$

Joissakin tapauksissa myös sisälämpötila vaihtelee periodisesti, esim. talvelle 20°C ja kesällä 24°C . Tällöin pitää yhtälöön (109) lisätä termi $H_{pi}(\bar{T}_{\text{in}} - T_{\text{in}})$, joka kuvaa näiden vaihteluiden vaikutusta alapohjan lämpövirtoihin. Määritetään siis ensin sisälämpötilan vaihe-erotermin

$$\alpha_i = 1,5 - \frac{12}{2\pi} \arctan \left(\frac{d_f}{d_f + \delta_g} \right), \quad (115)$$

jolloin voidaan määrittää sisälämpötilan kuukausittainen vaihtelu yhtälön (113) kaltaisesti ¹⁵

$$T_{\text{in}} = \bar{T}_{\text{in}} - \hat{T}_{\text{in}} \cos \left(2\pi \frac{m - \tau_i - \alpha_i}{12} \right). \quad (116)$$

Näin saadaan

$$\Phi_G = H_{g,ss}(\bar{T}_{\text{in}} - \bar{T}_{\text{ext}}) + H_{pe} \hat{T}_{\text{ext}} \cos \left(2\pi \frac{m - \tau_{\text{ext}} - \beta}{12} \right) - H_{pi} \hat{T}_{\text{in}} \cos \left(2\pi \frac{m - \tau_i + \alpha}{12} \right) \quad (117)$$

15. Jos ei tarkemmin tiedossa.

Periodiset konduktanssit H_{pe} ja H_{pi} sekä tasapainotilanteen konduktanssi $H_{g,ss}$ riippuvat alapohjarakenteen geometriasta ja määritetään tapauskohtaisesti kolmelle eri alapohjatyypille: maanvastainen alapohja, tuuletettu alapohja ja kellari. Niiden määrittämistä ei käydä tässä läpi tarkemmin. Tarkka määrittäminen löytyy standardista EN ISO 13370 [27].

4.3 Lämpövirtojen määrittäminen

4.3.1 Rakennuksen sisäiset lämpövirrat

Tässä $\Phi_{int,c}$ kuvaa sisäisiä lämpövirtoja, jotka ovat konvektiivisia, ja $\Phi_{int,r}$ radiatiivisia. Sisäisiin lämpövirtoihin luetaan kaikki rakennuksen käytöstä johtuvat lämpövirrat. Yleensä otetaan huomioon rakennuksen käyttäjistä, eli ihmisistä, sekä valaistuksesta ja muista sähkölaitteista vapautuva lämpöenergia.

Sisäiset lämpövirrat voidaan määrittää yleisten taulukkoarvojen mukaan. Esimerkiksi Suomen rakentamismääräysten mukaisessa energialaskennassa tulee käyttää taulukon 7 mukaisia arvoja. Taulukkoarvot edustavat kunkin rakennustyyppin keskimääräistä käyttöä, jolloin rakennusten erilaisten käytötapojen vaikutus energialaskentaan saadaan eliminoitua.

Taulukko 7: Rakennusten energialaskennassa käytettävät sisäiset lämpökuormat lämmitettyä nettoalaa kohden Rakentamismääräyskokoelman osan D3 2012 mukaisesti [54].

Käyttötarkoitusluokka	Kellonaika	Käyttöaika		Käyttöaste	Valaistus	Laitteet	Ihmiset
		h/24h	d/7d				
Erillinen pientalo sekä rivi- ja ketjutalo	00:00-24:00	24	7	0,6	8	3	2
Asuinkerrostalo	00:00-24:00	24	7	0,6	11	4	3
Toimistorakennus	07:00-18:00	11	5	0,65	12	12	5
Liikerakennus	08:00-21:00	13	6	1	19	12	5
Majoitusliikerakennus	00:00-24:00	24	7	0,3	14	4	4
Opetusrakennus ja päiväkot	08:00-16:00	8	5	0,6	18	8	14
Liikuntahalli	08:00-22:00	14	7	0,5	12	0	5
Sairaala	00:00-24:00	24	7	0,6	9	9	8

4.3.2 Ulkoiset lämpövirrat

Läpinäkymättömien rakenteiden absorboiman ja johtumalla sisätiloihin siirtyvän säteilyenergian vuo on

$$\Phi_{sh,O} = \sum_i \left[A \left(G_{sol} S_f - \phi_{sl} \frac{U}{h_e} \right) \right]_i \quad (118)$$

missä G_{sol} (W/m²) on auringonsäteilyn keskimääräinen teho pinta-alayksikköä kohden, h_e (m²K/W) on rakennusosan ulkopinnan lämmönvastus, U (W/m²K) on rakenteen lämmönläpäisykerroin ja A

on rakennusosan pinta-ala sisämittojen mukaan määritettynä. Tässä ϕ_{sl} on rakennusosasta taivaalle säteilemällä siirtyvä lämpövuoto, eli

$$\phi_{sl} = \epsilon_i h_{re} F_f \Delta T_{er}, \quad (119)$$

missä h_{re} (W/m²K) on rakennusosan ulkopinnan radiatiivinen pintavastus, ΔT_{er} on ulkoilman ja näennäisen taivaan välisen lämpötilan ajallinen keskiarvo, F_f on rakennusosan ja taivaan välinen muotokerroin ja ϵ_i rakennusosan emissiviteetti. Rakennusosan absorboiman lämpövirran saa kertoimella

$$S_{f,i} = \frac{\alpha_i U_i}{h_e}, \quad (120)$$

missä α_i on rakennusosan auringon säteilyn absorptiokerroin. Yleensä oletetaan rakenteen termodynaamisista ominaisuuksista ja ympäristöstä riippumatta, että $h_e=13,5$ m²K/W, $h_{re}=5,5$ W/m²K ja $\Delta T_{er}=10$ °C. Rakennusosan lämmönläpäisykerroin U ja pinta-ala A tulee olla määritetty ISO 6946 [28] mukaisesti. Rakenteen absorptiokertoimena α käytetään kokeellisesti määritettyjä arvoja [45] (kts. taulukko 8). Auringonsäteilyn lämpövirran vuo ikkunoiden ja muiden valoaukkojen kautta lasketaan kaavalla

$$\Phi_{sd,W} = \sum_i [G_{sol} A_{gl} S_{f1} (1 - F_{sl}),]_i \quad (121)$$

missä A_w on ikkuna-aukon pinta-ala, S_{f1} auringon säteilyn sädemäisen komponentin läpäisykerroin ja F_{sl} auringonsäteilyn häviökerroin, joka ilmoittaa sen osuuden ikkunan läpäisseeestä säteilystä mikä heijastuu vyöhykkeen sisäpinoista suoraan ikkunan läpi ulos. Viimeinen virtatermi $\Phi_{sl,W}$ sisältää ikkunoiden läpi absorboitumisen ja johtumisen kautta siirtyvän lämmön ja taivashäviöt. Lisäksi tähän termiin luetaan kaikki termisesti kevyet ulkomateriaalit, jotka ovat ikkunoista poiketen läpinäkymättömiä. Eli,

$$\Phi_{sl,W} = \sum_i \left[A \left(S_{f2} G_{sol} - \phi_{sl} \frac{U}{h_e} \right) \right]_i + \sum_j \left[A \left(S_f G_{sol} - \phi_{sl} \frac{U}{h_e} \right) \right]_j \quad (122)$$

missä alaindeksi i tarkoittaa ikkunoita ja muita valoaukkoja ja alaindeksi j tarkoittaa läpinäkymättömiä, mutta termisesti kevyitä rakenteita. Näihin luetaan esim. ikkunoiden karmit. Läpäisykerroin S_{f2} määritetään samalla tavalla kuin S_f yhtälössä (120), eli

$$S_{f2,i} = \frac{\alpha_i U_i}{h_e} \quad (123)$$

jolloin ikkunan säteilyenergian kokonaisläpäisykertoimesta g_{tot} voidaan ratkaista sädemäisen säteilyn läpäisykerroin

$$S_{f1} = (g_{tot} - S_{f2}) F_{sh} F_c \quad (124)$$

mikä voidaan sijoittaa takaisin yhtälöön (121). Tässä F_c on ikkunan verhojen auringonsäteilyn läpäisykerroin ja F_{sh} on ikkunan ulkopuolisten varjostimien auringonsäteilyn läpäisykerroin. Näin ikkunoiden sekundaarinen auringon lämpösaanto voidaan määrittää, kun tiedetään pelkästään g-arvo ja absorptiokerroin.

Taulukko 8: Erilaisten pintojen absorptiokertoimia α_s . Otetaan huomioon vain energiamallintamisen kannalta oleellinen osa auringon spektristä.

Pinta	Absorptiokerroin α_s
Seinäpinnat:	
- vaalea maali	0,4
- mattapintainen maali	0,6
- tumma maali	0,8
- tiili	0,8
- vaalea tiili	0,6
Kattopinnat:	
- punainen tiili	0,6
- tummat pinnat	0,8
- metalli (kirkas)	0,2
- hiekkamainen	0,6

5 Kuukausimenetelmä

Kuukausimenetelmässä lasketaan tilan energiatase kuukauden keskiarvoisia oloja kuvaavien suureiden avulla. Lämpövirtojen määrittämisen jälkeen voidaan määrittää tilojen energiatase, eli kuukaudelle se energiamäärä joka tilaan pitää tuoda (lämmityksen nettotarve) tai poistaa (jäähdytyksen nettotarve), jotta tilalle asetettu sisälämpötilan raja-arvo voidaan ylläpitää.

Lämmitysenergian tarve $Q_{H,nd}$ määritetään laskemalla tilan energiatase käyttäen kaavaa:

$$Q_{H,nd} = Q_{ht} - \eta_{H,gn} Q_{gn} \quad (125)$$

missä Q_{ht} on tilan kokonaislämmönsiirto, Q_{gn} on tilan kokonaislämpösaanto ja $\eta_{H,gn}$ on lämpösaannon hyödyntämiskerroin aika-askeleelle. Jäähdytysenergian tarve $Q_{C,nd}$ määritetään vastaavanlaisesti, mutta nyt lämpösaannon hyödyntämisen sijasta käytetään lämpöhäviöiden hyödyntämiskerrointa:

$$Q_{C,nd} = Q_{gn} - \eta_{C,ht} Q_{ht} \quad (126)$$

missä Q_{ht} on tilan kokonaislämpösiirto, Q_{gn} on tilan kokonaislämpösaanto ja $\eta_{C,ht}$ on lämpöhäviön hyödyntämiskerroin aika-askeleelle. Positiivinen $Q_{H,nd}$:n arvo tarkoittaa, että tilassa on lämmitysenergian tarve lämpötasapainon ylläpitämiseksi. Positiivinen $Q_{C,nd}$:n arvo tarkoittaa, että tilassa on jäähdytysenergian tarve lämpötasapainon ylläpitämiseksi. Aika-askeleelle molemmat voivat olla positiivisia, jolloin tilassa on osan aika-askeleesta lämmitystarve ja osan ajasta jäähdytyksen tarve.

Edellä kuvattu hyödyntämiskertoimiin perustuvan kuukausitason laskentamenetelmän kuvaus löy-
tyy myös standardista SFS-EN ISO 13790 [25] ja Suomen rakentamismääräyskokoelman oppaasta
D5:2012 [55].

Lämpösaannon hyödyntämiskerroin lämmitykselle $\eta_{H,gn}$ on lämpötasapainosuhteen γ_H ja numeerisen
parametrin a_H funktio ja riippuu rakennuksen lämpöinertiasta, jota kuvaa rakennuksen aikavakio τ_H
(h). Hyödyntämiskerroin määritetään kuten yhtälöissä (127) – (132) on esitetty

$$\text{jos } \gamma_H > 0 \text{ ja } \gamma_H \neq 1 : \quad \eta_{H,gn} = \frac{1 - \gamma_H^{a_H}}{1 - \gamma_H^{a_H+1}} \quad (127)$$

$$\text{jos } \gamma_H = 1 : \quad \eta_{H,gn} = \frac{a_H}{a_H + 1} \quad (128)$$

$$\text{jos } \gamma_H < 0 : \quad \eta_{H,gn} = \frac{a}{\gamma_H} \quad (129)$$

ja

$$\gamma_H = \frac{Q_{gn}}{Q_{ht}} \quad (130)$$

$$a_H = a_{H,0} + \frac{\tau_H}{\tau_{H,0}} \quad (131)$$

missä parametrien $a_{H,0}$ ja $\tau_{H,0}$ arvot ovat kokeellisesti määritettyjä korjauskertoimia. Yleisesti käyte-
tään arvoja $a_{H,0} = 1$ ja $\tau_{H,0} = 15$, mutta tässä menetelmässä käytetään $a_{H,0} = 3.1$. Rakennuksen (tai
tilan) aikavakio τ_H kuvaa tilan lämpöinertiaa ja riippuu tilan sisäisestä lämpökapasiteetista C_C (J/K)
ja kokonaislämpöviökertoimesta H (W/K) siten, että

$$\tau_H = \frac{1}{3600} \frac{C}{H}. \quad (132)$$

Lämmönsiirron hyödyntämiskerroin jäädytykselle $\eta_{C,ht}$ riippuu vastaavasti rakennuksen lämpöiner-
tiasta, mutta nyt käytetäänkin *jäädytyksen* lämpötasapainosuhdetta γ_C ja parametria a_C . Hyödyntä-
miskerroin määritetään kuten yhtälöissä (133) – (138) on esitetty

$$\text{jos } \gamma_C > 0 \text{ ja } \gamma_C \neq 1 : \quad \eta_{C,ht} = \frac{1 - \gamma_C^{a_C}}{1 - \gamma_C^{a_C+1}} \quad (133)$$

$$\text{jos } \gamma_C = 1 : \quad \eta_{C,ht} = \frac{a_C}{a_C + 1} \quad (134)$$

$$\text{jos } \gamma_C < 0 : \quad \eta_{C,ht} = \frac{a_C}{\gamma_C} \quad (135)$$

ja

$$\gamma_C = \frac{Q_{gn}}{Q_{ht}} \quad (136)$$

$$a_C = a_{C,0} + \frac{\tau_C}{\tau_{C,0}} \quad (137)$$

$$\tau_C = \tau_H \quad (138)$$

missä parametrien $a_{C,0}$ ja $\tau_{C,0}$ arvot ovat kokeellisesti määritettyjä korjauskertoimia. Yleisesti käytetään arvoja $a_{C,0} = 1$ ja $\tau_{C,0} = 15$, ja niin myöskin tässä menetelmässä.

Tilan lämpötaseen, eli $Q_{H,nd}$ ja $Q_{C,nd}$, ratkaisemiseksi vaadittava kokonaislämmönsiirto Q_{ht} kuvaa tilan kaikkia lämpövirtoja, jotka menevät tilan energiataserajan yli. Positiivinen arvo tarkoittaa lämpövirtaa tilasta pois. Nämä lämpövirrat jaetaan kolmeen osaan:

$$Q_{ht} = Q_{ht,tr} + Q_{ht,AHU} + Q_{ht,inf}. \quad (139)$$

Ensimmäinen termi, $Q_{ht,tr}$, kuvaa tilan ulkorakenteiden läpi johtumalla siirtyvää lämpötehoa, $Q_{ht,AHU}$ kuvaa tilan ilmanvaihtojärjestelmän ja $Q_{ht,inf}$ vuotoilman aiheuttamaa advektiivista lämpövirtaa.

Tilan lämpötaseen, eli $Q_{H,nd}$ ja $Q_{C,nd}$, ratkaisemiseksi vaadittava kokonaislämpösaanto Q_{gn} kuvaa tilan kaikkia lämpövirtoja, jotka syntyvät tilan energiataserajan sisällä. Lämpösaannot jaetaan kahteen osaan:

$$Q_{gn} = Q_{gn,int} + Q_{gn,sol}. \quad (140)$$

Ensimmäinen termi $Q_{gn,int}$ kuvaa tilan käytön (ihmisten oleskelu, valaistus ja sähkölaitteet) aiheuttamaa lämpösaantoa ja $Q_{gn,sol}$ kuvaa tilan ikkunoiden ja valoaukkojen kautta säteilemällä tulevan auringon säteilyenergian aiheuttama lämpösaanto. Positiivinen arvo tarkoittaa lämpövirtaa tilaan.

6 Testausmenetelmät

6.1 ASHRAE 140-2011

ANSI/ASHRAE 140-2011 esittää kaksi erilaista testausmenettelyä rakennusten energialaskentaohjelmistojen suoristuskyvyn arviointiin. Testausmenettelyn ideana on antaa raja-arvot energialaskentaohjelmiston antamille tuloksille erilaisissa simulointitapauksissa. Tapaukset ovat jaettu kahteen luokkaan, joista luokkaan 1 kuuluvat tapaukset ovat tarkoitettu enintään tunnin laskentajaksoon perustuvaa dynaamista algoritmia käyttävien ohjelmistojen testaamiseen. Luokkaan 2 kuuluvat tapaukset ovat tarkoitettu kaikille energialaskentaohjelmille riippumatta laskentajakson pituudesta. Testitapauksissa testattavan ohjelmiston antamaa tulosta verrataan joko muiden ohjelmistojen antamien tuloksien avulla määritettyihin rajoihin tai tilanteen analyttiseen (tai tarkemmin sanottuna kvasi-analyttiseen) ratkaisuun. Analyttiseen ratkaisuun vertaaminen on tehokas tapa löytää ohjelmointivirheitä, joita ei muuten löytyisi, koska virheitä on etsittävä niin kauan kunnes tulokset täsmäävät. Vaihtoehtona on myöntää, että menetelmässä on joku perustavanlaatuinen virhe, koska analyttinen ratkaisu on ainoa matemaattisesti todenmukaisia ratkaisuja antava malli tilanteesta. Ainut ongelma tässä menettelyssä on kehittää järkeviä testitapauksia, joille analyttinen ratkaisu löytyy ja jotka olisivat jollain tavalla oleellisia rakennusten energiamallintamisessa¹⁶.

16. Jälkimmäinen syy on yleisempi

Muihin ohjelmiin vertailuun on otettu tuloksia monista viimeisintä tekniikkaa edustavista pitkän kehityskaaren ohjelmistoista¹⁷. Näiden tulosten perusteella on määritetty rajat, joiden sisällä testattavan menetelmän antamien tulosten tulisi olla. Standardissa ei kuitenkaan oteta kantaa siihen, milloin tulokset 'läpäisevät' standardin kriteerit. Koko testaamisen lähtökohtana on se tosiasia, että kaikkien laskentamenetelmän käyttämien algoritmien testaaminen kaikilla mahdollisilla parametreilla ei ole mahdollista, joten yksiselitteisiä vaatimuksia ei voida asettaa¹⁸. Päätös siitä, voidaanko menetelmän katsoa läpäisseen testit on jätetty testaavan toimijan harkinnan varaan. Seuraavat seikat kehoitetaan ottamaan huomioon tulosten analysoinnissa:

- Tulokset ovat linjassa standardissa esitettyjen rajojen kanssa.
- Eri testitapauksien väliset keskinäiset erot ovat linjassa standardissa esitettyjen rajojen kanssa.
- Tulosten herkkyyks parametrien muutoksille on saman suuntainen standardin kanssa.
- Tulokset eivät ole vastoin tapauksilta odotettavissa olevaa fysikaalista käyttäytymistä.
- Tulokset ovat linjassaan analyttisten ratkaisujen kanssa.
- Standardissa esitetyt esimerkkiarvot eivät edusta lopullista totuutta.

Erilaisia testitapauksia on 119 kappaletta. Näistä 34 kuuluu luokkaan 2 ja ne kaikki perustuvat samaan suhteellisen realistiseen yhden vyöhykkeen rakennukseen (kuva 6.2), jonka lämmitys- tai jäähdytysjärjestelmä toimii ideaalisesti. Testaustapana on kaikissa vertailu muista ohjelmista johdettuihin esimerkkituloksiin. Loput tapaukset (luokka 1) ovat tarkoitettu yksityiskohtaisempien laskentatyökalujen testaamiseen. Erilaisia geometrioita on kolme, ja ne ovat yksinkertaisia laatikoita joissa on ikkuna enintään kahdella seinällä tai ei ollenkaan (kuva 6.1). Luokasta 1 neljä tapauksia on niin sanottuja Free-float -tapauksia, joissa ei ole lämmitys- tai jäähdytysjärjestelmää. Näillä pystytään testaamaan sisäilman lämpötilan mallintamisen toimivuutta. Lopuissa tapauksissa lämmitysjärjestelmä on joko ideaalinen tai realistinen. Ideaalinen lämmitys- tai jäähdytysjärjestelmä pystyy täyttämään lämmöntarpeen välittömästi efektiivisesti äärettömällä teholla. Realistisissa tapauksissa annetaan järjestelmän toiminnalle raja-arvot. Analyttisesti (tai kvasi-analyttisesti) ratkaistavissa olevia tapauksia on 22. Loput perustuvat vertailuun muista ohjelmista saatuihin tuloksiin.

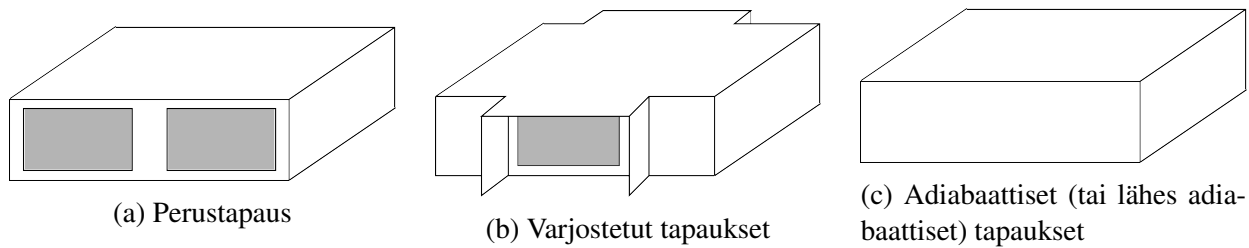
Tässä työssä käytettiin vain luokan 2 testitapauksia kuukausimenetelmän testaamiseen. Koska kuukausimenetelmä ei laske rakennuksen jäähdytysenergiantarvetta, soveltuvia testitapauksia oli 21 kappaletta. Tapaukset jaetaan tason 1 ja tason 2 testeihin (Tier 1 ja Tier 2). Tason 1 tapauksissa testataan ohjelmiston kykyä mallintaa rakennuksen vaipan ominaisuuksia perustapauksen lisäksi testeillä joissa perustapaukseen muutetaan seuraavia asioita: vuotoilman määrä, seinän ja yläpohjan U-arvot, ikkunalasitusten fysikaaliset ominaisuudet, ikkunoiden pinta-ala ja suuntaus, eteläpuolisen ikkunan varjosuus, sisäiset lämpökuormat ja ulkopintojen väriys, energiatehoton rakennus, eristämätön ja eristetty maanvarainen alapohja sekä eristetty ja eristämätön kellarirakenne. Tason 2 testit liittyvät passiivis-

17. Näitä ohjelmia ovat mm. BLAST, DOE, SERIRES, EPS, S3PAS, TRNSYS ja TASE.

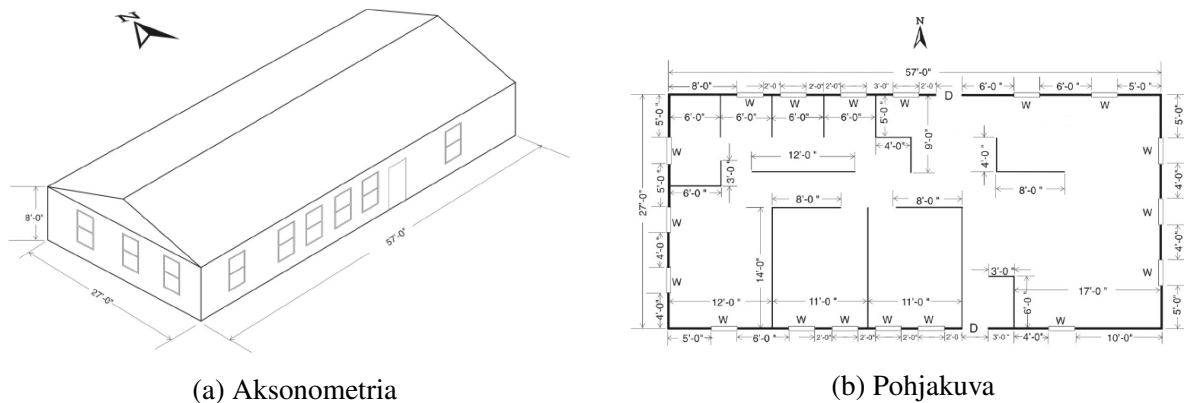
18. Standardin soveltamisesta sanotaankin hyvin tyhjentävästi:

"These standard test procedures apply to building energy computer programs that calculate the thermal performance of a building and its mechanical systems. While these standard test procedures cannot test all algorithms within a building energy computer program, they can be used to indicate major flaws or limitations in capabilities."

– ANSI/ASHRAE 140-2011 [7]



Kuva 6.1: ASHRAE 140-2011 luokkaan 1 kuuluvien testitapausten geometrioita. Geometriat ovat hyvin yksinkertaisia, jotta testitapauksissa pystyttäisiin mahdollisimman hyvin testaamaan tietyn parametrin (esim. ikkunoiden koon) vaikutusta simulaatioiden tuloksiin.



Kuva 6.2: ASHRAE 140-2011 luokkaan 2 kuuluvien testitapausten pohjamalli. Malli pyrkii olemaan paljon realistisempi kuin luokkaan 1 kuuluvissa tapauksissa. Luokan 2 tapaukset soveltuvat luokkaa 1 paremmin simulaation kokonaistarkkuuden tarkasteluun.

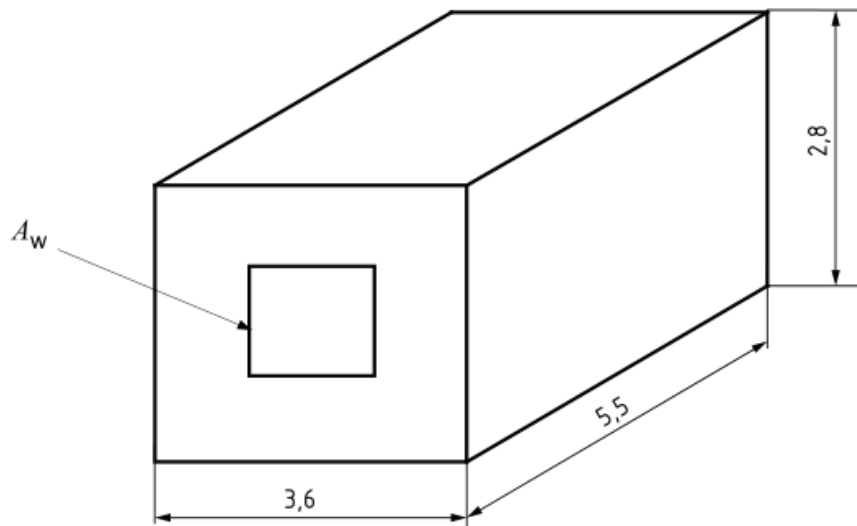
ta aurinkoenergiaa hyödyntävään suunnitteluun. Passiivitalon perustapauksen lisäksi tehdään testit joissa perustapauksessa muutetaan seuraavia asioita: termisen massan lisäys ja vähennys, ikkunoiden suuntaus, itä- ja länsipuolisten ikkunoiden varjostus, ikkunoiden koko ja etelän puoleinen varjostus.

Näille tapauksille määritettiin absoluuttinen lämmitysenergian tarve tilojen sisälämpötilan pitämiseen tietyissä rajoissa. Lisäksi vertailtiin kuukausimenetelmän antamia tuloksia keskenään tiettyjen tapauksien kesken esim. tapauksen L100 ja L110 tilojen lämmitysenergiantarpeen erotusta verrattiin muiden ohjelmien antamien tulosten erotukseen. Näitä ns. delta-tarkasteluita tehtiin 19 kappaletta.

Vaikka ASHRAE standardissa ei oteta kantaa siihen, milloin testauksen tulokset ovat hyväksyttävällä tasolla, sen liitteessä B22 esitetään esimerkki (Example Procedures for Developing Acceptance Range Criteria for Section 7 Test Cases) jota voidaan käyttää osoittamaan tulosten sijoittuminen hyväksyttävälle vaihteluvälille. Vaihteluvälin ääripäät muodostuvat 93% maksimi luottamusrajasta tai vertailutulosten maksimiarvosta johon lisätty 4 MBtu (näistä suurempi on vaihteluvälin maksimi arvo) sekä 93% minimi luottamusrajasta tai vertailutulosten minimiarvosta josta vähennetty 4 MBtu (näistä pienempi on vaihteluvälin minimi arvo).

6.2 EN ISO 13792

Standardi EN ISO 13792 sisältää testausmenetelmän dynaamisen, vähintään tunnin mittaista laskentajaksoa käyttävän, laskentamenetelmän testaamiseen. Testissä määritetään yksinkertaisen, mutta rea-



Kuva 6.3: EN 13792 sisälämpötilatestien perusgeometria. Tapauksessa A, $A_w = 3,5 \text{ m}^2$ ja B:lle $A_w = 7 \text{ m}^2$. Ulkoseinä osoittaa länteen ja muut pinnat ovat adiabaattisia sisäpintoja.

listisen, huoneen lämpötilaprofiili vuorokauden ajalle. Laskenta suoritetaan iteratiivisesti samaa vuorokauden säädataa toistaen, kunnes ratkaistu sisälämpötila on tarpeeksi stabiili. Tällöin sallittu lämpötilaero edelliseen iteraatiokertaan on enintään $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Huoneesta on kaksi erilaista geometriaa A ja B, joista kummastakin on kolme erilaista versiota rakenteita muuttaen A.1, A.2, A.3, B.1, B.2 ja B.3. Näille tapauksille testataan vielä ilman vaihtuvuuden vaikutusta kolmella erilaisella ilmanvaihtoprofiililla. Nämä ovat: a) Ilmanvaihtuvuus yksi kerta tunnissa koko tilalle, eli 1 h^{-1} , b) ilmanvaihtuvuus 1 h^{-1} , mutta klo 9:00-18:00 välisenä aikana tehostettu ilmanvaihto, jolloin ilmanvaihtuvuus 10 h^{-1} , c) ilmanvaihtuvuus 10 h^{-1} . Tapauksille A ja B käytettiin myös eri säädataa niin lämpötilojen, kuin auringon säteilyn suhteen. Näin saadaan yhteensä 18 erilaista testitapausta. Testitapausten vertailuarvot löytyvät taulukosta 9.

Taulukko 9: EN 13792 testitapausten vertailuarvot

Tapaus	Sisälämpötila A ($^\circ\text{C}$)			Sisälämpötila B ($^\circ\text{C}$)			
	maks.	min.	ka.	maks.	min.	ka.	
1	a	38,8	33,6	35,9	35,9	27,1	30,8
	b	34,1	25,6	29,5	30,0	16,5	22,3
	c	33,6	25,4	29,1	28,3	16,3	21,6
2	a	37,7	34,5	35,9	33,9	28,6	30,8
	b	32,3	26,6	29,5	26,9	18,1	22,3
	c	32,4	26,4	29,1	26,5	17,8	21,6
3	a	40,6	37,0	38,6	35,8	30,2	32,5
	b	35,0	28,0	31,4	29,2	19,2	24,0
	c	33,6	27,4	30,2	27,5	18,7	22,6

7 Tulokset

7.1 ASHRAE 140-2011 lämmöntarvetestit kuukausimenetelmälle

ASHRAE 140-2011 liitteen B22 esimerkkitarkastelun perusteella laskettujen esimerkkiraja-arvojen mukaan 34 tapausta 40:stä osuvat vertailutulosten vaihteluväliin. Merkittävät poikkeamat ovat tapauksissa P110AC, L150AC-L100AC, L322AB-L100AC, L322AB-L324AB, P105AC-P100AC ja P140AC-P100AC. Tulokset ja niiden vertailutulosten vaihteluvälit löytyvät taulukoista 10 ja 11. Tulosten analysoinnissa viitataan ensisijaisesti näihin vertailuihin. Kuukausimenetelmän antamia tuloksia vertaillaan myös kvalitatiivisesti vertailuohjelmien antamiin tuloksiin kuvissa A.1, A.2, A.3, A.4, A.5 ja A.6.

Tapaus L150AC-L100AC on poikkeama vertailutulosten vaihteluvälistä, mutta tapauksen L150AC absoluuttisessa lämmöntarpeessa ei ole. Tapauksessa L150AC kaikki ikkunat ovat suunnattu etelään, joten lämpökuormat ovat merkittävät koko rakennuksen energiataseessa. Vastaavanlainen, mutta merkittävästi suurempi poikkeama huomataan passiivitalosarjan tapauksissa P100AC, P105AC ja P110AC, ja niiden delta tarkasteluissa. Näissä tapauksissa jokaisessa kaikki ikkunat ovat tapauksen L150AC lailla suunnattu etelään. Poikkeama havaitaan myös tapauksen P110AC lämmöntarpeen absoluuttisessa arvossa¹⁹.

Nämä poikkeamat viittaavat siihen, että kuukausimenetelmän laskema lämmöntarve on järjestelmällisesti pienempi kuin vertailuarvot sellaiselle tapaukselle, missä on suuri auringon lämpökuorma. Toisaalta tapauksessa P105AC-P100AC ei ole poikkeamaa. Mikä viittaa puolestaan siihen, että kuukausimenetelmä mallintaa varjostimien vaikutuksen hyvin. Näin ollen pelkästään auringon lämpökuorman vaihtelulla ei voida selittää poikkeamia.

Passiivitalosarjan tapauksien P100AC ja P105AC terminen massa on huomattavasti suurempi (84 Wh/m²K) kuin tapauksen P110AC (27 Wh/m²K) ja L150AC (22 Wh/m²K). Toisaalta passiivitalosarjan tapauksessa P140AC, joka on ikkunaton versio perustapauksesta P100AC, ei ole poikkeamaa. Samoin tapauksessa L140AC (ikkunaton versio tapauksesta L150AC) ei ole poikkeamaa. Suuri tai pieni terminen massa yksinään ei siis riitä selittämään poikkeamia.

Suhteelliset poikkeamat tapauksissa L150AC ja L150AC-L100AC ovat paljon pienemmät kuin poikkeamat passiivitalosarjan tapauksissa²⁰. Tämä viittaisi siihen, että suuret lämpökuormat yhdistettynä suureen termiseen massaan on passiivitalosarjan delta-arvojen suhteellisesti suurempien poikkeamien ja P110AC poikkeaman taustalla.

Deltatarkastelujen poikkeamat L322AB-L100AC ja L322AB-L324AB näyttävät kuukausimenetelmän yksinkertaisen laskentatavan heikkouden maanvastaisten rakenteiden mallintamisessa. Molemmista tapauksissa on mukana tapaus, jossa on maanvastainen kellari. Poikkeama on kuitenkin maltillinen ja lämmöntarpeen absoluuttisissa arvoissa ei ole poikkeamaa.

19. Myös tapauksissa P100AC ja P105AC on selvää poikkeamaa, mutta tulokset pysyvät vertailutulosten vaihteluvälin sisällä.

20. Vaikka tapauksessa L150AC ei ole vaihteluvälit ylittävää poikkeamaa, niin lämmöntarpeen arvo on trendin vastaisesti lähempänä alarajaa kuin ylärajaa.

Taulukko 10: ASHRAE 140-2011 luokan 2 testitapauksille kuukausimenetelmän laskema lämmöntarve ja liitteen B22 esimerkin mukaiset sallitut vaihteluvälit. Lämmöntarve ilmaistu yksikössä Btu standardin mukaisesti. 1 Btu \approx 0.29 Wh.

Testitapaus	Kuvaus	Lämmöntarve (10 ⁶ Btu)			Vaihteluvälissä
		Kuukausimenetelmä	B22 Max	B22 Min	
L100AC	Perustapaus	65,43	79,46	48,76	Kyllä
L110AC	Voimakas vuotoilma	88,32	103,99	71,92	Kyllä
L120AC	Hyvin eristetty seinä ja katto	51,39	64,27	37,86	Kyllä
L130AC	Selektiivi-ikkunat ja puiset karmit	48,05	53,98	41,84	Kyllä
L140AC	Ei ikkunoita	54,67	56,48	43,25	Kyllä
L150AC	Kaikki ikkunat etelään	51,10	71,32	40,97	Kyllä
L155AC	Tapaus L150AC ja ylävarjostimet	53,77	74,16	43,56	Kyllä
L160AC	Itä/Länsi ikkunat koko seinälle	64,41	81,01	48,79	Kyllä
L170AC	Ei sisäisiä lämpökuormia	75,29	92,41	61,03	Kyllä
L200AC	Epäenergiatehokkaat seinät, lattia ja katto	152,71	185,90	106,39	Kyllä
L202AC	Tapaus L200AC mutta vähäinen aurion absorptanssi	155,60	190,06	111,32	Kyllä
L302AC	Maanvarainen alapohja, ei lisäeristeitä	74,14	90,55	56,69	Kyllä
L304AC	Maanvarainen alapohja, lisäeristein	60,88	75,31	48,59	Kyllä
L322AC	Kellari, eristämätön	77,92	114,66	75,91	Kyllä
L324AC	Kellari, eristetty	59,09	78,26	54,14	Kyllä
L165AC	Tapaus L160AC ja varjostimet	70,40	84,66	55,09	Kyllä
P100AC	Perustapaus passiivitalotestille (P-sarja)	6,99	18,40	6,02	Kyllä
P105AC	Ylävarjostimet	9,25	20,96	8,10	Kyllä
P110AC	Termisesti kevyemmät seinät ja sisäseinät	10,11	27,78	16,17	Ei
P140AC	Ei ikkunoita etelään, L120AC lattia	30,82	33,42	21,82	Kyllä
P150AC	Tasaisesti asetetut ikkunat	21,74	32,01	18,58	Kyllä

Taulukko 11: ASHRAE 140-2011 luokan 2 testitapauksille kuukausimenetelmän laskema lämmöntarpeen delta-arvot ja liitteen B22 esimerkin mukaiset sallitut vaihteluvälit. Lämmöntarve ilmaistu yksikössä Btu standardin mukaisesti. 1 Btu \approx 0.29 Wh.

Testitapaus	Lämmöntarve, delta (10 ⁶ Btu)			Vaihteluvälissä
	Kuukausimenetelmä	B22 Max	B22 Min	
L110AC-L100AC	22,89	28,14	19,39	Kyllä
L120AC-L100AC	-13,79	-7,67	-18,57	Kyllä
L130AC-L100AC	-16,00	-5,95	-27,49	Kyllä
L140AC-L100AC	-10,76	-4,55	-24,41	Kyllä
L150AC-L100AC	-14,33	-3,01	-12,52	Ei
L155AC-L150AC	2,67	6,86	6,87	Kyllä
L160AC-L100AC	-1,02	5,12	-3,71	Kyllä
L170AC-L100AC	9,89	17,65	7,12	Kyllä
L200AC-L100AC	87,28	107,70	56,37	Kyllä
L202AC-L100AC	2,91	9,94	-0,5	Kyllä
L302AB-L100AC	8,71	14,53	4,56	Kyllä
L302AB-L304AB	13,26	17,76	6,45	Kyllä
L322AB-L100AC	12,48	37,55	25,71	Ei
L322AB-L324AB	18,82	37,36	21,42	Ei
L165AC-L160AC	5,99	19,44	-0,06	Kyllä
P105AC-P100AC	2,26	6,56	-1,92	Kyllä
P110AC-P100AC	3,12	14,15	5,38	Ei
P140AC-P100AC	23,83	21,11	11,02	Ei
P150AC-P100AC	14,75	17,61	8,56	Kyllä

7.2 EN13792 sisälämpötilatestit tuntimenetelmälle

Tuntimenetelmää testattiin EN 13792-2012 mukaisilla testitapauksilla. Menetelmästä saadut tulokset ja vastaavat EN 13792 mukaiset vertailuarvot löytyvät taulukosta 12. Tapauksen A.3 b sisälämpötilan erotus vertailuarvoon lämpötilan maksimissa oli -1,6 °C ja keskiarvossa -1,2 °C. Nämä ovat yli sallitun rajan, sillä standardin mukaisesti erotuksen pitää olla välillä +3 °C ja -1 °C. Loput tapaukset täyttävät kriteerit.

Taulukko 12: Tuntimenetelmän antamat sisälämpötilan arvot ja niiden erotus EN 13792 vertailuluksiin taulukossa 9. Raja-arvot (+3 °C...-1 °C) ylittävät tulokset tapauksessa A.3 b ovat merkitty punaisella värillä.

Tapaus		Sisälämpötila (°C)			Erotus (°C)		
		maks.	min.	ka.	maks.	min.	ka.
A.1	a	40,1	35,1	37,3	1,3	1,5	1,4
	b	33,2	25,5	28,9	-0,9	-0,1	-0,6
	c	33,3	25,5	29,2	-0,3	0,1	0,1
A.2	a	39,4	36,1	37,6	1,7	1,6	1,7
	b	31,9	26,3	29,0	-0,4	-0,3	-0,5
	c	32,3	26,4	29,3	-0,1	0,0	0,2
A.3	a	40,1	36,4	38,1	-0,6	-0,6	-0,5
	b	33,4	27,1	30,2	-1,6	-0,9	-1,2
	c	32,9	27,0	30,0	-0,7	-0,5	-0,4
B.1	a	37,9	28,8	32,8	2,0	1,7	1,9
	b	29,9	16,6	22,1	-0,1	0,1	-0,2
	c	28,8	16,4	22,2	0,5	0,1	0,6
B.2	a	36,2	30,2	32,8	2,3	1,6	2,0
	b	27,4	18,0	22,2	0,5	-0,1	-0,1
	c	26,9	17,9	22,2	0,4	0,1	0,6
B.3	a	35,6	29,8	32,3	-0,2	-0,4	-0,2
	b	28,7	18,8	23,3	-0,6	-0,4	-0,7
	c	27,0	18,5	22,6	-0,5	-0,2	0,0

8 Johtopäätökset

Tässä työssä kehitettiin kaksi rakennusten energiavirtausten mallintamiseen soveltuvaa laskentamenetelmää, joista toinen on kuukausitason laskentajaksoon perustuva yksinkertainen menetelmä ja on tuntitason laskentajaksoon perustuva dynaaminen menetelmä. Kuukausimenetelmä testattiin ASHRAE 140-2011 luokan 2 mukaisten testitapausten avulla. Testitapauksia oli 21, joiden lisäksi tehtiin 19 ns. delta-tarkastelua. Kuukausimenetelmän antamista tuloksista 34/40 olivat standardin liitteessä annetun esimerkin vaihteluvälien sisällä. Vaikka vaihteluvälit olivat annettu esimerkin vuoksi, niihin vertaamalla saa kvantitatiivisia tuloksia menetelmän pätevydestä.

Jotta yksinkertaista kuukausimenetelmää käyttäen päästäisiin täyteen yhtenevyyteen 140-2011 vertailuarvojen kanssa, jouduttaisiin menetelmään tekemään muutoksia jotka eivät olisi enää fysikaalisesti perusteltuja. Kuten lisäämään tekaistuja korjauskertoimia tai muuta vastaavaa. ASHRAE 140-2011 luokan 2 testitapausten vertailussa käytettävät ohjelmat (BLAST, DOE ja SRES/SUN) ovat kaikki pitkän kehityslinjan dynaamisia energialaskentaohjelmistoja. Tähän suhteutettuna tulos 34/40 on mille tahansa kuukausimenetelmälle todella hyvä.

ASHRAE 140-2011 luokan 2 testausmenetelmä on erittäin hyvin dokumentoitu, kattava ja selkeä testausmenetelmä. Testausmenetelmä mittaa vain laskentamenetelmän kykyä mallintaa rakennuksen tilojen lämmitysenergiantarvetta, eikä se ota huomioon esim. koneellista ilmanvaihtoa, lämpimän käyttöveden käyttöä tai sähkönkulutusta. Lisäksi testaus tehtiin lämmöntarpeen osalta Colorado Springs (USA) säädatalla. Ilmasto Colorado Springsissä on melkein yhtä kylmä kuin Suomessakin, mutta

eteläisen sijaintinsa (leveyspiiri 38°) takia auringon säteilysaanto on huomattavasti suurempi²¹. Olisi hyvä, jos testitapaukset voitaisiin tehdä Suomen säädataan perustuen.

Tuntitason laskentamenetelmää verrattiin standardin ISO EN 13792 sisälämpötilan mallintamiseen tarkoitettuihin testitapauksiin. Testitapauksia oli 18 joille kaikille määritettiin tilan sisälämpötilan maksimi, minimi ja keskiarvo yhden syklisesti toistuvan vuorokauden aikana. Yhdessä tapauksessa tilan vuorokauden maksimi- ja keskilämpötila poikkesivat yli sallitun raja-arvon noin puolella asteella. Loput tapaukset täyttivät kriteerit.

EN 13792 on nopea ja luotettava testausmenetelmä, mutta se ei ole kovin kattava. Testitapauksista puuttuu esimerkiksi erilaisten auringonsuojauksien testaaminen. Testitilassa on koko ajan sama ikkuna jossa on yksi auringonsuojalevy. Auringonsuojauksien mallintaminen on kuitenkin oleellinen osa sisälämpötilalaskurin käyttötarkoitusta, joten auringon suojauksien testaamiseen soveltuvan testausmenetelmän etsiminen olisi erittäin tärkeää. Toinen merkittävä puute oli alapohjien puuttuminen. Tämä puute ei kuitenkaan muodosta suurta ongelmaa, koska monikerroksisissa rakennuksissa sisälämpötilaongelmat syntyvät lähes poikkeuksetta ylemmissä kerroksissa, missä on vähemmän varjostuksia. Näin ollen alapohjien mallintamista tarvitaan harvoin.

Yllä kuvattujen testitulosten perusteella voidaan todeta, että molempia menetelmiä voidaan käyttää suunniteltuihin käyttötarkoituksiinsa. Huomattavaa on, että sisälämpötilojen laskemiseen kehitetty menetelmä on myös nopea. Kokonaisen testivuoden – 8760 aika-askelta – läpikäymiseen viidellä iteroitokerralla menee yksinkertaisille tiloille reilusti alle puoli minuuttia. Tämä johtuu suurelta osin siitä, että laskennassa keskitytään vain yhteen suureeseen - energiaan. Muut markkinoilla olevat ohjelmat laskevat energian lisäksi paljon muutakin, kuten CO₂ -tasoja, ilmavirtauksia, paineita ja auringonvaloisuutta. Näin niiden laskenta-ajat voivat olla samanlaiselle tilalle jopa 10 minuuttia.

Lisäksi on huomattavaa, että kuukausimenetelmä läpäisi ASHRAE 140-2011 testit kvalitatiivisesti. Suomen rakentamismääräyksiä kirjaimellisesti tulkitsemalla myös kuukausimenetelmä olisi täten määräykset täyttävä validoitu laskentamenetelmä. Kuitenkin, kuukausimenetelmä ei voi koskaan olla *dynaaminen* menetelmä. Työtä jatketaan tekemällä myös tuntimenetelmälle samat ASHRAE 140-2011 luokan 2 testitapaukset, jotka tässä tehtiin kuukausimenetelmälle sekä lisäksi saman standardin pelkästään dynaamisille laskentamenetelmille tarkoitettut luokan 1 testitapaukset.

21. Vertailun vuoksi todettakoon, että Helsingin leveyspiiri on 60°.

9 Viitteet

- [1] Building Energy Software Tools Directory, The Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/. Viitattu: 23.2.2014.
- [2] Laki rakennuksen energiatodistuksesta. 18.1.2013/50.
- [3] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), Institute for Energy and Transport, European Commission. <http://iet.jrc.ec.europa.eu/pvgis>.
- [4] Surface meteorology and Solar Energy (SSE), Atmospheric Science Data Center, NASA. <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse>.
- [5] Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatodistuksesta. 27.2.2013/176.
- [6] ASHRAE, 1791 Tullie Circle NE, Atlant, Ga 30329. *ANSI/ASHRAE Standard 55-2010, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.
- [7] ASHRAE, 1791 Tullie Circle NE, Atlant, Ga 30329. *ANSI/ASHRAE Standard 140-2011, Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs*.
- [8] ASHRAE, 1791 Tullie Circle NE, Atlant, Ga 30329. *ASHRAE Handbook - Fundamentals*, SI-laitos, 2009.
- [9] Kendal A. Atkinson. *An Introduction to Numerical Analysis*. John Wiley & Sons, toinen laitos, 1989.
- [10] A. W. Awbi ja H. Hatton. Natural convection from heated room surfaces. *Energy and Buildings*, 30(3):233–244, 1999.
- [11] Chartered Institution of Building Services Engineers. *CIBSE Guide A: Environmental Design*, 1999.
- [12] S. W. Churchill ja H. H. S. Chu. Correlation equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18(11):1323–1329, 1975.
- [13] M.R. Collins, S.H. Tanim, ja J.L. Wright. Determination of convective heat transfer for fenestration with between-the-glass louvered shades. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(11–12):2742–2751, 2008.
- [14] D.B. Crawley, J.W. Hand, M. Kummert, ja B.T. Griffith. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43(4):661–673, 2008.
- [15] Morris G. Davies. *Building Heat Transfer*. Wiley, 2004.
- [16] Erbs D.G, S.A. Klein, ja J. A. Duffie. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*, 28(4):293–302, 1982.
- [17] John A. Duffie ja William A. Beckman. *Solar engineering of thermal processes*. Wiley, kolmas laitos, 2006.
- [18] European Committee for Standardization. *EN 308:1997 Heat exchangers - Test procedures for establishing performance of air to air and flue gases heat recovery devices*.
- [19] European Committee for Standardization. *EN ISO 15927-1:2003 Hygrothermal performance of buildings. Calculation and presentation of climatic data. Part1: Monthly means of single meteorological elements*, 10 April 2003.

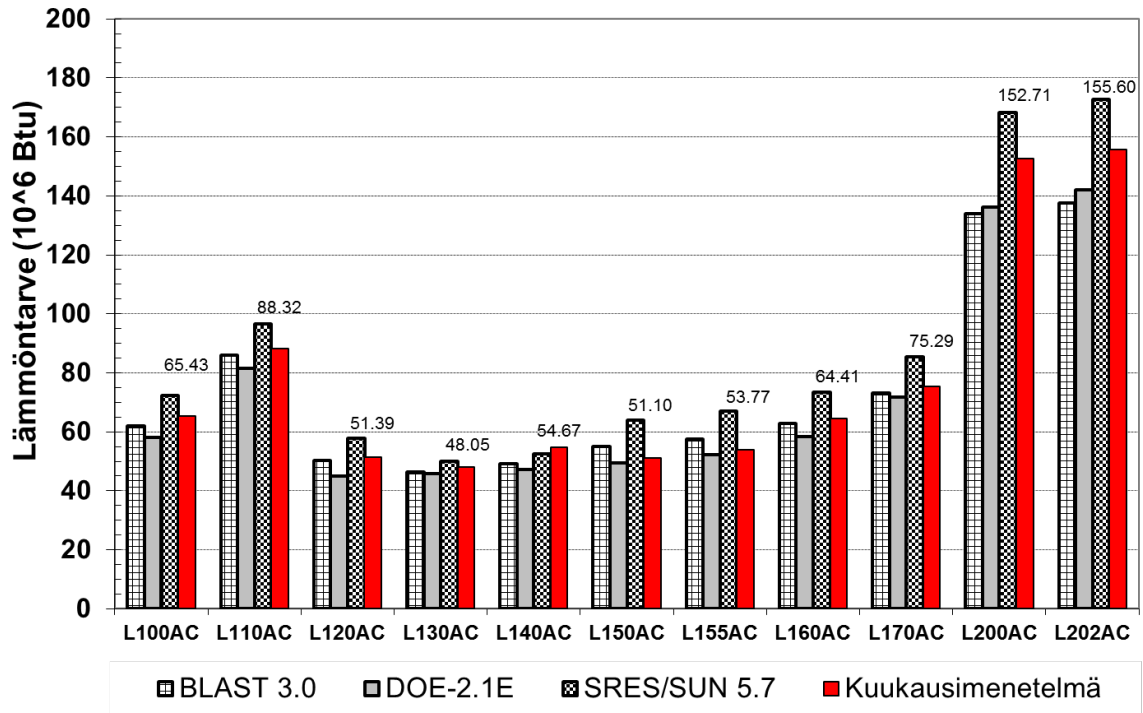
- [20] European Committee for Standardization. *EN 13792:2012 Thermal performance of buildings. Calculation of internal temperatures of a room in summer without mechanical cooling. Simplified Methods (ISO 13792:2012)*, 10 August 2012.
- [21] European Committee for Standardization. *EN ISO 13829:2000 Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of building. Fan pressurization method (ISO 9972:1996 modified)*, 18 October 2000.
- [22] European Committee for Standardization. *EN ISO 10077-1:2006 Thermal performance of windows, doors and shutters. Calculation of thermal transmittance. Part 1: General*, 2 August 2006.
- [23] European Committee for Standardization. *EN ISO 13363-2 + AC, Solar protection devices combined with glazing. Calculation of total solar energy transmittance and light transmittance. Part 2: Detailed calculation method.*, 24 February 2005.
- [24] European Committee for Standardization. *EN 15241:2007 Ventilation for buildings. Calculation methods for energy losses due to ventilation and infiltration in commercial buildings*, 26 March 2007.
- [25] European Committee for Standardization. *EN ISO 13790, Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling (ISO 13790:2008)*, 28 February 2008.
- [26] European Committee for Standardization. *EN ISO 10211:2007 Thermal bridges in building construction. Heat flows and surface temperatures. Detailed calculations*, 7 December 2007.
- [27] European Committee for Standardization. *EN ISO 13370:1998 Thermal performance of buildings. Heat transfer via the ground. Calculation methods*, 7 December 2007.
- [28] European Committee for Standardization. *EN ISO 6946 Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation method.*, 7 December 2007.
- [29] European Committee for Standardization. *EN ISO 10077-2:2007 Thermal performance of windows, doors, and shutters. Calculation of thermal transmittance. Part 2: Numerical method for frames*, 7 May 2003.
- [30] European Committee for Standardization. *EN ISO 14683:2007 Thermal bridges in building construction. Linear thermal transmittance. Simplified methods and default values*, 7 November 2007.
- [31] R. J. Goldstein, E. M. Sparrow, ja D. C. Jones. Natural convection mass transfer adjacent to horizontal plates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 16(5):1025–1035, 1973.
- [32] J. E. Hay ja J. A. Davies. Calculation of the solar radiation incident on an inclined surface. *Kirjassa Proceedings of the First Canadian Solar Radiation Data Workshop*, Toronto, Canada, 1980. Ministry of Supply and Services.
- [33] Robert H. Henninger ja Michael J. Witte. EnergyPlus testing with HERS BESTEST Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-2011. Tekninen raportti, GARD Analytics, October 2012.
- [34] S. A. Klein. Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, 19(4):325–329, 1977.
- [35] T. M. Klutcher. Evaluation models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, 23(2):111–114, 1979.

- [36] N.A. Kotey, M.R. Collins, ja J.L. Wright. Determining off-normal solar optical properties of drapery fabrics. *ASHRAE Transactions*, 115(2):3–17, 2009.
- [37] N.A. Kotey, M.R. Collins, ja J.L. Wright. Determining off-normal solar optical properties of insect screens. *ASHRAE Transactions*, 115(1):155–164, 2009.
- [38] N.A. Kotey, M.R. Collins, ja J.L. Wright. Determining off-normal solar optical properties of roller blinds. *ASHRAE Transactions*, 115(1):145–154, 2009.
- [39] N.A. Kotey, M.R. Collins, J.L. Wright, ja T. Jiang. A simplified method for calculating the effective solar optical properties of a venetian blind layer for building energy simulation. *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 131(2), 2009.
- [40] J. Kurnitski. Contrasting the principles of EP requirements and calculation methods in EU member states. *REHVA Journal*, 45(4):22–24 and 26–28, 2008.
- [41] Markku Lappalainen. *Energia- ja ekologiakäsikirja*. Rakennustieto, 2010.
- [42] Paolo Lenzuni, Daniela Freda, ja Michele Del Gaudio. Classification of thermal environments for comfort assesment. *The Annals of Occupational Hygiene*, 53(4):325–332, 2009.
- [43] D. L. Loveday ja A. H. Taki. Outside surface resistance: proposed new value for building design. *Building Services Research and Technology*, 19(1):23–29, 1998.
- [44] National Fenestration Rating Council Incorporated, 6305 Ivy Lane, Suite 140, Greenbelt, MD 20770, US. *NFRC 200A-2012 Procedur for Determining Fenestration Product Solar Heat Gain Coefficient and Visible Transmittance at Normal Incidence*, July 2013.
- [45] D.S. Parker, J.E.R. McIlvaine, S.F. Barkaszi, D.J. Beal, ja M.T. Anello. Laboratory testing of the reflectance properties of roofing materials. Tekninen raportti FSEC-CR-670-00, Florida Solar Energy Center, Cocoa, 2000.
- [46] R. Perez, R. Seals, P. Ineichen, R. Stewart, ja D. Menicucci. The development and verification of the Perez diffuse radiation model. Tekninen raportti SAND88-7030, Sandia National Laboratories, 1988.
- [47] D. T. Reindl, W. A. Beckman, ja J. A. Duffie. Evaluation of hourly tilted surface radiation models. *Solar Energy*, 45(1):9–17, 1990.
- [48] J. W. Spencer. Fourier series representation of the position of the sun. *Search*, 2(5):172, 1971.
- [49] D. M. Utzinger ja Klein S. A. A method of estimating monthly average solar radiation on shaded receivers. *Solar Energy*, 23(5):369–378, 1979.
- [50] Karsten Voss, Igor Sartori, ja Roberto Lollini. Nearly-zero, net zero and plus energy buildings - how definitions & regulations affect the solutions. *REHVA Journal*, 6:23–27, 2012.
- [51] Frank M. White. *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill International edition, 6. laitos, 2008.
- [52] J.L. Wright. Calculating centre-glass performance indices of glazing systems with shading devices. *ASHRAE transactions*, 114(2):199–209, 2008.
- [53] J.L. Wright, N. Y. T. Huang, ja M.R. Collins. Thermal resistance of a window with and enclosed venetian blind: A simplified model. *ASHRAE Transactions*, 114(1):471–482, 2008.
- [54] Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. *D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakenusten energiatehokkuus., Määräykset ja Ohjeet 2012.*

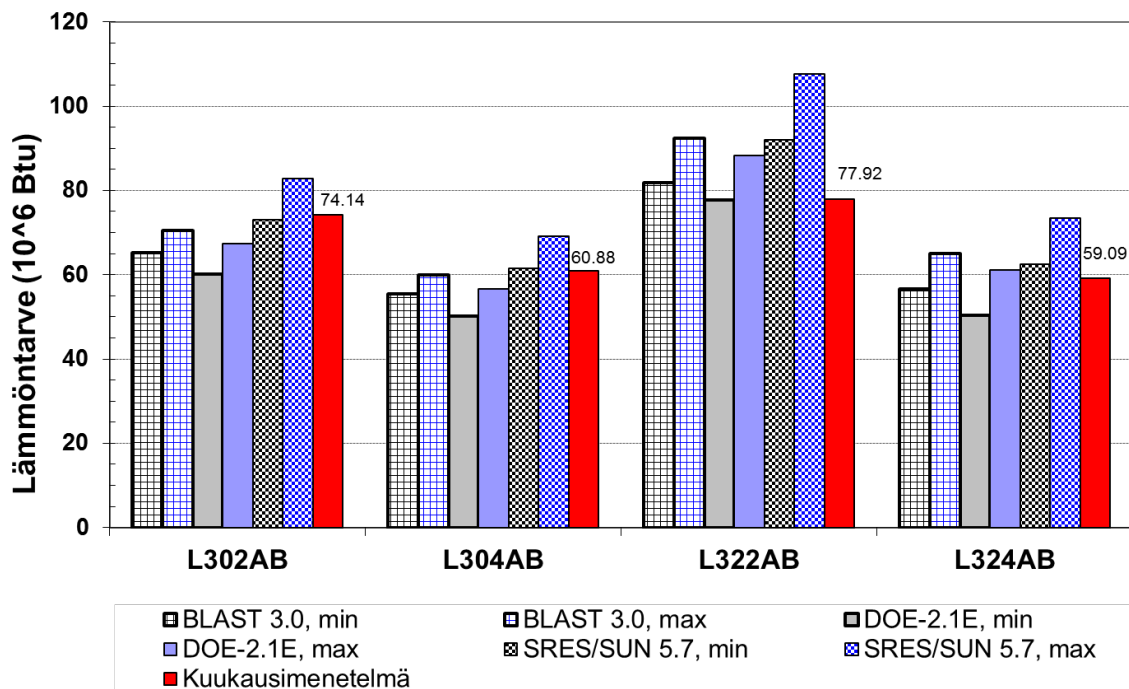
[55] Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. *D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta*, Ohjeet 2012.

Liitteet

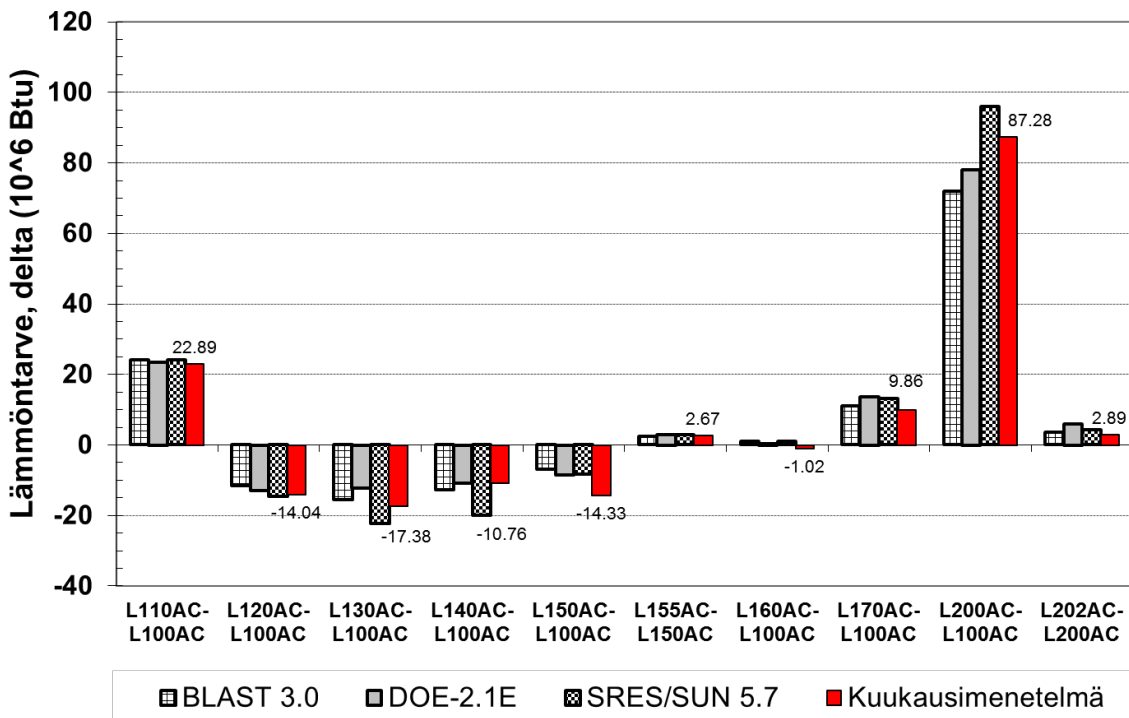
A ASHRAE 140-2011 luokan 2 tulokset



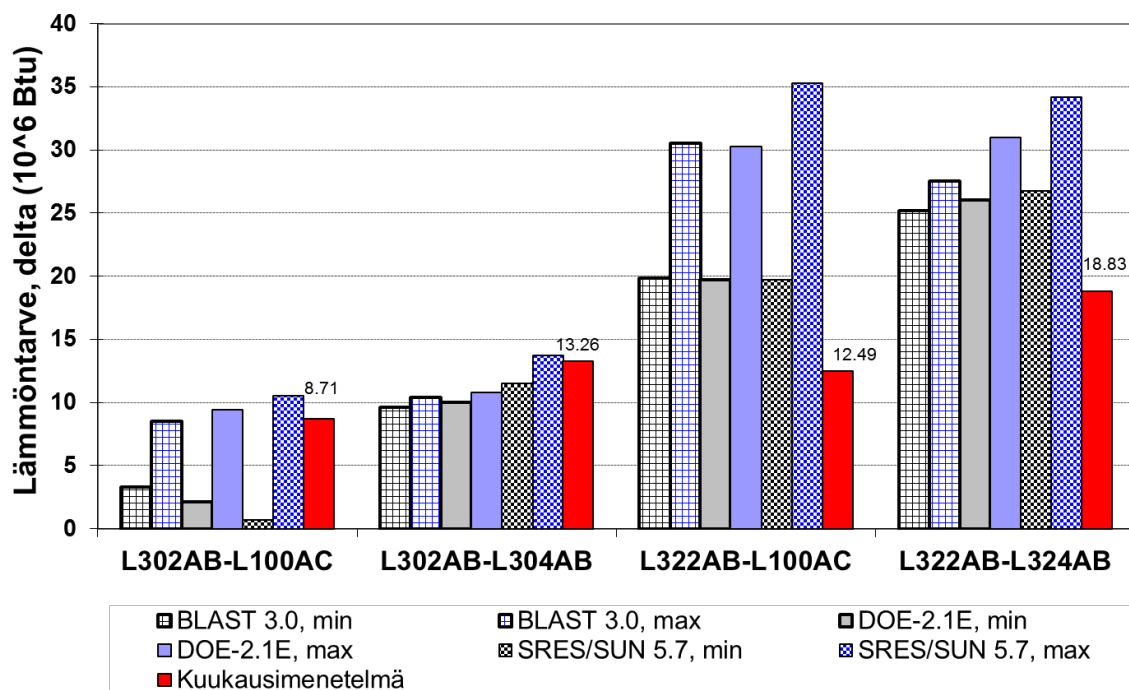
Kuva A.1: Lämmitysenergiantarve testitapauksille L100A – L202A. Tuloksista huomataan hyvä vastaavuus kuukausimenetelmän ja vertailuohjelmien välillä.



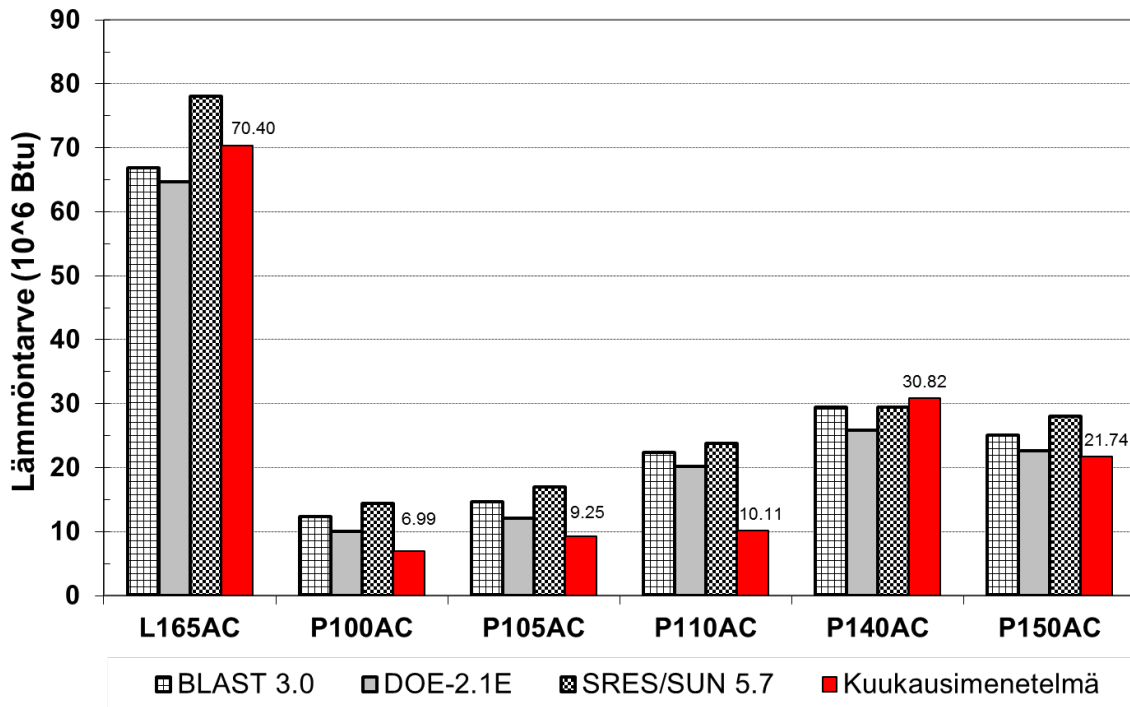
Kuva A.2: Lämmitysenergiatarve testitapauksille L302A – L324A. Tapauksille on annettu erilaisia vaihtoehtoisia mallintamistapoja, joten vertailuohjelmien näillä erilaisilla mallintamistavoilla antamien tuloksien maksimi- ja minimiarvo on merkitty kuvaan. Tuloksista huomataan hyvä vastaavuus kuukausimenetelmän ja vertailuohjelmien välillä.



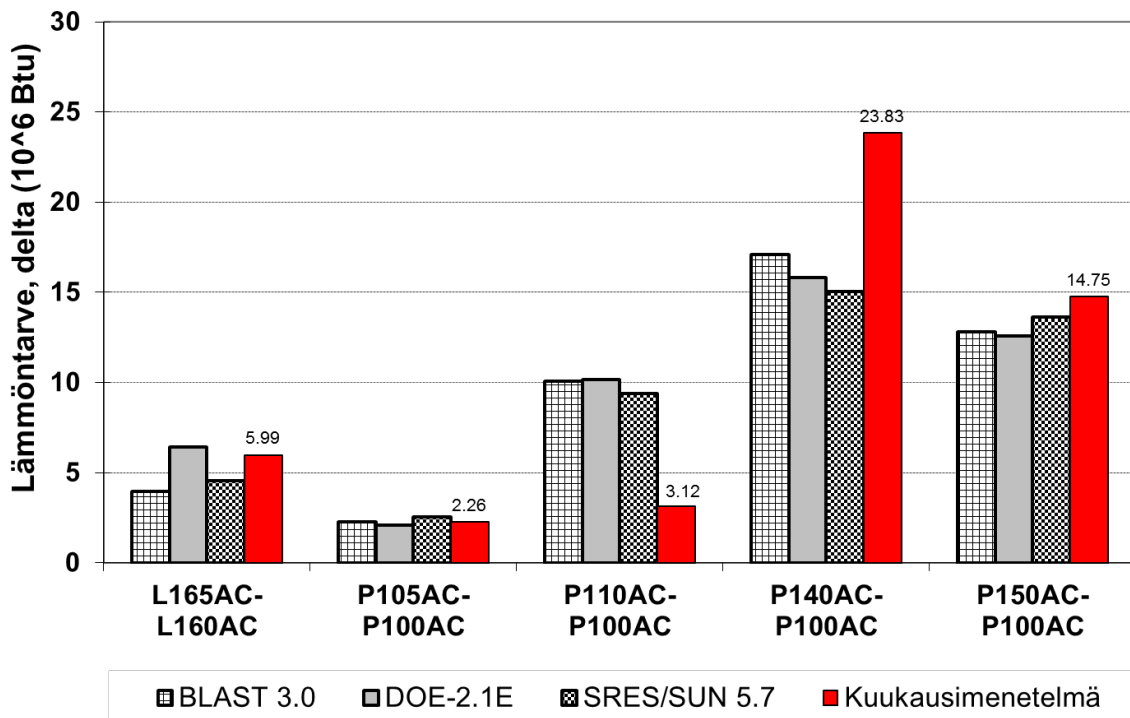
Kuva A.3: Lämmitysenergian tarve tarkasteltuna tapausten erotuksena eli deltatarkastelut. Tuloksista huomataan hyvä vastaavuus kuukausimenetelmän ja vertailuohjelmien välillä.



Kuva A.4: Lämmitysenergian tarve tarkasteltuna tapauksen erotuksena eli deltatarkastelut testitapauksille L302A – L324A. Tapauksille on annettu erilaisia vaihtoehtoisia mallintamistapoja, joten vertailuohjelmien näillä erilaisilla mallintamistavoilla antamien tuloksien maksimi- ja minimiarvo on merkitty kuvaan.



Kuva A.5: Lämmitysenergiantarve testitapauksille L165AC ja passiivitalosarjalle. Tapauksessa P110AC poikkeama joka ylittää ASHRAE 2011-140 liitteen B22 antaman sallitun vaihteluvälin. Lisäksi tapauksissa P100AC ja P105AC ovat merkittävät poikkeamat, jotka eivät kuitenkaan ylitä sallittua vaihteluväliä.



Kuva A.6: Lämmitysenergiantarve tarkasteltuna tapauksen erotuksena eli deltatarkastelut testitapaukselle L165A-L160A sekä passiivitalosarjalle. Tapauksissa P110AC-P100AC sekä P140AC-P100AC poikkeamat jotka ylittävät ASHRAE 2011-140 liitteen B22 antaman sallitun vaihteluvälin.