

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Talotekniikan koulutusohjelma

Konsta Karhapää

TP3 – Hiilineutraalisen kaupunkikorttelin konseptisuunnittelu
Kohti vähähiilistä rakentamista – Joensuu Wood City
kehittämishanke

Tarkastaja: Projektiasiantuntija, Mika Keskisalo

Raportti luotu: Elokuu 2019
Raportti tarkastettu ja hyväksytty: Joulukuu 2020

Sisältö

1	Johdanto	4
2	Lähtötiedot ja laskentamenetelmän kuvaus	5
2.1	Sää tiedot.....	5
2.2	Kohteen lähtötiedot.....	5
2.3	Ulkoseinärakenteet	10
2.3.1	Lähtötietoihin perustuva- sekä matalaenergiaulkoseinärakenne ..	10
2.3.2	Passiiviulkoseinärakenne.....	10
2.4	Yläpohjarakenteet.....	11
2.4.1	Lähtötietoihin perustuva- sekä matalaenergiayläpohjarakenne	11
2.4.2	Passiiviyliäpohjarakenne	12
2.5	Alapohjarakenteet.....	12
2.5.1	Lähtötietoihin perustuva alapohjarakenne	13
2.5.2	Matalaenergia-alapohjarakenne	13
2.5.3	Passiivialapohjarakenne	13
2.6	Lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät	14
2.7	Ilmanvaihto	16
2.8	Käyttöajat.....	17
2.9	Aurinkosuojaus	18
3	IDA ICE-mallin luominen.....	21
3.1	Alkutoimet	21
3.2	Vuotoilma ja kylmäsillat	26
3.3	Lisäenergia ja häviöt.....	27
3.4	Lämmönjakotavat ja huonelaitteet	29
3.5	Ilmanvaihtokoneen määrittäminen	31
3.6	Muita toimenpiteitä.....	31
4	Tulokset	32
4.1	Laskentapalvelut.fi tulokset.....	32
4.2	Yhteenveto energiankulutuksesta.....	37
4.3	Rakenteiden eroavaisuudet	37
4.4	IDA ICE tulokset	38
4.4.1	1. Simulaatio, lähtötiedoilla	40
4.4.2	2. Simulaatio, matalaenergia	42
4.4.3	2. Simulaation vertailu, ikkunapinta-ala	44
4.4.4	2. Simulaation vertailu, tuloilman lämpötila	45
5	Mahdolliset lämmönlähteet	45
5.1	Aurinkolämpö	46
5.2	Aurinko- ja tuulisähkö	48
5.3	Maalämpö	49
5.4	Kaukolämpö	50
5.5	Suora sähkölämmitys	51
6	Yhteenveto.....	53
6.1	Laskentapalvelut.fi laskurin soveltuvuus energialaskentaan.....	55
6.2	IDA ICE-ohjelman soveltuvuus energialaskentaan	55
7	Lähdeluettelo	57

Esipuhe

Kohti vähähiilistä rakentamista – Joensuu Wood City -projekti on mahdollistanut konkreettisen kehityskaaren Karelia-ammattikorkeakoulun organisaatiossa. Karelia on ensimmäisten ammattikorkeakoulujen joukossa ottanut rakennusten elinkaaren hiilijalanjäljenarvioinnin osaksi koulutustarjontaansa. Osana Karelia-ammattikorkeakoulun kehityskaarta on ollut projektissa olevan hiljaisen tiedon sekä osaamisen siirto tulevaisuuden ammattilaisille sekä tekijöille. Haluammekin kiittää projektissa oppimassa olleita Karelia ammattikorkeakoulun opiskelijoita.

Ensimmäisessä järjestetyssä opiskelijaharjoittelussa pääpaino oli energiatehokkuuden sekä simuloinnin oppien siirrossa, jossa talotekniikkapuolen harjoittelijana toimi Konsta Karhapää. Toisessa harjoittelujaksossa rakennusten hiilijalanjäljen arvioinnissa paneuduimme todellisen Nepenmäen koulun tietojen keräämiseen sekä arviointiin. Toisen vaiheen harjoittelijoina ympäristötekniikasta olivat mukana Atte Saastamoinen, Jesse Seila, Mikko Soikkeli, Reetta Suhonen ja Santeri Hakulinen.

Tämäkään kehittämisprojektin ei olisi ollut mahdollista ilman yhteistyökumppaneiden sitoutumista ja taloudellista tukea, joita haluan koko projektitiimin puolesta kiittää. Kohti vähähiilistä rakentamista -projektin päärahoituksesta on vastannut Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan EAKR-ohjelmasta. Lisäksi projektin yhteistyökumppaneina ja osarahoittajina ovat toimineet Business Joensuu Oy sekä Pohjois-Karjalan kunnista Joensuu, Kontiolahti, Nurmes, Lieksa, Kitee ja Tohmajärvi. Lisäksi kiitos projektin ohjausryhmän toimintaan osallistuneille aktiivisista ja rakentavista keskusteluista.

Joensuussa. 01.12.2020

Mika Keskisalo

Projektiasiantuntija

1 Johdanto

Raportin tavoitteena on tarkastella eri energiavaihtoehtojen sekä ostoenergian hiilijalanjälkeä ”Kohti vähähiilistä rakentamista – Joensuu Wood City” kehittämiss-hankkeen TP3 – Hiilineutraalisen kaupunkikorttelin konseptisuunnittelulle. Tar-kasteluun otetaan yksi kerrostalo korttelialueesta, jonka periaatteita sovelletaan muihin korttelin kohteisiin.

Energialaskenta tehdään käyttämällä D.O.F Tech Oy:n ja Saint-Gobain Finland Oy:n Laskentapalvelua (1) sekä Equa Simulation AB:n IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) simulointiohjelmistoa. Laskennan tavoitteena on selvittää eri-laisten suunnittelutoimenpiteiden ja ratkaisujen vaikutus rakennuksen energian-kulutukseen sekä sen kautta pienempään hiilijalanjälkeen.

Laskenta tehtiin lähtötietoihin perustuvaan laskentakohteeseen, ja tämän poh-jalta tehtiin yhteensä neljä laskentaa erilaisiin rakennustyyppeihin laskentapalve-lujen tarjoamalla energialaskurilla. Näistä kahteen tehtiin IDA ICE -ohjelmalla si-mulaatioita ja vertailtiin saatuja tuloksia. Tuloksien pohjalta pohdittiin, mitkä olisivat parhaita vaihtoehtoja energiasäästöjen saamiseksi.

Raportissa on käyty läpi energialaskentaa varten selvitettävien arvojen tietope-rusta lähteineen ja näiden käyttäminen energialaskennassa laskentapalvelujen energialaskurissa ja IDA ICE -simulointiohjelmassa.

Simuloinneissa ei oteta kantaa lämmönjakotapaan erityisesti, vaan kaikissa pe-rustapauksissa lämpöä jaettiin ”ideaalisesti”, kuitenkin kaikkien tapauksien osalta samoilla arvoilla. Luvussa 5 käydään läpi erilaisia lämmönlähteitä ja näiden käy-tön mahdollisuutta konseptikerrostalokohteessa. Tarkempia laskelmia eri läm-mönlähteistä ei ole sisällytetty tähän raporttiin.

2 Lähtötiedot ja laskentamenetelmän kuvaus

2.1 Sää tiedot

Suunnitteluvaihtoehtojen energialaskentojen vertailukelpoisuuden takia kaikki rakennukset käyttävät E-luvun sekä energiatodistuksen laskennassa säävyöhykettä 1 (Helsinki-Vantaa) Myös laskentapalvelut.fi:n käyttämä säädata perustuu lämpötilavyöhykkeen 1 (Helsinki-Vantaa) sää tietoihin laskettaessa E-lukua tai energiatodistusta (2). Sijaintipaikkakunta kuitenkin vaikuttaa tehontarpeen laskentaan sekä todellisen ostoenergian laskentaan. Konseptikerrostalolle on valittu vyöhyke 3 (Jyväskylä), jonka säävyöhyke alueella kohderakennus sijaitsee (3 s. 17).

IDA ICE: ssa tehdyissä laskelmissa on käytetty säävyöhykkeen 3 (Jyväskylä) testivuoden 2012 sää tiedostoa, joka sisältää tunnin tarkkuudella testivuoden sää datan. Sää datatiedostoon kuuluu ilman kuivalämpötila, ilman suhteellinen kosteus, tuulen suunta ja sen meteorologinen nopeus, auringon suora säteily sekä hajasäteily vaakasuoralle pinnalle.

2.2 Kohteen lähtötiedot

Konseptikerrostalokohde sijaitsee Joensuun Penttilänrannassa Pielisjoen rannalla. Kohteessa on betonirakenteinen kellari ja neljä maanpäällistä puurakenteista kerrosta, joista ensimmäisen maanpäällisen kerroksen lattia on betonirakenteinen. Suunnitelmien mukaan rakennus kuuluu paloluokkaan P2 (3-4 kerroksiset asuinkerrostalot). P2-luokan puurakenteisessa kerrostalossa on vaatimuksena sprinklausjärjestelmä, joka jätettiin kuitenkin huomioimatta energialaskennoissa sekä simulaatioissa.



Kuva 1. Arkkitehtikuva kohteesta. Kohderakennus keskellä.

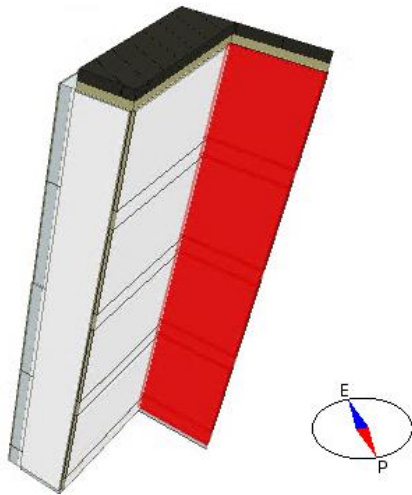
Laskelmat tehtiin neljälle eri rakennustyyppille, joista ensimmäinen oli Ympäristöministeriön asetuksen 1010/2017 mukaisten minimiarvojen mukainen puukerrostalo. Toisena tyyppinä oli kohteen suunniteltujen rakennetyyppien mukaan laskettu rakennus, joka täyttäisi vaaditut energiamääräykset. Kolmantena ja neljäntenä tyyppinä oli matalaenergia- ja passiivitalot, joiden syöttötiedot oli muokattu kohteen lähtötiedoista vastaamaan rakennustyyppille ominaisia raja-arvoja.

Suurimpana erona eri rakennusten toteutustapojen sekä vaihtoehtojen välillä oli ulkoseinän, ylä- ja alapohjan sekä ikkunoiden lämmöneristävyydet. Myös rakennuksen ilmanvuotolukua parannettiin siirryttäessä matalaenergisempään rakennustyyppiin. IV-koneen vuosihyötysuhdetta parannettiin myös vastaamaan kunkin rakennustyyppin energiamääräyksiä. Passiivikerrostalovaihtoehdossa jouduttiin myös eristämään lämpimän käyttövedenkierto päästäksemme asetettuun E-lukuun. Passiiviratkaisun käyttövedenkierron eristeeksi valittiin 0,5 D, joka tarkoittaa eristepaksuutena 50 % putken halkaisijasta. Lisäksi kaikissa skenaarioissa lämpimän käyttöveden kierto kulki suojaputkessa.

Lähtötietoina (ks. Taulukko 1. Sisäänsyöttötiedot

	Laskentapalvelut.fi	IDA ICE
Luokka	2	2
Sijainti	Vyöhyke III	Vyöhyke III
Kerros lkm	4	4
Rakennustilavuus	3416 m3	3115.6 m3
Ilmatilavuus	2237,3 m3	
Maanpäällinen kerrosala	1034,6 m2	1189,2 m2
Lämmitetty nettoala	860,5 m2	1189,2m2 (860,5 m2)
Lämpökapasiteetti	40 Wh/m2K	
Ulkopuolisen tilan lämpötila	16 °C	16 °C
Vaipan ala	1577,14 m2	1494,20 m2
Ulkoseinä ulkoilmaa vasten	1094,14 m2	750,70 m2 *Eriäinen laskutapa
Yläpohja ulkoilmaa vasten	236,3 m2	255,03 m2
Alapohja	244,7 m2	248,64 m2 (16,23 m2 2. krs ulokkeet)
Ikkunat (yhteensä)	252,7 m2	236,89 m2
Kylmäsiilat	10% muista häviöistä	

Laskennassa käytettiin rakennuksen mittasuhteille arkkitehtikuvissa annettuja arvoja, sekä kohteen CAD-kuvista laskettuja pinta-aloja käytettäessä Laskentapalvelut.fi energialaskentaa. Arvot poikkeavat IDA ICE:ssä käytetyistä arvoista johtuen mm. porras- ja hissikuilun puuttumisesta käytetyssä mallissa. Porras- ja hissikuilu jätettiin mallinnuksesta pois, koska näihin oli jäänyt IFC-mallista ulko-nevia seiniä (ks. Kuva 2), jotka eivät kuuluneet näihin vyöhykkeisiin. Tällöin ohjelma vääristi porras- ja hissikuilujen tuloksia, kuin myös osan ympäröivien tilojen tuloksista. IFC-mallista pystyisi luultavasti seinän katkaisemaan useampaan osaan, jotta tilaa voisi käyttää IDA ICE :ssa.



Kuva 2. Porraskuilun ulkoneva seinä IFC-mallissa

Taulukko 1. Sisäänsyöttötiedot

	Laskentapalvelut.fi	IDA ICE
Luokka	2	2
Sijainti	Vyöhyke III	Vyöhyke III
Kerros lkm	4	4
Rakennustilavuus	3416 m ³	3115.6 m ³
Ilmatilavuus	2237,3 m ³	
Maanpäällinen kerrosala	1034,6 m ²	1189,2 m ²
Lämmitetty nettoala	860,5 m ²	1189,2m ² (860,5 m ²)
Lämpökapasiteetti	40 Wh/m ² K	
Ulkopuolisen tilan lämpötila	16 °C	16 °C
Vaipan ala	1577,14 m ²	1494,20 m ²
Ulkoseinä ulkoilmaa vasten	1094,14 m ²	750,70 m ² *Erilainen laskutapa
Yläpohja ulkoilmaa vasten	236,3 m ²	255,03 m ²
Alapohja	244,7 m ²	248,64 m ² (16,23 m ² 2. krs ulokkeet)
Ikkunat (yhteensä)	252,7 m ²	236,89 m ²
Kylmäsiilat	10% muista häviöistä	

Kohteen lämmöneristävyydet erosivat toisistaan eri rakennustyyppien välillä. Alla olevassa taulukossa (Taulukko 2) on esitetty neljän eri rakennustyyppin U-arvot, joiden pohjalta laskennat on tehty. Minimiasetusten mukainen vaihtoehto on kuvattu vaihtoehto nollana, koska jälkimmäisissä laskelmissa se on jätetty

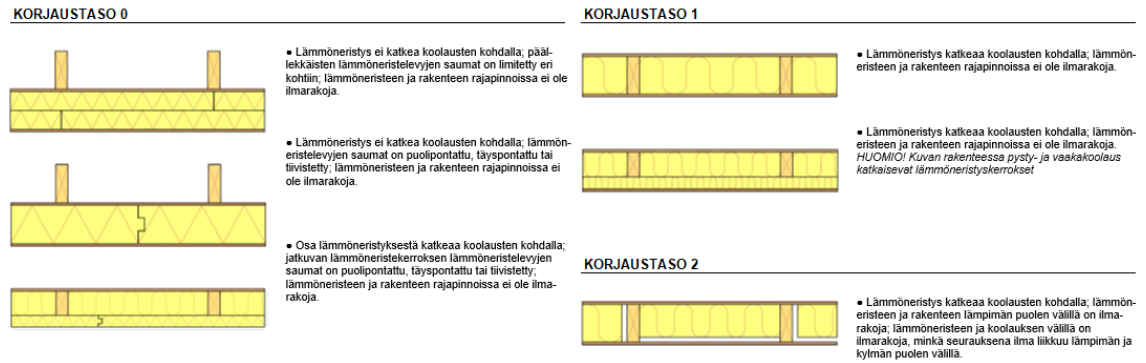
tarkasteluiden ulkopuolelle. Ikkunoiden U-arvot on esitetty kappaleessa 2.9 taulukoissa Taulukko 12 ja Taulukko 13.

Taulukko 2. Kohteen eri rakennustyyppien lämmönjohtavuudet

Rakennustyyppi	U-arvo, Ulkoseinä (W/m ² K)	U-arvo, Yläpohja ulkoilmaa vasten (W/m ² K)	U-arvo, Alapohja ulkoilmaa vasten (W/m ² K)	U-arvo, Alapohja maata- vasten (W/m ² K)
Minimiasetus Vaihtoehto 0	0,17	0,09	0,09	0,16
Kohteen lähtötiedot Vaihtoehto 1	0,12	0,08	-	0,16
Matalaenergia Vaihtoehto 2	0,12	0,08	0,08	0,12
Passiivi Vaihtoehto 3	0,10 (käytetty 0,08)	0,07	0,08	0,10

Seuraavissa alaluvuissa (2.3, 2.4 ja 2.5) tarkastellaan rakenteiden eroavaisuudet rakennusvaihtoehtojen välillä. Kohteen asetuksen mukainen minimiarvo jätettiin tarkastelun ulkopuolelle, koska se ei täyttänyt ominaislämpöhäviö vaatimuksia. Tarkasteltavaksi jäi kohteen lähtötietoihin perustuva rakennus, ja tämän pohjalta matalaenergia- ja passiivipuukerrostalo. U-arvot on laskettu Puuinfon U-arvolaskurilla (4). Laskurissa ei pystynyt muokkaamaan erikseen ulko- ja sisäpinnanvastusta (R_{se} ja R_{si}), vaan näiden arvot olivat aina samat. Tällä ei ollut isoa vaikutusta U-lukuun, mutta pieniä eroavaisuuksia oli havaittavissa varsinkin viedessä rakenteita IDA ICE-ohjelmaan.

Rakenteiden U-arvo laskuissa käytettiin SFS-EN ISO 6946 mukaista laskentamenetelmää. Kaikissa laskuissa ajateltiin ulkopuolen tuuletusraon olevan hyvin tuulettuva. Korjaustasot vaihtelivat rakenteittain. Korjaustaso kuvaa rakenteessa ilmaantuvia ilmarakoja, jotka saattavat heikentää eristystä. Alla olevassa kuvassa (Kuva 3) on esitetty eri tasojen kuvauksia. Korjaustasoista 0 on tiivein sekä eristetyin ja tasossa 2 esiintyy ilmarakoja ja on eristävydeltään tasoja 1 tai 0 heikompi.



Kuva 3. Eri korjaustasojen kuvaukset. (4)

2.3 Ulkoseinärakenteet

2.3.1 Lähtötietoihin perustuva- sekä matalaenergiaulkoseinärakenne

Ulkoseinärakenne on yhtenevä lähtötietoihin perustuvassa rakennuksessa sekä matalaenergiarakennuksessa. Seinän U-arvo oli 0,1210 W/ (m² K) ja korjaustaso 1. Kerros 4 sisältää koolauksen, jossa koolauspuun leveys 51 mm, tämän lämmönjohtavuus [λ] 0,12 W/ (m K) ja jako 600 mm.

Taulukko 3. Ulkoseinärakenne lähtötilanteessa sekä matalaenergiaratkaisussa

Puurakenteinen ulkoseinä	d [mm]	Λ [W/m K]	R [m ² K/W]
Sisäpinta		0,130	
1 Kipsilevy	13,0	0,230	0,0565
2 Kipsilevy	15,0	0,210	0,0714
3 Ilman- ja höyrynsulku	0,2	0,330	0,0006
4 Lämmöneriste kivivilla (sis. pystykoolauksen)	270,0	0,033	6,6840
5 Kipsilevy	9,0	0,210	0,0429
6 Tuulensuojaeriste	50,0	0,031	1,6129
Ulkopinta		0,130	

2.3.2 Passiiviulkoseinärakenne

Passiiviulkoseinärakenne muuttui alkuperäiseen suunnitteluratkaisuun lisälämmöneristuksen myötä. Alkuperäiseen rakenteeseen verrattuna kerros 2 muuttui kipsilevystä lämmöneristeeksi (villa), kerrokseen 4 tuli lisää eristettä +30 mm (11 %) sekä ulommaiseen (tuuleneriste) kerrokseen tuli eristettä lisää +25 mm (50 %).

%). Seinärakenteen korjaustasoksi tuli 0, eli vaatimukset rakentajalle kasvoivat. Ulkoseinärakenteen uudeksi U-arvoksi tuli 0,0843 W/ (m² K).

Taulukko 4. Ulkoseinärakenne passiiviratkaisussa

Puurakenteinen ulkoseinä		d [mm]	Λ [W/m K]	R [m ² K/W]
	Sisäpinta		0,130	
1	Kipsilevy	13,0	0,210	0,0619
2	Lämmöneriste (kivivilla) (sis. vaakakoolauksen)	50,0	0,033	1,2378
3	Ilman- ja höyrynsulku	0,2	0,330	0,0006
4	Lämmöneriste (sis. pystykoolauksen)	300,0	0,033	7,4267
5	Kipsilevy	9,0	0,210	0,0429
6	Tuulensuojaeriste	75,0	0,031	2,4194
	Ulkopinta		0,130	

2.4 Yläpohjarakenteet

2.4.1 Lähtötietoihin perustuva- sekä matalaenergiayläpohjarakenne

Lähtötietoihin perustuva yläpohjarakenne vastasi samaa kuin matalaenergiatalon yläpohjan vaatimus. Yläpohjan U-arvo oli 0,0767 W/ (m² K) korjaustasolla 0.

Taulukko 5. Yläpohjarakenne lähtötilanteessa sekä matalaenergiaratkaisussa

Puurakenteinen yläpohja		d [mm]	Λ [W/m K]	R [m ² K/W]
	Sisäpinta		0,100	
1	Kipsilevy	13,0	0,230	0,565
2	Lämmöneriste	32,0	0,200	0,1600
3	Ilman- ja höyrynsulku	0,2	0,330	0,0006
4	OSB-levy	12,0	0,130	0,0923
5	Lämmöneriste kivivilla (sis. koolauksen)	200,0	0,035	5,0230
6	Lämmöneriste (puhallusvilla)	300,0	0,041	7,3171
	Ulkopinta		0,100	

2.4.2 Passiiviyläpohjarakenne

Yläpohjarakenne passiiviratkaisussa ei eronnut edellisestä rakenteesta merkittävästi. Ainoana erona matalaenergiaratkaisuun oli, että yläpohjaan oli puhallettu +50 mm (17%) lisää puhallusvillaa. Tällöin puhallusvillan lämmönvastus muuttui arvoon $R = 8,5366 \text{ m}^2\text{K/W}$ ja rakenteen U-arvo $0,0701 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$:iin.

2.5 Alapohjarakenteet

Alapohjan rakenteet toteutettiin maanvaraisina kaikkiin kohteisiin. Rakennusmateriaalina betoni sekä alapuolinen lämmöneristys. IDA ICE tunnisti rakennuksen koron IFC-tiedostosta, ja nosti rakennuksen 77,0 metriin. Jos alapohjan olisi tehnyt ulkoilman vastaisena, olisi tulokset vääristynyt ilmantilan ollessa käytännössä rajaton, vaikka todellisuudessa tuulettuvaa ilmatilaa rakennuksen alla olisi ollut todella vähän. Ilmeisesti siis ohjelma määrittä maanpinnan olevan korossa 0,00. Ohjelmalle olisi mahdollista tuoda geodatana mm. maanpinnan korkeus ja muodot, mutta nämä jätettiin tarkastelun ulkopuolelle. IDA ICE tunnisti kellarikerroksen lattiarakenteen alapohjana, mutta tuloksissa näytti edelleen rakenteen olevan ulkoilman vastainen. U-arvo kuitenkin näytti maanvastaiselta, kuten tarkoituksena oli. Kaikki alapohjarakenteet oletettiin tehtävän korjaustaso 0:n mukaan.

2.5.1 Lähtötietoihin perustuva alapohjarakenne

Alkutilanteen suunnitteluratkaisussa alapohjarakenteen U-arvo oli 0,1634 W/ (m² K).

Taulukko 6. Alapohjarakenne lähtötiedoilla

Betonirakenteinen alapohja		d [mm]	Λ [W/m K]	R [m ² K/W]
	Sisäpinta		0,170	
1	Pintavalu, betoni	80,0	1,700	0,0471
2	EPS100	200,0	0,036	5,5556
3	Teräsbetonilaatta	300,0	1,700	0,1765
4	Oletus maa-aines	Vaihteli		
	Ulkopinta		0,170	

2.5.2 Matalaenergia-alapohjarakenne

Edelliseen verrattuna EPS100 eristettä (kerros 2.) lisättiin +50,0 mm (25 %), muilta osin rakenne pysyi samana. EPS eristyksen lämmönvastus muuttui 8,0645 m²K/W:iin. Uudeksi U-arvoksi alapohjalle tuli tällöin 0,1159 W/ (m² K).

2.5.3 Passiivialapohjarakenne

Passiiviratkaisussa EPS100-levyjen kokonaispaksuus kasvoi alkuperäiseen suunnitteluratkaisuun verrattuna. Paksuutta kerrokselle tuli yhteensä +100,00 mm (50 %). Uudeksi U-arvoksi tuli 0,0976 W/ (m²K).

Taulukko 7. Alapohjarakenne passiiviratkaisussa

Betonirakenteinen alapohja		d [mm]	Λ [W/m K]	R [m ² K/W]
	Sisäpinta		0,170	
1	Pintavalu, betoni	80,0	1,700	0,0471
2	EPS100	300,0	0,036	9,6774
3	Teräsbetonilaatta	300,0	1,700	0,1765
4	Oletus maa-aines	Vaihteli		
	Ulkopinta		0,170	

2.6 Lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät

Laskentapalvelun energialaskurin ja IDA ICE:n simulaation lämmitysmuotona käytettiin molemmissa kaukolämpöä tilojen lämmitykseen ja lämpimän käyttöveden valmistukseen. Sähköä käytettiin ilmanvaihdon lämmityspatterin lämmitykseen sekä IV:n ja lämpimän käyttöveden valmistuksen apulaitteille. IDA:n simulaatiossa myös märkätilojen lattialämmitys sekä jäähdytys hoidettiin sähköllä.

Lämmönjako hoidettiin molemmissa ohjelmissa ilmanvaihtolämmityksenä, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia toistensa kanssa. IDA ICE:n oletuksena käyttämät ideaalilämmittimet ja jäähdyttimet toimivat tarkoitukseensa nähden loistavasti selvittääkseen rakennuksen lämmitys- sekä jäähdytystarpeen. Tarkennetussa arvioinnissa lämmönjakotapa pitäisi huomioida laajemmin. Laskentapalveluun määritettiin märkätilojen sähkölattialämmityksen osuudeksi 20 %.

Ympäristöministeriön asetuksen uuden rakennuksen energiatehokkuudesta mukaan valittiin lämmitysrajaksi 21 °C, ja jäähdytysrajaksi 27 °C. Ulkoilmavirtana oli 0,5 dm³/ (s m²) (3 s. 6).

Simuloinnit pitäen kaikki ovet kiinni aiheuttivat varsinkin vessoissa sekä pesuhuoneissa haitallisen korkeita sisälämpötiloja kesäisin. Simulointia kokeiltiin avaamalla kaikki ovet, jolloin lämpötilat tiloissa, joissa ei ollut jäähdytysmahdollisuutta tippuivat huomattavasti.

Tästä päätellen kylpyhuoneet ja WC-tilat eivät saaneet tarpeeksi korvausilmaa muista tiloista. Ongelman saisi ratkaistua kasvattamalla ovirakojen kokoa tai laittamalla seiiniin siirtoilmaventtiilit. Pelkän oviraon kasvattaminen ei välttämättä riitä, ainakaan kasvattamatta rakoa suhteettoman suureksi.

Ilmavirtojen tehostaminen ei vaikuttanut merkittävästi tai lähes lainkaan märkätilojen yllälämpenemisen ehkäisyyn, koska ilmaa ei päässyt virtaamaan tarpeeksi tiloihin, joihin sitä olisi tarvittu. Simulaatioissa jätettiin loppujen lopuksi osa

märkätilojen ovista raolleen, joka mahdollisti ilman riittävän siirtymisen. Energia-laskennoissa yleensä jätetään kuitenkin vessojen ja pesuhuoneiden ovet kiinni. Ovien auki jättäminen perustui olettamukseen, että riittävän siirtoilman saaminen turvattaisiin toisin keinoin todellisuudessa, kuten vaikka em. siirtoilmaventtiilein.

Käyttöveden lämmitykseen käytettiin kaukolämmitystä, joten varaajaa ei tarvita. Kiertojohto käyttövedelle täytyy kohteeseen määrittää, jotta veden odotusaika-vaatimus täyttyy, eikä vettä kulu liikaa odotettaessa lämmintä käyttövettä. Ase-tuksen mukaan lämminvesilaitteistossa olevan veden lämpötilan on oltava vähin-tään + 55 °C ja sitä on saatava lämminvesikalusteesta 20 sekunnin kuluessa (5 s. 3). Lämpimän käyttöveden kierron lämpöhäviö lasketaan kaavalla 1.

$$Q_{lkv,kierto} = (Q_{lkv,kiethäviö,omin} * L_{lkv} + \phi_{lkv,lamm,omin} * n_{lammlaite}) * \frac{t_{lkv,pump} * 365}{1000}$$

Kaava 1.

missä

$Q_{lkv,kierto}$	lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviö, kWh/a
$\Phi_{lkv,kiethäviö,omin}$	lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviön ominaisteho, W/m
L_{lkv}	lämpimän käyttöveden kiertojohdon pituus, m
$\Phi_{lkv,lamm,omin}$	lämpimän käyttöveden kiertojohtoon kytkettyjen lämmityslaitteitten ominaisteho, W/kpl
$n_{lammlaite}$	lämpimän käyttöveden kiertojohtoon kytkettyjen lämmityslaitteitten lukumäärä, kpl
$t_{lkv,pump}$	lämpimän käyttöveden kiertojohdon pumpun käyttö-aika, h/vrk

Kiertojohdossa ei oletettu olevan lämmityslaitteita, joten $\phi_{lkv,lamm,omin}$ sekä $n_{lammlaite}$ arvot ovat nolla. Pumpun käyttöaikana käytettiin arvoa 24 h/vrk. Lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviö laskettiin putkipituuden ja vakiolämpöhäviön avulla.

Lämpöhäviön ominaistehon ($Q_{lkv, kiethäviö, omin}$) ohjearvona käytetään yleensä 40 W/m, mutta kohteessa oletettiin kiertojohtoon kulkevan suojaputkessa, jolloin arvona on 15 W/m. Passiivivaihtoehtossa arvona käytettiin 8 W/m, koska kiertojohtoon ajateltiin olevan suojaputkessa sekä eristetty (0,5 D). Tarkkaa tietoa kiertojohtoon pituudesta (L_{lkv}) ei ole, joten sen laskeminen tapahtuu käyttämällä kiertojohtoon ominaispituutta 0,2 m/m² asuinkerrostalossa. (6 s. 46).

Käyttöveden siirron hyötysuhteeksi määritettiin ”Energiatehokkuus opas” taulukon 5. mukaan 0,97. Käyttöveden kiertojohtoon ominaistehoksi määritettiin 0,002 kW/m², koska kiertojohtoon ei ole liitetty kuivauspattereita.

Kierron laskettu lämpöhäviö oli lähtötietoihin perustuvassa sekä matalaenergia rakennuksessa n. 25600 kWh/a ja passiivirakennuksessa 12060 kWh/a.

2.7 Ilmanvaihto

Rakennuksessa käytettiin LTO:lla varustettua koneellista tulo- ja poistoilmanvaihdonkonetta. LTO:n vuosihyötysuhde vaihteli rakennuksen tyypin mukaan. Myös ilmanvuotolukua muutettiin rakennustyyppille ominaisiin arvoihin (kts. Taulukko 8.) (7). Tuloilman lämpötilan asetusarvona käytettiin IDA ICE :n oletusarvoa +16 °C. Ilman lämpötilan nousu asetettiin myös IDA ICE :n arvoon +1 °C. LTO :n lämpötilasuhteen määritettiin olevan kaikissa laskelmissa 60 %.

Taulukko 8. Ilman- ja vuotoilmanvaihdon tunnusluvut

	LTO:n Vuosihyötysuhde	Ilmanvuotoluku q_{50}
Minimiasetus	55 %	4.0 ($n_{50} = 3.27$)
Kohteen lähtötiedot	55 %	2.0 ($n_{50} = 1.64$)
Matalaenergia	75 %	1.0 ($n_{50} = 0.82$)
Passiivi	80 %	0.73 ($n_{50} = 0.6$)

Rakennuksen ilmanvaihdon muita tietoja, eriteltynä laskentapalvelun laskurin ja IDA ICE -ohjelman laskemiin arvoihin on alla olevassa taulukossa 9. Tulo- ja

poistoilmavirran suhde on yleensä noin 0,90 – 0,95, jolloin rakennus on lievästi alipaineinen. Liiallinen paine-ero voi olla kuitenkin haitaksi rakennukselle. Suhdetta käytetään tehontarpeiden sekä todenmukaisen ostoenergian laskennassa. Dynaamiset laskumenetelmät ottavat huomioon paine-eron E-lukulaskelmassa, mutta mm. laskentapalvelujen laskuri käyttää tulo- ja poistoilmansuhteena kerrointa 1,0.

Taulukko 9. Ilmanvaihdon ilmavirrat

	Laskentapalvelut.fi	IDA ICE
Poistoilman suunnitteluarvo	512 l/s	594,9 l/s
- m ³ /s	0,43 / 0,43 m ³ /s	0,552 / 0,595
Tuloilman suhde poistoilmaan	0.98 *1.00 laskelmassa	0.928

Kohteen ilmamäärät on suunniteltu täyttämään ympäristöministeriön sisäilmasto-
luokituksen vuoden 2018 asetusarvot. Oleskelutiloissa ulkoilmavirraksi on mitoit-
tettu vähintään 6 dm³/s henkilöä kohden suunniteltuna käyttöaikana, ja asuin-
huoneiston ulkoilmavirta on vähintään 18 dm³/s. Koko rakennuksen ulkoilmavirta
ylittää minimivaatimuksen 0,35 dm³/ (s m²). (8 s. 4)

2.8 Käyttöajat

Rakennuksen käyttöaika on 24 tuntia jokaisena viikonpäivänä luokan 2 raken-
nukselle. Käyttöaste valaistukselle on 0,1 ja muille kuormille 0,6. Sisäiset lämpö-
kuormat lämmitettyä nettoalaa kohti ovat kohteelle seuraavat (3 s. 7):

- Valaistus 9 W/m²
- Kuluttajalaitteet 4 W/m²
- Ihmiset 3 W/m²

Valaistuksen, kuluttajalaitteiden ja ihmisten aiheuttama vuotuinen lämpökuorma
Q (kWh/m²) on laskettava kaavalla 2.

$$Q = k * P * \frac{\tau_d}{24} * \frac{\tau_w}{7} * \frac{8760}{1000}$$

Kaava 2.

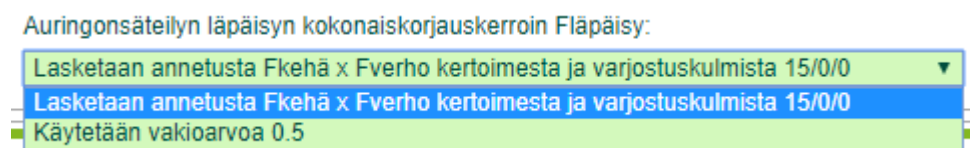
missä

k	keskimääräinen valaistuksen ja kuluttajalaitteiden käyttöaste sekä ihmisten läsnäolo rakennuksen käyttöajan aikana;
P	lämpökuorma W/m ²
T _d	rakennuksen käyttötuntien määrä vuorokaudessa
T _w	rakennuksen käyttöpäivien lukumäärä viikossa

IDA ICE :n matalaenergia mallissa kokeiltiin muokata kuormia vastaamaan paremmin todellista käyttötilannetta mm.rakennuksen porrastiloissa ja kellarissa laskettiin oletettua kuormaa henkilöistä, ja vähennettiin laitteiden kuormia ko. tiloissa.

2.9 Aurinkosuojaus

Huomattavaa Laskentapalvelun energialaskurin käytössä oli, että laskuri ei ottanut huomioon mahdollista ylälämpenemistä ja laskurissa ei ollut valmiuksia laskea jäähdytystarpeita. Jäähdytystarpeiden laskenta edellyttääkin dynaamista laskentamenetelmää. Jäähdytystarpeita laskettaessa ohjelman täytyy pystyä ottamaan huomioon jäähdytysjärjestelmän lämpö- ja sähköenergiantarpeen ja jonka lämmönsiirron laskenta ottaa huomioon rakenteiden lämmönvarausominaisuuden ajasta riippuvaisena enintään tunnin aika-askeleella (3). Energialaskuri ei myöskään mahdollistanut erilaisten auringonsuojausmenetelmien käyttöä erityyppisten lasitusten lisäksi (ks. Kuva 4).



Kuva 4. Laskentapalvelut.fi energialaskurin yksinkertainen auringonsäteilyn kokonaiskorjauskertoimen määrittäminen

Lasitus määritetään laskentapalvelussa g -arvon, $F_{kehä}$ ja F_{verho} kertoimien sekä lasin U -arvon (W/m^2K) avulla. Ympäristöministeriön ohjeen rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehon laskenta mukaan em. kertoimien määrittäminen tapahtuu kaavan 3 mukaisesti (6 s. 33). Mikäli ikkunan valoaukon auringon kokonaissäteilyn läpäisykerrointa (g) ei tunneta, se lasketaan kaavalla (Kaava 3).

$$g = 0,9 * g_{kohtisuora}$$

Kaava 3.

missä

g	ikkunan valo aukon auringon kokonaissäteilyn läpäisykerroin
$g_{kohtisuora}$	ikkunan valo aukon kohtisuoran auringonsäteilyn kokonaisläpäisykerroin

Alla olevassa taulukossa (Taulukko 10) lueteltuna erilaisten ikkunatyyppejen $g_{kohtisuora}$ arvoja.

Taulukko 10. Eri ikkunatyyppejen $g_{kohtisuora}$ arvoja (6 s. 33)

Lasitus	$g_{kohtisuora}$
Yksinkertainen lasitus	0,85
Kaksinkertainen lasitus	0,75
Yksipuitteinen, kolmilasinen ikkuna	0,70
Eristyslasi + erillislasi	0,65
Eristyslasi, matalaemissiviteettipinnoite + erillislasi	0,55

Kehäkerroin $F_{kehä}$ kuvaa valoaukon pinta-alan ja ikkunapinta-aukon pinta-alan suhdetta, ja lasketaan kaavalla 4.

$$F_{kehä} = \frac{A_{ikkuna, valoaukko}}{A_{ikkuna}}$$

Kaava 4.

missä

$F_{\text{kehä}}$	kehäkerroin
$A_{\text{ikkuna, valoaukko}}$	ikkunan valoaukon pinta-ala, m^2
A_{ikkuna}	ikkuna-aukon pinta-ala (kehys- ja karmirakenteineen), m^2

Kehäkertoimena voi kuitenkin käyttää arvoa 0,75, jos tarkempaa arvoa ole käytettävissä. F_{verho} kertoimelle valitaan verhokerroin auringonsuojaratkaisun perusteella. Alla olevassa taulukossa (Taulukko 11) esitetään tyypillisiä verhokertoimen arvoja.

Taulukko 11. Verhokertoimia F_{verho} auringonsuojille. (6 s. 34)]

Auringonsuojaratkaisu	Verhokerroin
Ei verhoa	1,00
Verhot	0,75
Valkoiset sälekaihtimet lasien välissä	0,30
Valkoiset sälekaihtimet sisäpuolella	0,60
Ikkunaluukut (säleikkö) ulkopuolella	0,30

Laskentapalvelun energialaskuria käyttäessä kohteeseen valittiin kaksinkertainen lasitus, jolloin g-arvoksi muodostui 0,675. Ikkunoiden suojaratkaisuksi valittiin verhot, jolloin verhokerroin oli 0,75. Kehäkertoimelle valittiin arvo 0,75, koska tarkempaa arvoa ei ollut tiedossa. Em. arvot pysyivät samoina rakennustyyppistä riippumatta, mutta ikkunoiden U-arvo vaihteli seuraavasti (Taulukko 12.)

Taulukko 12. Eri rakennustyyppien ikkunoiden U-arvot

Rakennustyyppi	U-arvo ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
Asetuksen minimiarvot	1,00
Kohteen lähtötiedot	0,909
Matalaenergia	0,8
Passiivi	0,7

IDA ICE -ohjelmassa ikkunoiden arvot määritettiin eri tavalla kuin laskentapalveluun syötetyissä, ja matalaenergia sekä passiiviratkaisuissa käytettiin samanlaisia ikkunoita. Käytettyjen ikkunoiden arvot seuraavassa taulukossa (Taulukko

13). Ikkunatyypit 1 kuvaa lähtötiedoissa käytettyä ikkunaa ja tyyppi 2 matala-energia- sekä passiiviratkaisussa käytettyä. Kehäkertoimen arvo pidettiin samana laskentapalvelun arvon kanssa (0,75).

Taulukko 13. IDA ICE käytetyt ikkunatyypit.

	Tyyppi 1	Tyyppi 2
U-arvo	0,909	0,726
g-arvo	0,523	0,336
Tvis-arvo	0,71	0,671

IDA ICE:n kaikissa simuloinneissa käytettiin hyväksi viereisten rakennusten sekä parvekkeiden varjostuksia (ks. Kuva 6). Parvekkeiden mallinnus käyttöliittymässä on todella yksinkertaistettua, jos parvekkeet lisätään suoraan julkisivuun.

3 IDA ICE-mallin luominen

3.1 Alkutoimet

IDA ICE -ohjelman ensimmäisellä välilehdellä eli yleislomakkeella on useita kohtia, joihin laskettuja arvoja voidaan syöttää. Ensimmäisenä valitaan järjestelmäparametri ikkunan ”Finnish” -välilehdeltä rakennuksen käyttötarkoituusluokka, ja asetetaan jäähdytysraja. Kohde kuuluu käyttötarkoituusluokaltaan luokkaan 2 (asuinkerrostalot, joissa asuinkerroksia vähintään 3. kerroksessa). Jäähdytysraja luokalla 2 on 27 °C.

Sijainti, säätietojen sekä tuuliprofiilin määrittäminen tapahtuu yleislomakkeella. Säätietoiksi valittiin Jyväskylän testi vuoden 2012 säätiedot (vyöhyke 3). Sijainti muuttui automaattisesti Jyväskyläksi, josta muokattiin koordinaatit sekä korkeus merenpinnasta (9). Tuuliprofiilina käytettiin alustavasti normaalia kaupunkiympäristöä vastaavaa profiilia. Rakennuksen sijainnin takia joen rannalla voisi olla perusteltavaa käyttää myös meren rannalla sopivaa tuuliprofiilia, jollei sopivampaa profiilia löydy.

Oletusarvot-ikkunassa rakenteille pystyy antamaan oletusarvot, joiden pohjalta IDA ICE asettaa rakenteet eri vyöhykkeille. Näitä muokkaamalla kaikki rakenteet, joille kyseinen tyyppi on asetettu, päivittyvät uuteen rakenteeseen. Samassa ikkunassa syötetään myös tuotannon hyötysuhteet energiamuodoittain (ks. Kuva 5).

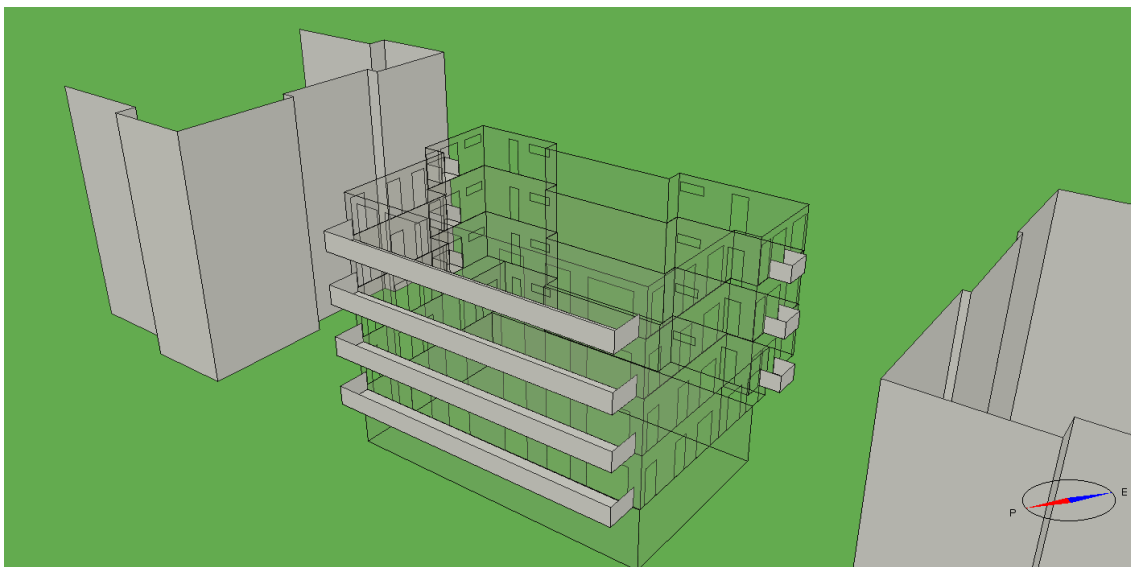
Tuotannon hyötysuhde

	Electric	Fuel	District
Lämmitys	Oletus energiamuoto ☐ COP 1	☐ 0.9	☒ 0.97
Jäähdytys	Oletus energiamuoto ☒ COP (EER) 3	☐ 1	☐ 1
Lämmin käyttövesi	Oletus energiamuoto ☐ COP 1	☐ 0.9	☒ 0.97

Kuva 5. Tuotannon hyötysuhteet energiamuodoittain

Kohteesta valmiiksi tehty IFC-muotoinen kuva tuotiin ohjelmaan, joka sisälsi tilojen jakauksen ja vaipan tietoja. Ohjelma loi automaattisesti oletusarvoisen vaipan rakennukselle, joskaan se ei vastannut todellisuutta. Rakennuksen vaippa piti luoda manuaalisesti ulkoseinän sisäpintaa pitkin. Rakennuksen kellarikerros sekä ensimmäinen kerros poikkesivat kolmesta ylimmästä kerroksesta, joten parhaana tapana oli tehdä rakennuksen vaipan tiedot kerroksittain. (ks. Kuva 6)

Rakennukselle pystyi luomaan varjostuksia, kuten ympäröiviä rakennuksia tai parvekkeita. Ympäröivät rakennukset oli helpoin lisätä IDA:n yleislomakkeen kautta ikkunasta "Varjostukset". Parvekkeet tuotiin suoraan rakennuksen vaippaan 3-D näkymässä. Parvekkeiden määrittäminen oli hyvin pelkistettyä, eikä rakenteelle pystynyt antamaan mm. U-arvoja tai paksuutta. Syötettäviä tietoja oli parvekkeen korkeus, syvyys, leveys ja sijainti rakennuksen vaipassa (kerroksessa). Kuvassa alla (Kuva 6) on esitetty tehdyt parvekkeet, sekä ympäröivät rakennukset.



Kuva 6. Rakennuksen vaippa kerroksittain 3-D näkymässä. Kuvassa näkyvissä myös ulkopuolinen auringon suojaus harmaana.

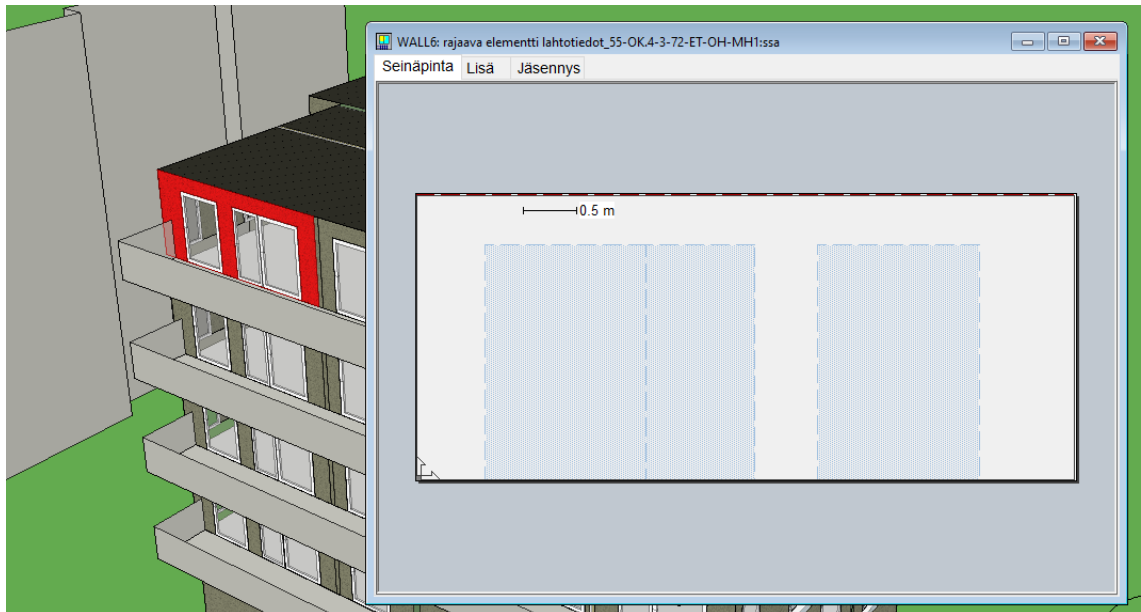
Kun rakennuksen vaippa oli määritetty, IFC-mallin tiloista luotiin vyöhykkeitä. Simulointiaikojen lyhentämiseksi vierekkäiset märkätilat, kuten vessat ja pesuhuoneet yhdistettiin samoiksi vyöhykkeiksi käyttämällä "merge zones" toimintoa. Isot väliseinättömät tilat kuten yhdistetty olohuone, keittotila ja ruokailutila tai alkovi pidettiin yhtenäisenä vyöhykkeenä. Tiettyjä väliseiniä tilojen yhdistelyssä jäi pois, mutta näillä ei ollut käytännön merkitystä mm. lämmitystehojen tai ilmavirtojen siirtymisessä. (ks. Kuva 7.) Vyöhykkeitä yhdisteltiin myöhemmin vielä lisää, jota käsitelty tarkemmin simulointituloksissa.

Kellarikerroksen vyöhykkeet eivät ole suoraan siirtoilman kautta yhteydessä toisiinsa. Kellarikerros on erikoisempi kerros verrattuna muihin, koska koko kerroksessa ei ole ikkunoita. Ikkunoiden puutteesta johtuen kerroksessa ei hyödynnetä auringosta saatavaa ilmaisenergiaa suoraan.



Kuva 7. Vyöhykejako verrattuna kohteen pohjakuviin.

Julkisivujen ikkunat olivat IFC-tiedostossa liitettyinä tilojen tietoihin, eivätkä ns. rakennuksen vaipan tietoihin. Tästä johtuen ensimmäisessä simulaatioissa auringon säteilyä ei tullut ikkunoista ollenkaan. Säteily pysähtyi rakennuksen vaippaan, jonka takana ikkunat olivat. Ongelman korjaamiseksi ikkunatiedot täytyi lisätä rakennuksen vaippaan, ja poistaa ikkunatiedot vyöhykkeiden (tilojen) seinistä. Rakennuksen vaippaan yhteydessä olevat vyöhykkeet tunnistavat ikkunat ja ovet vaipan tiedoista, ja lisäävät vyöhykkeiden seinille ns. aukkovarauksen (ks. Kuva 8).



Kuva 8. Rakennuksessa olevien aukkojen tunnistus vyöhykkeille. Seinäpinta kuvattu vyöhykkeen sisäpuolelta.

Ohjelman pinta-alojen ja tilavuuksien laskentatapa poikkesi laskentapalveluissa käytetystä. Neliöpohjainen laskenta oli määritetty kuitenkin asetetussa ohjeessa 1010/17 kohdan 1.2.2 mukaisesti "sisäseinien kanssa". Kylmäsiilat määritettiin kokonaissisämittojen perusteella projektin "jäsennys" välilehdellä. (ks. Kuva 9 ja Kuva 10)

☒ Vaipan alan määrittäminen	Kokonaissisämitat
☒ Pinta-alan määrittäminen neliöpohjaisiin tulostuksiin	Sisäseinien kanssa

Kuva 9. Jäsennys-välilehden vaihdetut asetukset.

3.2 Vuotoilma ja kylmäsillat

Kohteen ilmavuotovirta laskettiin kaavalla 5. (3 s. 9)

$$q_v = \frac{q_{50}}{x} * A_{vaippa} \quad \text{Kaava 5.}$$

missä

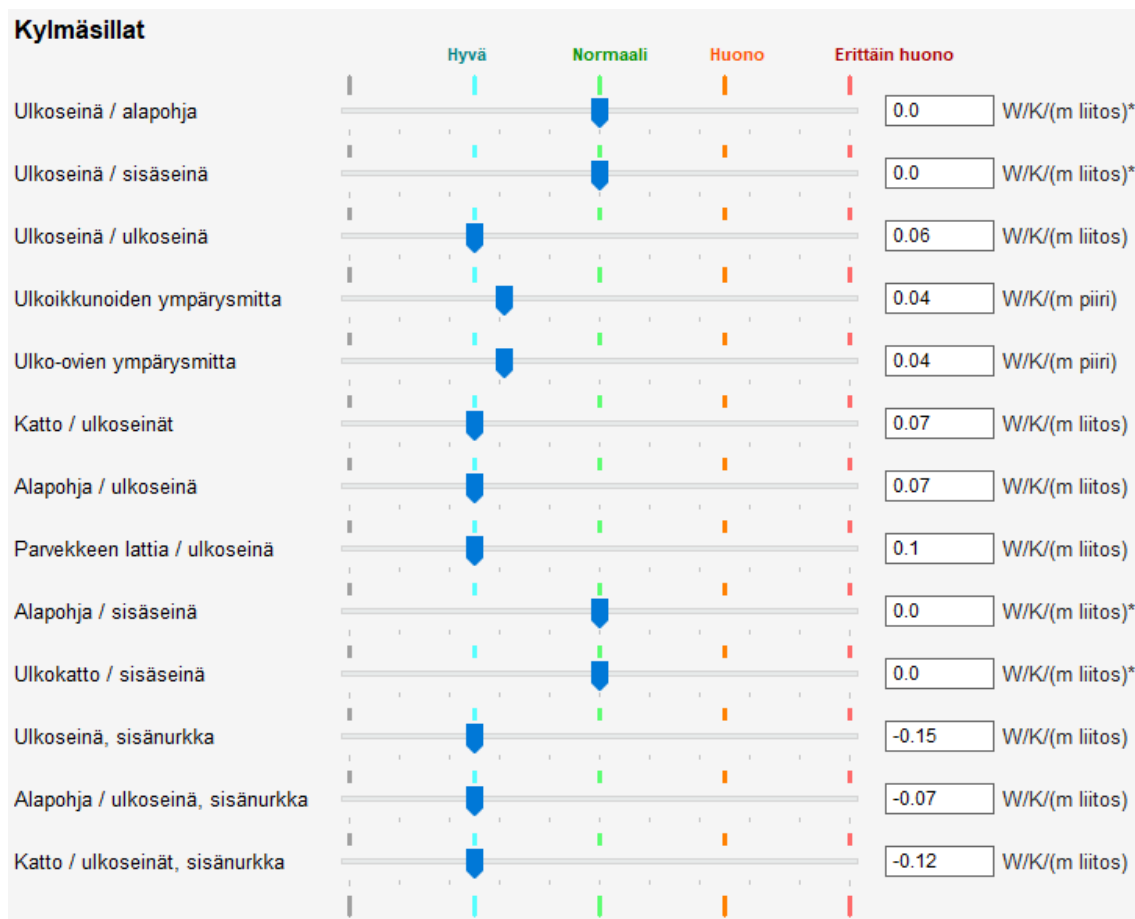
q_v	vuotoilmavirta (m^3/h)
q_{50}	ilmanvuotoluku ($\text{m}^3/(\text{h m}^2)$)
x	kerroin, joka on yksikerroksisille rakennuksille 35, kak- sikerroksisille 24, kolmi- ja nelikerroksisille 20 ja näitä korkeammille 15.

Kohteen kolmelle eri tyyppille saatiin seuraavat vuotoilmavirrat kaavalla 5:

- Lähtötietoihin perustuva $q_v = 0,1 \text{ m}^3/(\text{h m}^2) * A_{vaippa}$
- Matalaenergia $q_v = 0,05 \text{ m}^3/(\text{h m}^2) * A_{vaippa}$
- Passiivi $q_v = 0,0365 \text{ m}^3/(\text{h m}^2) * A_{vaippa}$

Vuotoilman arvo syötettiin IDA ICE:n yleislomakkeelta löytyvään vuotoilma ikku-
naan kohtaan "vakio vuotoilmavirta".

Kylmäsillojen ohjearvot löytyvät ympäristöministeriön julkaisemasta ohjeesta ra-
kennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta (6 s. 19). Ulko-
seinän ja alapohjan sekä sisäseinän väliset kylmäsillat asetettiin nollaan Equa:n
Suomi lokalisaation oppaan mukaan (10 s. 2). Kylmäsillojen osuudeksi kaikista
häviöistä tuli 10,24 %, mikä on hyvin lähellä laskentapalvelussa käytettyä 10 %:a
(ks. Kuva 10).



Kuva 10. Kylmäsiltojen määrittäminen IDA ICE:ssä.

3.3 Lisäenergia ja häviöt

Yleisluokasta löytyvästä "lisäenergia ja häviöt" -ikkunasta pystyy kohteelle syöttämään eri lähteistä aiheutuvia häviöitä. Ikkunan yläosan ensimmäisessä kohdassa pystyy antamaan lämpimälle käyttövedelle keskimääräisen kulutuksen eri muodossa. Simulaatioissa käytettiin laskentapalveluiden käyttämää $510 \text{ dm}^3/(\text{m}^2 \text{ a})$. Toisena vaihtoehtona olisi ollut käyttää energiamääräyksen asettamaa lämpimän käyttöveden lämmitysenergian nettotarvetta vuodessa arvoa $35 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ käyttötarkoitukseluokka 2:lle (3 s. 8). Ero $35 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ ja $510 \text{ dm}^3/(\text{m}^2 \text{ a})$ käyttämisen välillä oli todella pieni. Matalaenergiaratkaisun yhteydessä simuloitiin sama rakennus vaihtaen lämpimän käyttöveden määritystä litra perusteisesta kilowattiperustaiseen. Simuloinnin erona oli LKV: hen kulunut energia, yhteensä suhteellisen minimaalinen n. 400 kWh/a (+ 0,8 %).

Samassa ikkunassa annetaan myös lämpimän käyttöveden lämpöenergian tarve ja siitä vyöhykkeisiin siirtyvä teho. Luvussa otetaan huomioon ohjeen ”rakennuksen energiankulutukseen ja lämmitystehon laskenta” mukaiset kierto- ja jakeluhäviöt (6 ss. 40-47). Luku annetaan IDA ICE:ssa muodossa W/m^2 . Laskenta tehtiin Equan Suomi lokalisointi oppaan mukaan kaavalla 6 (10 ss. 4-5).

$$\frac{Q_{lkv,netto}}{n_{lkv,siirto}} + Q_{lkv,kierto}$$

Kaava 6.

Koska IDA ICE -ohjelmassa määritettiin häviöt neliöpohjaisina lukuina, ongelmaksi tuli ohjelman laskema (lämmitetty) nettoala, joka erosi laskentapalveluihin syötetystä. Lämpimän käyttöveden häviöt olivat huomattavasti korkeammat ohjelmassa verrattuna laskentapalveluihin, jos häviöitä ei olisi suhteutettu ohjelman laskemaan lattia-alaan. Ohjelman käyttämä lämmitetty nettoala oli sama kuin koko lattia-ala. Todellisuudessa vain osa alasta laskettiin lämmitetyksi nettoalaksi. Yhteensä lattia-alaa oli $1189,2 \text{ m}^2$, kun taas lämmitettynä ala laskentapalveluissa oli käytetty $860,5 \text{ m}^2$. Häviöille käytettiin em. luvuista jaettua suhdelukua

$$\frac{860,5 \text{ m}^2}{1189,2 \text{ m}^2} = 0,7236.$$

Eri rakennustyyppien lämpimän käyttöveden ominaishäviöt taulukossa alla (Taulukko 14). Laskentapalveluista poiketen matalaenergiaratkaisussa käytettiin 0,5 D – eristettyä suojaputkessa kulkevaa vesijohtoa.

Taulukko 14. Suhdeluvulla kerrotut arvot merkitty lihavoidulla fontilla.

	Lähtötieto	Matalaenergia	Passiivi
$Q_{lkv,kierto}$ Suhdeluvulla 0,7236	3 W/m 2,1708 W/m	1,6 W/m 1,5776 W/m	1,6 W/m 1,15776 W/m
$\frac{Q_{lkv,netto}}{n_{lkv,siirto}}$	0,12 W/m ² 0,0868 W/m	0,12 W/m ² 0,0868 W/m	0,12 W/m ² 0,0868 W/m
Lämmin käyttövesi, häviöt yhteensä	2,258 W/m²	1,245 W/m²	1,245 W/m²
Vyöhykkeisiin siirtyvä %-osuus	48,08 %	46.50 %	46.50 %

Lisäenergiankulutus kohtaan lisättiin vielä LVK pumppauksen, lämmityksen apulaitteistojen sekä kaukolämpökeskuksen sähkönkulutukset Equan Suomi lokalisatio-ohjeen mukaisesti (10). Alla kyseiset arvot taulukossa (Taulukko 15):

Taulukko 15. Lisäenergiankulutus kohteessa

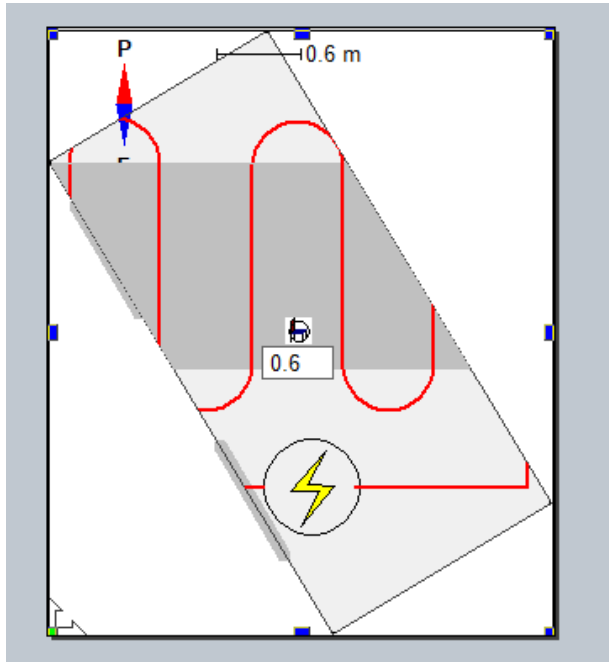
LKV Pumppaus	0.08122 W/m ² [1010/2017, kohta 6.3.4]
Lämmityksen apulaitteistot	0.05708 W/m ² [1010/2017, taul. 6.1]
KL-lämmönjakokeskus	0,007991 W/m ² [1010/2017 taul. 7.1]

3.4 Lämmönjakotavat ja huonelaitteet

Simulaatioissa käytettiin kaikissa vyöhykkeissä ideaali lämmittimiä ja -jäähdyttimiä. Ideaalihuonelaitteet ovat käytännössä pintoja katossa, jotka tuottavat tarvittavan määrän lämmitys- ja jäähdytysenergiaa. Tuloksien pohjalta saatiin karkea arvio lämmityksen sekä jäähdytyksen tarpeesta eri tiloille.

Märkätiloista poistettiin ideaalihuonelaitteet, ja laitettiin tilalle sähköllä toimivat lattialämmityspiirit. Lattialämmityspiiri lisättiin avaamalla vyöhykkeen lattia ja valitsemalla valikosta "Uusi objekti". Vyöhykkeet eivät olleet kohtisuoraan pohjoisnuolen kanssa eikä lattian muokkauksessa pystynyt pyörittämään näkymää tai

lattiaämmityspiiriä, joka vaikeutti lattialämmityspiirien sovittamista tiloihin (ks. Kuva 11). Jos lattialämmityspiirin alue ei peittänyt lattia-alaa kokonaan, ohjelma saattoi olettaa piirin olevan muissakin ympäröivissä vyöhykkeissä aiheuttaen virheitä laskelmiin. Pahimmassa tapauksessa väärin määritetty lattialämmityspiiri aiheutti ohjelman kaatumisen.



Kuva 11. Lattialämmityspiirien sovittaminen tiloihin

Simulointeihin lämmityksen- ja jäähdytyksen asetusarvoja muokattiin hieman alla olevan taulukon mukaisesti (Taulukko 16). Määritetyt rajat vastasivat paremmin todellisia käytönajan arvoja.

Taulukko 16. Vyöhykkeiden lämmitys- ja jäähdytysrajat

Tilat	Lämmitysraja	Jäähdytysraja
OH, MH, ET, KT	21 °C	25,5 °C
PH, WC	22 °C	26,5 °C
Raput, kellari	17 °C	26,5 °C**

**Käytännössä ei jäähdytystä

3.5 Ilmanvaihtokoneen määrittäminen

Ilmanvaihtokone määritettiin toimimaan vakiolämpötilan asetusarvolla 16 °C. Tätä arvoa nostamalla 18–22 °C :een IV-lämmityspatterin käyttämä sähköenergia pienentyisi ja sama lämpö tuotettaisiin kaukolämmöllä. Arvoa ei kuitenkaan muutettu vertailtavuuden takia. Lämmönsiirrin sekä puhaltimien käyttö määritettiin toimimaan ympärivuotisesti tasaisesti käyttöasteella 1,0 (100 %). Puhallinkäytön pystyisi asettamaan toimimaan myös yli 1,0 arvoilla, jolloin IV-kone käyttää tehostettua ilmapuhallinta. Tämä voisi olla yksi mahdollisuus yllälämmön ehkäisemiseksi jäähdytyskaudella. Tulo- ja poistoilmapuhaltimen sekä lämmönsiirtimen arvot asetettiin vastaamaan IV-koneen määritettyjä vuosihyötysuhteita (ks. Taulukko 8). Lämmitys- ja jäähdytyspatterille jätettiin alkuperäiset arvot (1,0).

3.6 Muita toimenpiteitä

Osa vyöhykkeiden väliovista jäi molempien vyöhykkeiden seinien tietoihin. Tällöin ohjelma antaa virheen, ja toinen ovista täytyy poistaa. Usein poistamalla toisen ovista johtaa se molempien ovien poistamiseen. Tällöin toisen vyöhykkeen (yleensä vyöhykkeen johon ovi johtaa) seinälle piti lisätä uusi ovi, jolloin viereisen vyöhykkeen seinälle muodostui aukko varaus. Asuntojen rappukäytävään johtavat ovet tuottivat ongelmia, joten ne jätettiin tekemättä. Jos ovia olisi halunnut käyttää, ovirako olisi pitänyt määrittää nollassa.

Oletuksena IDA ICE :ssa ikkunoiden sisäänveto on nolla. Yleensä arvo on kuitenkin yli 0,1 m. Tuloksia vertaillaan matalaenergia vaihtoehdon kohdalla.

4 Tulokset

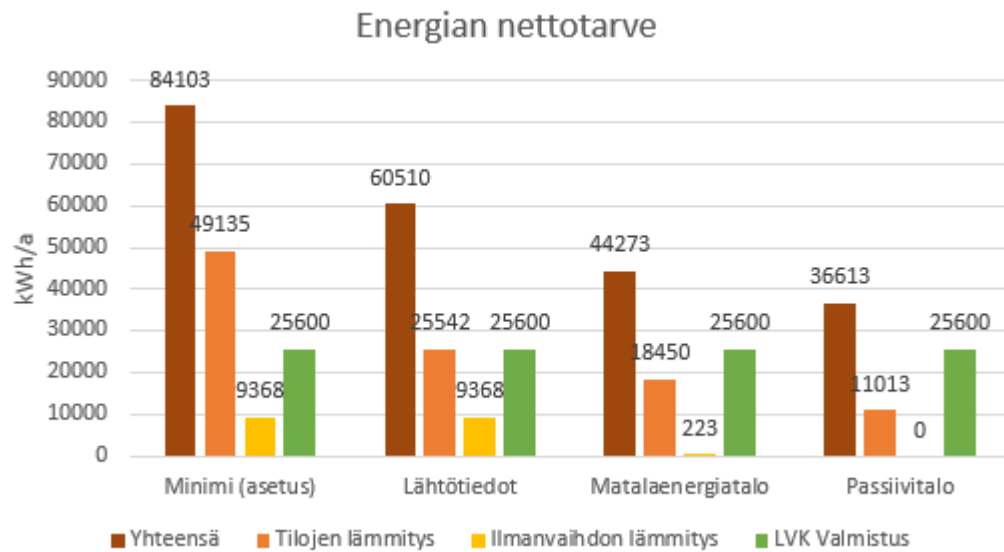
4.1 Laskentapalvelut.fi tulokset

Vertailukohteesta tehtiin laskennat neljälle eri rakennustyyppille. Rakenteita ja näiden tiiviyttä, ikkunoita ja ilmanvaihdon vuotuista hyötysuhdetta muutettiin eri rakennustyyppien välillä (ks. luku 2.2). Jokaiselle rakennustyyppille lasketut energiatodistukset löytyvät liitteistä 1 - 4 (ss. 3 – 18). Kaikkien kohteiden yhteen kootut lähtötiedot ja tulokset löytyvät liitteestä 1 (ss.1 – 2). Taulukossa (Taulukko 17) on esitetty rakennusten E-luvut. E-luvun raja-arvona käyttötarkoituksluokan 2 rakennuksissa on $90 \text{ kWh}_E / (\text{m}^2 \text{ a})$. Lähtötietoihin perustuva rakennus ei täyttänyt määräyksien asettamaa E-luvun raja-arvoa.

Taulukko 17. Rakennustyyppien E-luvut

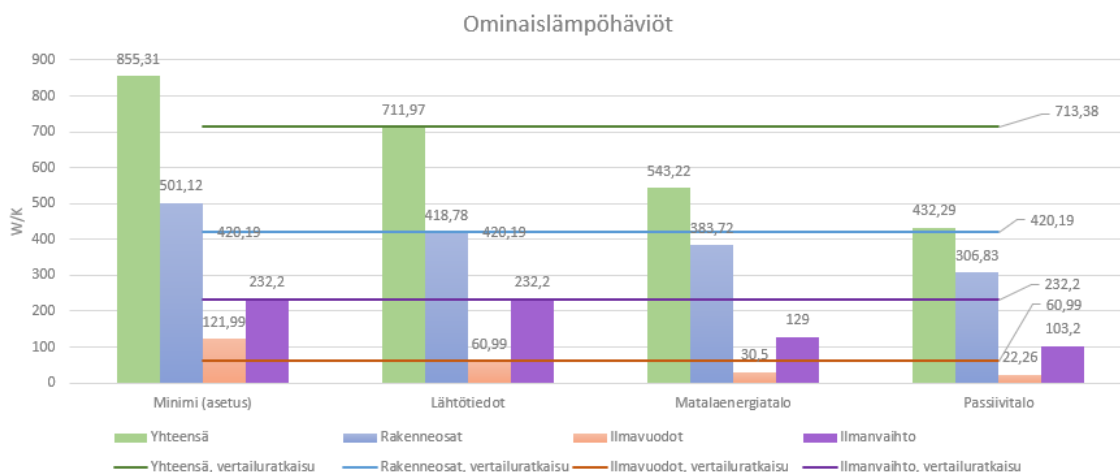
Tyyppi	$Q_{\text{kaukolämpö}}$ kWh/a	$Q_{\text{sähkö}}$ kWh/a	$f_{\text{kaukolämpö}}$	$f_{\text{sähkö}}$	E-luku ($\text{kWh}_E / (\text{m}^2 \text{ a})$)
Lähtötiedot	73917	47155	0,5	1,2	108,71
Matalaenergia	67412	36434	0,5	1,2	89,98
Passiivi	49737	33052	0,5	1,2	74,99

Kaaviossa energian nettotarpeista (Kaavio 1) on esitetty näiden neljän rakennustyyppin vuotuiset energian tarpeet. Lämpimän käyttöveden osuus pysyi kaikissa samana, koska käyttöaste oli määritetty vakioksi. Käyttöveden kulutukselle ei pystynyt laskurissa antamaan itse arvoa, vaan laskuri päätteli arvon syötetyistä tiedoista. Kohteelle laskuri määritteli veden kulutuksen lattianeliöiden suhteen vuodessa $510 \text{ dm}^3 / (\text{m}^2 \text{ a})$. Motivan mukaan asuinkerrostalojen keskimääräinen vedenkulutus olisi $600 \text{ dm}^3 / (\text{m}^2 \text{ a})$, tai asukasperustaisesti laskien noin 150–155 $\text{dm}^3 / \text{hlö} / \text{vrk}$ (11). Kohteen käyttövesiverkostossa ajateltiin olevan varustettu vakio-paineventtiilillä, jonka takia laskurikin antoi veden kulutukselle arvon $510 \text{ l} / (\text{m}^2 \text{ a})$, joka on 15 % pienempi kuin vertailuarvo. Vertailun vuoksi myöhemmissä IDA ICE simulaatioissa käytettiin samaa $510 \text{ dm}^3 / (\text{m}^2 \text{ a})$ arvoa keskimääräiselle vedenkulutukselle. (ks. luku 3.3)



Kaavio 1. Energian nettotarve eri rakennusluokissa. [lähde laskentapalvelut]

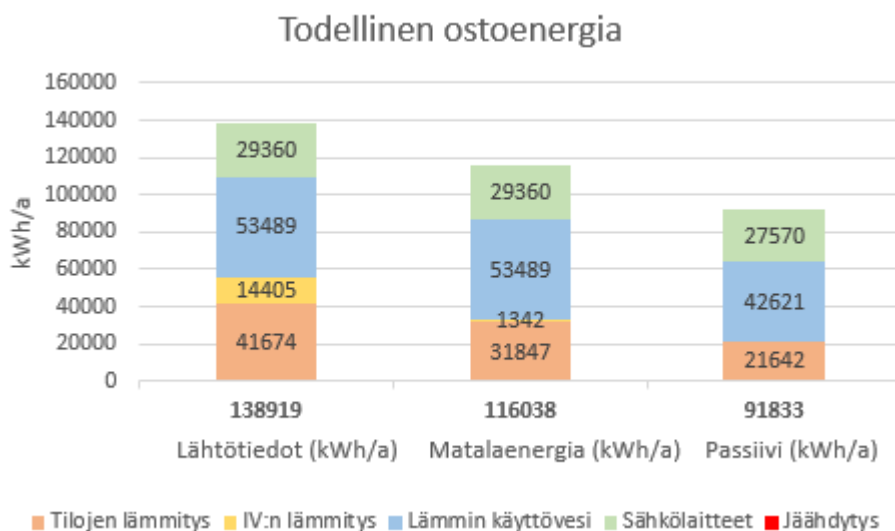
Ilmanvaihdon lämmityspatterin energiankulutus putoaa lähes nollaan jo matala-energiallisessa rakennuksessa. Täysin nollaan päästään passiiviratkaisussa. Lämpimän käyttöveden jakelu- ja kierron häviöt korostuvat matalaenergia- sekä passiivi ratkaisussa. Jäähdytystehoja ei sisällytetty laskentapalvelun vertailutaloksiin.



Kaavio 2. Rakennustyyppien ominaislämpöhäviöt. Vaakaviivat kuvaavat rakennuksen vertailuratkaisua.

Ylläolevasta kaaviosta (Kaavio 2) havaitaan, että asetusten mukaiset minimiarvot (3 ss. 11-12) eivät yllä vaadittujen ominaislämpöhäviöiden tasalle. Ilmanvaihdon lämpöhäviöiden vaatimus kuitenkin täyttyy, koska ilmanvaihdon vuosihyötysuhde on sallitulla tasolla (55 %) (3 s. 13). Rakennuksen vuotoilmahäviöiden laskennassa on käytetty suunnitteluarvona asetusten osoittamaa $4,0 \text{ m}^3 / (\text{h m}^2)$. Arvoa on käytettävä, jos ilmanpitävyyden suunnitteluarvon toteutumista ei osoiteta mitaamalla (3 s. 12).

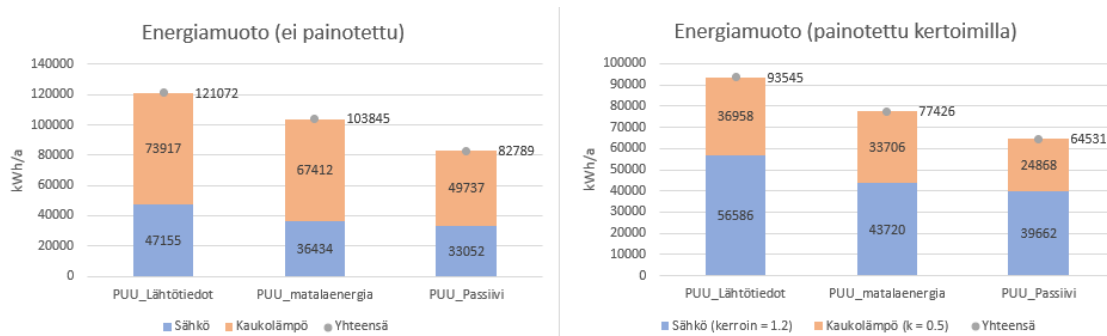
Parhaiten säästöjä kuvaava kaavio on todellisen ostoenergian kulutusta kuvaava pylväskaavio (Kaavio 3). Kohteen lähtökohtaisten suunnitteluarvoihin pohjautuva puukerrostalo kuluttaisi n. 139 MWh energiaa vuodessa, josta IV:n ja tilojen lämmitykseen kuluisi n. 40 % (56,0 MWh/a) energiasta, lämpimän käyttöveden valmistukseen n. 38,5 % (53,5 MWh/a) energiasta ja loput n. 21,5 % (29,4 MWh/a) sähkölaitteisiin.



Kaavio 3. Laskentapalvelut.fi todellisen ostoenergian kulutus eri rakennustyypeissä.

Vastaavasti matalaenergisessä ratkaisussa todellista ostoenergiaa kuluisi n. 116 MWh/a, eli noin 23 MWh/a vähemmän kuin lähtötilanteen rakennuksessa. Matalaenergisessä puukerrostalossa IV:n ja tilojen lämmitykseen kuluvan energian osa tippui n. 28,6 %:iin. Lämpimän käyttöveden valmistukseen kuluvan energian osuus kasvoi, ja sähkölaitteiden osuus kasvoi hieman, joskin sähkölaitteiden energiankulutus pysyi samalla tasolla.

Passiivi ratkaisussa energiaa säästy jo huomattavasti ja ilmanvaihdon tuloilman lämmitystä ei tarvinnut enää ollenkaan. Lämpimän käyttöveden valmistukseen energiaa käytettiin nyt jo lähes puolet (n. 46 %) koko rakennuksen ostoenergian tarpeesta. Yhteensä ostoenergiaa säästy passiiviratkaisussa lähtötietorakennukseen verrattuna n. 47 MWh vuodessa.



Kaavio 4. Laskentapalvelut.fi energiamuotojakauma

Kaikissa eri rakennustyypeissä käytettiin suhteessa enemmän kaukolämpöä kuin taloussähköä (ks. Kaavio 4). Energiamuodoille on kuitenkin määritetty kerroin, joka ottaa huomioon energiamuodon päästöjä sisältäen välittömät ja välilliset seuraukset. Suurempi kerroin tarkoittaa käytännössä suurempia hiilidioksidipäästöjä (12 s. 2). Kertoimilla painotettuna kaikissa rakennuksissa sähköä kului kaukolämpöä enemmän.

Yhteenlasketut todellisen ostoenergian kulutuksen ja käytettyjen energiamuotojen summat eroavat toisistaan, koska rakennuksen sisäisiä kuormia (=ilmaisenergiaa) on käytetty osana mm. lämmitykseen (ks. Taulukko 18), ja osa lämpöenergiasta johtuu rakenteiden ja vuotoilman kautta pois rakennuksesta.

Taulukko 18. Lämpökuormat kohteessa, laskentapalvelut.fi

Lämpökuormat	kWh/a	kWh/ (m ² a)
Aurinko	67955	78,97
Ihmiset	13568	15,77
Kuluttajalaitteet	18091	21,02
Valaistus	6784	7,88
LKV kierto + varastointihäviö - Lähtötieto sekä matalaenergia	11300	13,13
LKV kierto + varastointihäviö - Passiivi (eristetty kiertojohto)	2400	2,79

4.2 Yhteenveto energiankulutuksesta

Taulukko 19. Energian tunnusluvut verrattuna kohteen lähtötietoihin. Ensimmäisellä rivillä absoluuttinen luku, toisella erotus verrattuna lähtötietoihin ja kolmannella rivillä prosentuaalinen ero.

	Vertailuratkaisu (lähtötiedot)	Matalaenergia	Passiivi
Todellinen ostoenergia	139 MWh/a	116 MWh/a -23 MWh/a (-16,5 %)	92 MWh/a -47 MWh/a (-33,8 %)
Energian nettotarve	60,5 MWh/a	44,3 MWh/a -16,2 MWh/a (-26,8 %)	36,6 MWh/a -23,9 MWh/a (39,5 %)
Ominaislämpöhäviöt (yhteensä)	711,97 W/K	543,22 W/K -168,75 W/K (-23,7 %)	432,29 W/K -279,68 W/K (-39,3 %)

4.3 Rakenteiden eroavaisuudet

Pelkän energiankulutuksen kannalta rakenteen muuttaminen tiiviimmäksi ja paremmin eristetyksi näyttää hyvältä paperilla. Todellisuudessa rakenteiden ns. parantaminen aiheuttaa usein enemmän kuluja rakennusmateriaaleissa ja rakentamisessa sekä mahdollisesti aiheuttaa tätä kautta isomman hiilijalanjäljen. Kaikki rakenteet ovat samantyyppisiä keskenään, joten vertailu on suhteellisen suoraviivaista.

Ulkoseinärakenteessa vaihtoehdot 1 (lähtötietojen mukainen rakennus) ja 2 (matalaenergia) olivat samanlaisia. Vaihtoehto 3 (passiivi) eroaa kahdesta muusta kolmessa kerroksessa seinärakennetta:

- Kerroksessa 2 ulompi kipsilevy (15,0 mm) on jätetty pois, jonka tilalle laitettiin 50,0 mm paksuinen kivivillakerros
- Kerroksessa 4 kivivillaeristettä on 30,0 mm enemmän
- Kerroksessa 6 tuulensuojavillalevyn paksuus muuttui 50,0mm:stä 75,0 mm:iin

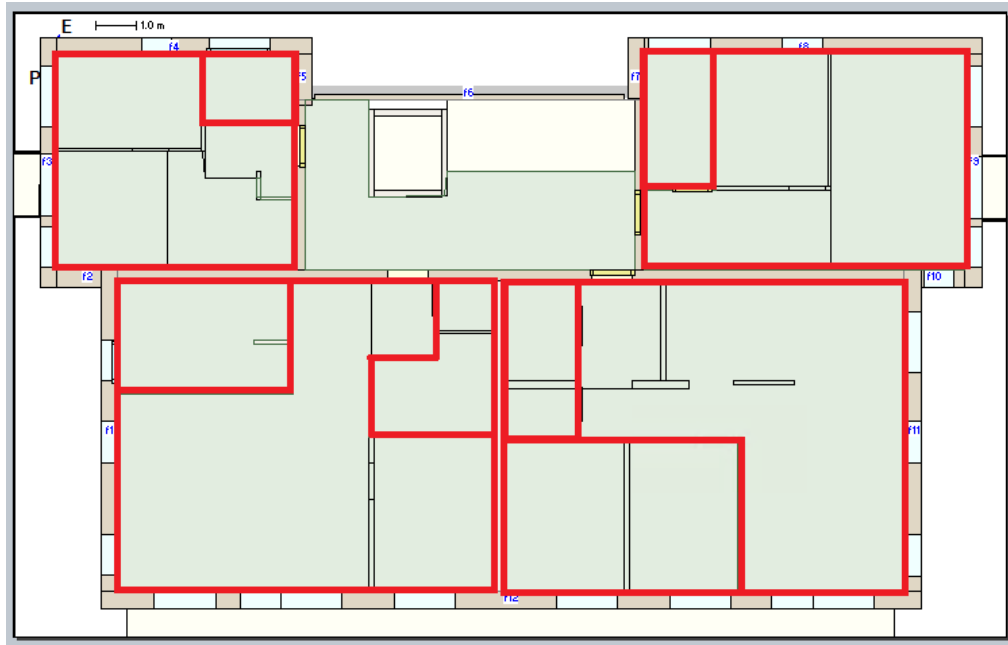
Kokonaisseinänpaksuus muuttui 357,2 mm:stä 447,2 mm:iin, yhteensä 90,0 mm.

Yläpohjarakenteessa vaihtoehdot 1 ja 2 olivat jälleen samanlaisia. Vaihtoehto 3 erosi edellisistä vain puhallusvillakerroksen paksuudessa, jossa villaa tuli lisää 50,0 mm (300,0 mm:stä 350 mm:iin). Yläpohjan paksuus ei käytännössä muutu, koska puhallusvillan pinta rajoittuu joka tapauksessa tuuletettuun ilma-alaan vesikaton alla.

Alapohjarakenteet erosivat kaikki toisistaan. Jokaisessa rakenteessa käytettiin EPS100 – lattiaeristettä. Vaihtoehdossa 1 eristepaksuus oli 200,0 mm, johon lisättiin 50,0 mm vaihtoehdossa 2. Vaihtoehdon 3 eristepaksuus nousi 300,0 mm:iin.

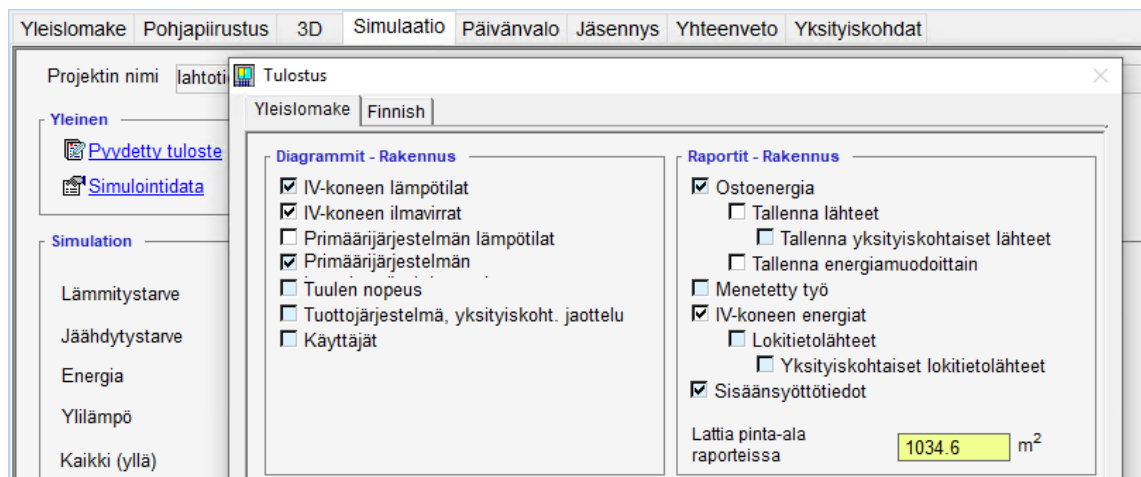
4.4 IDA ICE tulokset

IDA ICE -ohjelmalla tehtiin samaan kohteeseen simulaatiot lähtötietojen sekä matalaenergiaratkaisun perusteella. Passiivivaihtoehto jätettiin tarkastelun ulkopuolelle IDA ICE :ssa. IDA ICE :lla tehdyt energiatodistukset löytyvät liitteistä 5 ja 6 (ss.19 – 26). Simulaatioaikojen lyhentämiseksi ja muistin säästämiseksi jouduttiin vyöhykkeitä (tiloja) yhdistämään enemmän kuin alun perin oli suunniteltuna. Alla esimerkkinä kuva kerroksesta 3, jossa vyöhykkeet yhdistettynä (ks. Kuva 12). Muiden kerrosten vyöhykkeet ovat yhdistetty vastaavalla tavalla, muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta. Näitä poikkeuksia olivat 1. kerroksen yksiöt, joissa yhdistelyä ei voinut tehdä enempää, ja 2. kerroksen kaksio (31m²) jossa makuuhuonetta ei pystynyt yhdistämään olohuoneeseen, koska makuuhuonetta yhdistäessä molemmat vyöhykkeet tuhoutuivat. Syytä miksi vyöhykkeitä ei pystynyt yhdistää ei löytynyt.



Kuva 12. Vyöhykkeiden yhdistäminen kerroksessa 3.

Tuloksien vertailtavuuden takia simulaatiolle ”pakotettiin” sama lattia pinta-ala kuin laskentapalvelussa käytetty maanpäällinen kerrostasoala, joka oli 1034,6 m². Pinta-ala syötettiin simulaatio välilehdellä ikkunaan ”pyydetty tuloste” (ks. Kuva 13).



Kuva 13. Pinta-alan määrittäminen IDA ICE simulaatiossa

4.4.1 1. Simulaatio, lähtötiedoilla

Ensimmäinen simulaatio tehtiin kohteen lähtötiedoilla. Taulukossa (Taulukko 20) on esitetty laskennan avaintuloksia verrattuna laskentapalveluista saatuihin tuloksiin.

Taulukko 20. Vertailu lähtötiedoilla IDA ICE ja laskentapalvelut.fi

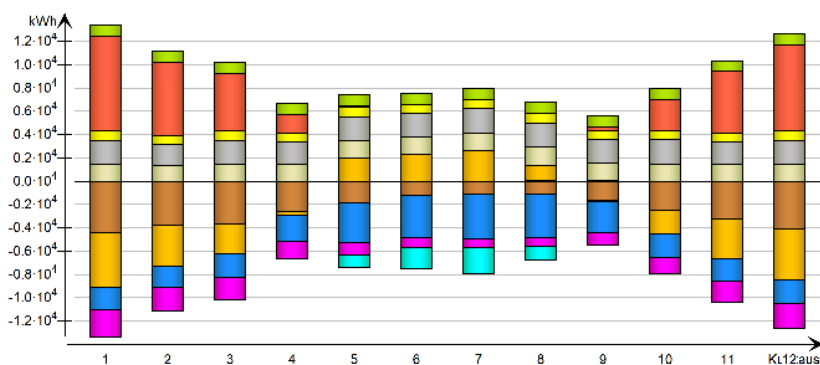
Kohteen lähtötiedot		
	IDA ICE	Laskentapalvelut
E-luku	113.2 (114)	108,71 (109)
Energiamuodot		
Sähkö	51 532 kWh/a	47 155 kWh/a
Kaukolämpö	110 558 kWh/a	73 917 kWh/a
Ostoenergia		
Ostoenergia yhteensä	162 107 kWh/a	138 919 kWh/a
- Lämmitys	38 060 kWh/a	41 674 kWh/a
- Lämmitys (IV)	14 714 kWh/a	14 405 kWh/a
- Jäähdytys	3 071 kWh/a	-
- LKV	60 978 kWh/a	53 489 kWh/a
- Sähkölaitteet	24 207 kWh/a	29 360 kWh/a
- Valaistus	9 022 kWh/a	-

E-luku on IDA ICE -ohjelman laskelman mukaan hieman huonompi kuin laskentapalvelun vastaavan laskelman. Molemmissa laskelmissa rakennuksen E-luokka oli kuitenkin sama (C). IDA :n mallissa mukaan laskettiin myös jäähdytys, mikä nosti E-lukua hieman. IDA :n simulaatiossa sähköä kulutettiin vähemmän suhteessa kaukolämpöön, mutta kuitenkin hieman enemmän kuin laskentapalvelujen vertailulaskelmassa. Kaukolämpöä IDA :n malli kulutti huomattavasti enemmän. Tulokset on saatu IDA ICE -ohjelmalla käyttäen ideaalilämmittimiä ja -jäähdyttimiä, joille ei ole annettu (maksimi) tehoja. Lämmönjakotavan määrittäminen lämmitys- ja jäähdytystarpeiden muuttaisi laskutuloksia. Häviöt olivat suurin piirtein samat molemmissa, mutta ilmeisesti erot tulivat lähinnä pinta-alojen sekä tilavuuksien eroavaisuuksien takia.

IDA :n simulaation tuloksia tarkastellessa rakennuksen energiatase herätti kysymyksiä; Ikkunoiden ja auringonsäteilyn yhteenlaskettu kuorma oli negatiivinen. Laskentapalvelun energialaskuri laski auringon lämpökuormaksi yksinään lähes 68 MWh/a (ks. Taulukko 18). Toisaalta laskentapalvelun luvussa ei ole mukana ikkunoista aiheutuvaa lämmönjohtumista, joten ero ei välttämättä ole kovin suuri. Ikkunoiden vaippaan suhteessa oleva U-arvo ($U \cdot A$) on molemmissa laskelmissa suurin piirtein sama (laskentapalvelut = 227,43 W/K ja IDA ICE = 220,80 W/K). Muut kuormat näyttävät normaaleilta.

kWh (Vain tuntuva)

Kuukausi	Vaippa ja kylmäsiilat	Sisäseinät ja massat	Ikkunat & auringonsäteily	Kon. tuloilma	Vuotoilma & aukot	Ihmiset	Laitteet	Valaistus	Paikalliset lämmityslaitteet	Paikalliset jäähdytyslaitteet	Jakeluhäviöt
1	-4372.1	2.3	-4679.7	-1992.0	-2289.9	1441.9	2055.9	770.9	8088.0	0.0	966.2
2	-3781.8	-0.6	-3545.5	-1808.3	-1969.3	1305.1	1857.0	696.4	6366.8	0.0	872.7
3	-3624.3	-13.1	-2552.1	-2045.8	-1966.5	1455.5	2055.9	770.9	4945.7	0.0	966.2
4	-2588.0	-37.7	-237.9	-2320.2	-1455.2	1425.6	1989.5	746.1	1572.9	-34.0	935.0
5	-1837.8	-32.4	1994.4	-3335.5	-1128.1	1491.7	2055.8	771.0	124.2	-1072.6	966.2
6	-1254.9	8.0	2352.4	-3568.6	-843.3	1485.9	1989.6	746.1	40.3	-1896.2	935.0
7	-1057.5	-11.5	2604.7	-3902.6	-727.9	1572.4	2055.9	771.0	2.7	-2276.8	966.2
8	-1151.5	60.1	1326.4	-3661.2	-837.8	1571.7	2055.9	771.0	46.3	-1156.3	966.2
9	-1644.5	51.2	-91.8	-2697.4	-1050.2	1483.2	1989.6	746.1	358.3	-89.8	935.0
10	-2506.9	5.0	-1984.3	-2093.2	-1407.8	1499.4	2056.0	771.0	2686.9	0.0	966.2
11	-3282.1	3.2	-3346.3	-1954.4	-1778.0	1421.3	1989.6	746.1	5257.4	0.0	935.0
12	-4086.4	1.2	-4399.8	-1998.6	-2133.2	1450.4	2055.9	770.9	7364.3	0.0	966.2
Yhteensä	-31187.9	35.6	-12559.5	-31377.8	-17587.2	17603.9	24206.6	9077.3	36853.7	-6525.6	11376.2
Lämmityksen aikainen (MIXED h)	-23870.7	895.8	-22097.1	-13863.9	-12935.4	9749.6	13669.2	5125.8	36854.7	0.0	6400.1
Jäähdytyksen aikainen (MIXED h)	-2460.8	-730.6	8646.0	-8683.3	-1732.5	3344.9	4427.2	1660.1	0.0	-6525.8	2080.5
Muuna aikana	-4856.4	-129.6	891.6	-8830.6	-2919.3	4509.4	6110.2	2291.4	-1.0	0.2	2895.6



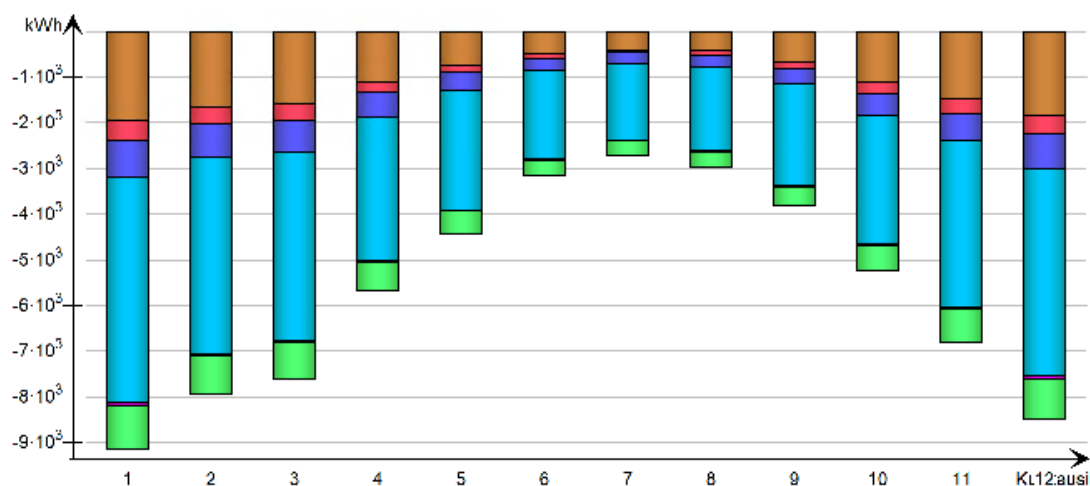
Kaavio 5. Lämpökuormat lähtötiedoilla, IDA ICE

Ikkunoiden lämpöjohtuminen oli hieman liian suurta (ks. Kaavio 6). Ikkunoiden kautta johtunut lämpö kattaa noin 55,6 % koko rakennuksen lämmön johtumisesta. Tästä voidaan päätellä, että ikkunoiden määrittämisessä voi olla jotain pielessä. Jos ikkuna-ala olisi suhteessa vaippaan isompi kuin nykyisellään, voisi tulokset selittää ikkuna pinta-alan määrällä. Ikkunoiden osuus vaipasta oli ohjelman antaman arvon mukaan n. 16 %. Ikkunan pinta-alan suhde rakennuksen

vaippaan kuitenkin lasketaan vain maanpäällisten kerroksien vaipan alasta, jolloin luku olisi suurempi. Ikkunapinta-alaa oli yhteensä n. 25 % maanpäällisten kerrosten yhteenlasketusta kerrostasosalasta. Vertailuarvona käytetään 15 %:a (13), joka kertoo tavallista suuremmasta kokonaisikkunapinta-alasta. Laskentapalvelun ikkunoiden osuus kaikista lämpöhäviöistä oli n. 6,2 %-yksikköä pienempi (49,37 %).

kWh

Kuukausi	Seinät	Katto	Lattia	Ikkunat	Ovet	Kylmäsillat
1	-1955.2	-430.0	-821.0	-4916.4	-60.5	-948.5
2	-1673.2	-367.9	-729.8	-4280.6	-50.1	-830.6
3	-1592.9	-343.6	-711.4	-4119.4	-48.2	-805.8
4	-1106.4	-232.4	-524.4	-3156.2	-32.8	-615.8
5	-741.1	-146.0	-394.9	-2634.6	-20.5	-492.9
6	-497.4	-79.2	-283.5	-1931.1	-15.4	-353.2
7	-404.1	-61.8	-258.6	-1670.5	-11.7	-300.3
8	-421.1	-95.1	-246.9	-1854.1	-16.7	-348.6
9	-664.2	-156.7	-329.9	-2214.1	-22.9	-426.3
10	-1102.2	-247.7	-477.0	-2809.3	-36.1	-558.6
11	-1463.9	-326.4	-607.1	-3644.2	-47.1	-720.5
12	-1831.8	-402.8	-766.6	-4538.1	-57.0	-880.6
Yhteensä	-13453.5	-2889.7	-6151.2	-37768.6	-418.8	-7281.7
Lämmityksen aikainen	-10365.5	-2056.0	-5031.4	-27391.4	0.0	-5480.8
Jäähdytyksen aikainen	-1244.6	-289.6	-112.9	-4834.5	-12.4	-798.9
Muuna aikana	-1843.4	-544.1	-1006.9	-5542.7	-406.4	-1002.0



Kaavio 6. Vaipan lämpöjohtuminen kohteen lähtötietoihin perustuvassa simulaatiossa

4.4.2 2. Simulaatio, matalaenergia

Toinen simulaatio tehtiin kohteeseen arvoilla, jotka täyttäisivät matalaenergiarakennuksen suuntaa antavat ohjearvot (7). Taulukossa (Taulukko 21) on esitetty laskennan tulokset verrattuna laskentapalveluista saatuihin tuloksiin. Erona

laskentapalveluun syötetyistä tiedoista, IDA ICE :ssa käytettiin lämpimän käyttöveden kierrossa eristystä (0,5 d + suojaputki). Toisena erona oli, että sisäisten kuormien osuutta vähennettiin tiloista, joissa ei oleskella tai käytetä laitteita, kuten kellarista ja porraskäytävistä ja –kuiluista. Kuormien muokkaus laski sähkönkulu- tusta noin 2500 kWh vuodessa.

Verrattuna lähtötiedoilla tehtyyn simulaatioon IDA :ssa, kylmäsiltojen suhteellinen osuus nousi hieman (n. 1,5 %-yksikköä). Ikkunoiden osuus vaipan lämpöjohtumi- sesta tippui hieman alle laskentapalvelun lähtötietojen tasolle (49,31 %). Parem- min eristettyjen ikkunoiden oletettiin vaikuttavan enemmän lämmönjohtumiseen. Nyt kuitenkin ikkunoiden ja auringon yhteenlaskettu lämpöjohtuminen ei ole ne- gatiivinen. Tässä simulaatiossa ikkunoiden ja auringon vaikutus lämpöjohtumi- seen oli yhteensä + 2670,6 kWh/a, joka oli yli 15 MWh/a enemmän sisäänpäin kuin edellisessä simulaatiossa.

Taulukko 21. Vertailu matalaenergiatason arvoilla, IDA ICE ja laskentapalvelut.fi

Matalaenerginen ratkaisu		
	IDA ICE	Laskentapalvelut
E-luku	97,3 (98)	89,98 (90)
Energiamuodot		
Sähkö	49 982 kWh/a	36 434 kWh/a
Kaukolämpö	81 396 kWh/a	67 412 kWh/a
Ostoenergia		
Ostoenergia yhteensä	131 435 kWh/a	116 038 kWh/a
- Lämmitys	30 754 kWh/a	31 847 kWh/a
- Lämmitys (IV)	4894 kWh/a	1342 kWh/a
- Jäähdytys	5174 kWh/a	-
- LKV	50 147 kWh/a**	53 489 kWh/a
- Sähkölaitteet	21 758 kWh/a	29 360 kWh/a
- Valaistus	8581 kWh/a	-

**Huom. Paremmin eristetty

Tulokset näyttävät edelleen odotettua korkeammilta. Verratessa edelliseen simulointiin, tuloksien suunta sen sijaan on oikea. Sähkön käytön osuus nousi edellisestä huomattavasti. Simulaatiossa E-luku todistuksessa on huomattava kohta ”Sähkön kulutukseen sisältyvä valaistus- ja kuluttajasähkö”, joka oli IDA ICE :lla simuloitessa 30 340 kWh/a (32 kWh/m² a) ja laskentapalvelun antamissa todistuksessa 24877 kWh/a (30 kWh/m² a), eli noin 5500 kWh/a enemmän. Ero syntyy ilmeisesti, koska laskentapalvelut käyttävät lukujen laskemiseen lämmitettyä nettoalaa (860,5 m²), kun taas IDA ICE käyttää kokonaislattia-alaa (1034,6 m²).

Jos IDA :n laskelmasta jätettäisiin jäähdytyksen osuus (5174 kWh/a) pois, uudeksi E-luvuksi tulisi 92 (91,27). Täytyy tosin muistaa, että IDA :n laskelmassa käyttöveden kierto on eristetty, ja laskentapalvelujen laskelmassa kiertojohto kulkee vain suojaputkessa. Toisaalta edellisessä kappaleessa mainittu valaistus- ja kuluttajasähkönkulutus voivat vaikuttaa E-lukuun nostavasti.

4.4.3 2. Simulaation vertailu, ikkunapinta-ala

Matalaenergisien ratkaisujen pohjalta tehtiin vielä muutama erillinen simulointi, joissa selvitettiin yksittäisten eri ratkaisujen vaikutusta lopputulokseen. Ensimmäisenä kokeiltiin pienentää ikkunapinta-alaa nostamalla ikkunoita lattian tasosta korkoon 0,30 m lattiatasosta. Samalla ikkunan kokonaiskorkeus väheni vastaavasti 0,30 m. Pienempiä ikkunoita, jotka eivät olleet lattian tasossa, ei muutettu.

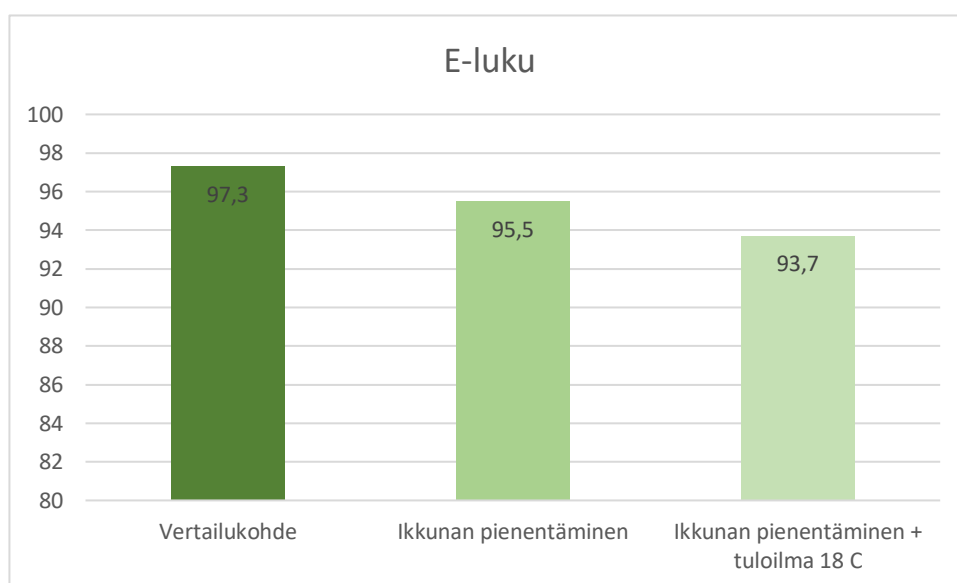
Ikkunapinta-ala pieneni kokonaisuudessaan $1 - \frac{205,95 \text{ m}^2}{236,89 \text{ m}^2} = 13,06 \text{ \%}$.

Uudeksi E-luvuksi tuli 95,5 mikä on E = 1,7 pienempi kuin vertailuratkaisussa. Vastaavasti ostoenergian kulutus pienentyi n. 2700 kWh/a. Sähkönosuus kulutuksen putoamisesta oli vain 530 kWh/a (19,6 %) ja kaukolämmön osuus loput 2170 kWh/a (80,4 %). Kaukolämmön osuudesta n. 430 kWh/a säästyi jäähdytyksen osuudessa, mikä on merkittävän suuri ottaen huomioon, että jäähdytyksen kokonaisenergian kulutus on pieni verrattuna koko rakennuksen energiankulutukseen (yht. noin 4,5 – 5 kWh/a, noin 3,6 %:a). (ks. Liite 7)

4.4.4 2. Simulaation vertailu, tuloilman lämpötila

Simulaatio jatkettiin edellisten tulosten pohjalle, eli ikkunapinta-ala oli pienennetty. Ilmanvaihtokoneen tuloilman lämpötilaa nostettiin 18 °C:een, mikä on 2 °C korkeampi kuin vertailutuloksissa.

Sisälämpötilat nousivat hieman rakennuksessa, ja jäähdytyksen tehontarve nousi hieman isommaksi kuin edellisessä simulaatiossa, kuitenkin pysyen pienempänä kuin isommilla ikkunoilla. E-luku pieneni edellisestä arvoon $E = 93,7$. Ostoenergian kulutus pieneni n. 6300 kWh/a, josta n. 11% kiinteistösähköä. (ks. luku 3.5)



Kaavio 7. E-luvut 2. simuloinnin vertailusta.

5 Mahdolliset lämmönlähteet

Tässä luvussa pohditaan vielä mahdollisia lämmönlähteitä ja näiden hyödyntämistä laskentakohteessa. Tarkempia laskelmia eri lähteiden käytöstä ei sisällytetty tähän raporttiin, joskin niistä voisi olla hyötyä jatkoa ajatellen.

Kohteen sijainti mahdollistaa usean lämmönlähteen käytön rakennuksessa. Eri järjestelmiä voi tarpeen tullen yhdistellä, tai käyttää yksinään.

Tässä raportissa tehdyissä laskelmissa oletus lämmönlähteenä on ollut kaukolämpö, jonka rinnalla on suorasähkölämmitys märkätiloihin. Kaukolämmön energiakerroin (14) on huomattavasti pienempi kuin sähkön, joka kertoo yleensä pienemmästä hiilijalanjäljestä. Sähköä kuitenkin voidaan tuottaa hyvinkin ympäristöystävällisesti esimerkiksi hyödyntämällä vain aurinko- tuuli- ja vesisähköä, missä tapauksessa sähkön energiamuotokerroin on liian suuri nykyisellään verrattuna ainakin kansallisten hiilidioksidipäästöjen arvoon verrattaessa.

5.1 Aurinkolämpö

Auringosta saatavaa ilmaisenergiaa hyödyntämällä on mahdollista säästää esimerkiksi lämpimän käyttöveden lämmityskustannuksissa käyttämällä aurinkokeräimiä. Aurinkokeräimissä nykyisellään on kuitenkin suhteellisen alhaiset hyötysuhteet. Aurinkokeräimille voidaan käyttää hyötysuhdetta 0,6, mikäli suunnitteluarvoa tai tuotetietoja ei ole saatavilla. Yksinkertaistetun menetelmän D5 menettelytavan mukaan laskiessa aurinkoenergian osuus käyttöveden lämmitysenergiassa saa olla enintään 45 %, jos laskentaa ole suoritettu tarkemmalla menetelmällä. Alla olevassa Taulukko 22 on esitetty keräimien tuottama aurinkolämpö keräimien pinta-alaa kohden, jotka hyödynnetään käyttöveden lämmityksessä (6 ss. 50-52).

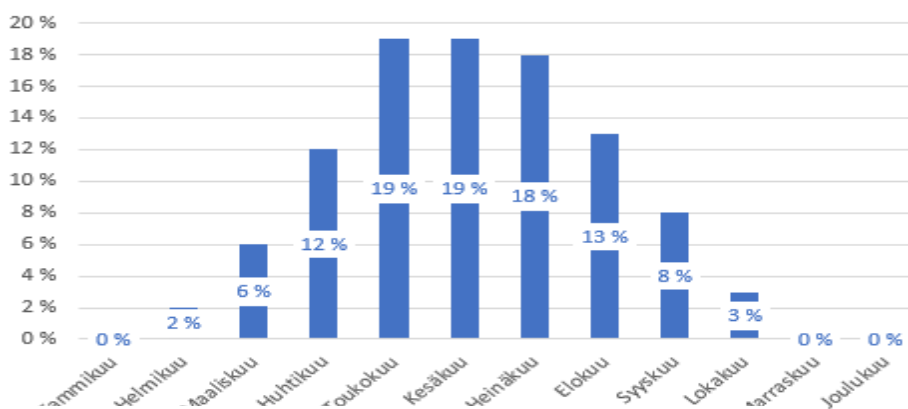
Taulukko 22. (6 s. 51)

Vyöhyke/paikkakunta	$q_{\text{aurinkokeräin}}$ kWh/ (m ² a)
I - II / Helsinki	390
III / Jyväskylä	350
IV / Sodankylä	310

Aurinkolämpöjärjestelmää hankkiessa on hyvä laskea takaisinmaksuaika. Huomioiden keräimien hankinnasta sekä ylläpidosta koituvat kustannukset voidaan verrata järjestelmän kiinteää tuottohintaa esim. suoraan sähköön tai kaukolämpöön verrattuna. Aurinkolämpöjärjestelmän odotettu pitoaika on noin 30 vuotta ja vaatii järjestelmän tarkistusta muutaman vuoden välein, sekä tyypillisesti

paisunta-astian ja ohjausyksikön vaihdon kerran elinkaarensa aikana. Lämmön-siirtonesteet on oletettu vaihdettavan kahdesti 30 vuoden aikana. Ylläpitokustannukset ovat suuremmissa järjestelmissä suhteessa alkuinvestointiin pienempiä kuin pienissä järjestelmissä. Järjestelmän teho saattaa ajan myötä myös heiketä, jolloin takaisinmaksuaika pidentyisi oletetusta. (15)

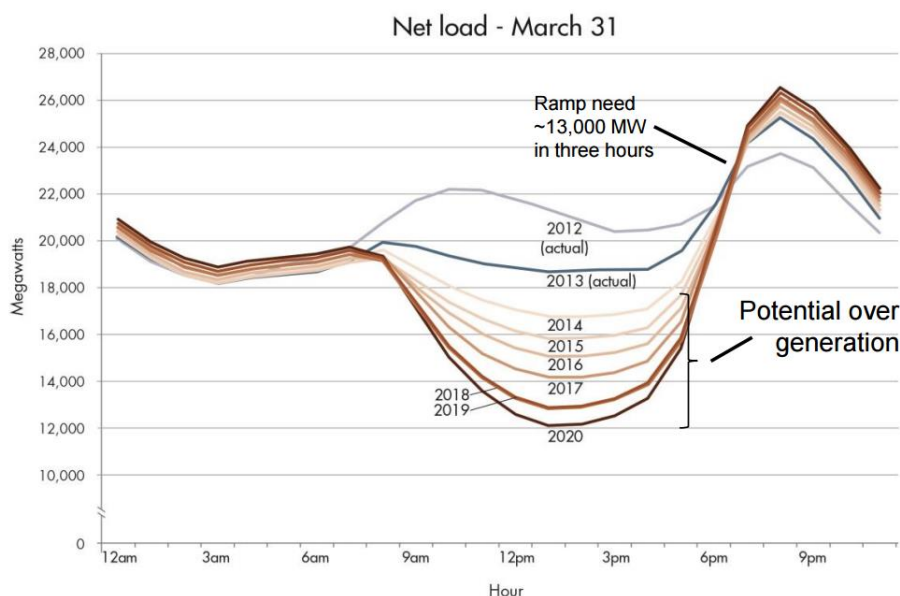
Aurinkokeräinjärjestelmän sekä kaukolämmön energiakerroin 0,5. Molempien järjestelmien alkuinvestointi on kalliimpi verrattuna esim. suoraan sähkölämmitykseen. Aurinkolämmöllä toimiva järjestelmä toimii parhaiten matalan lämpötilanjärjestelmissä, kuten esimerkiksi lattialämmitysjärjestelmässä. Aurinkolämpöjärjestelmää ei voi kuitenkaan käyttää ainoana lämmönlähteenä, koska auringon säteilyteho on rajallista Suomessa (ks. Kaavio 8). Talvisin järjestelmän tuotto on pientä, minkä takia aurinkolämpöjärjestelmää käytetäänkin yleensä käyttöveden lämmitykseen.



Kaavio 8. Auringonsäteilyn kuukausittaiset energiaosuuksien suhde koko vuoden energiaan vyöhykkeellä 3. [lähde]

Aurinkolämpöä hyödynnettäessä eniten lämpöenergiaa saadaan keskimäärin keskipäivällä, jolloin lämpimän käyttöveden käyttö on todella pientä verrattuna aamupäivän ja illan vedenkulutukseen. Suurilla energiavaraajilla voidaan pitää käyttövesi lämpimänä myös illalle ja aamulle, mutta suurien varaajien myötä myös lämpöhäviöt kasvavat. Kesällä kerättyä lämpöenergiaa ei kuitenkaan pysty hyödyntämään talven lämmityskustannuksissa. (16 s. 51,52)

Energianvarastoinnin ongelmaa kuvaava ”duck curve” (ks. Kaavio 9) on yksi suurimmista haasteista aurinkolämmön sekä -sähkön hyödyntämisessä. Kaavion pystyakseli kuvaa nettokuormaa, joka järjestelmän pitäisi pystyä tuottamaan tiettyyn päivän aikaan (vaaka-akseli). Kuvaajasta havaitaan, että auringon korkeimman säteilyn aikana kuormaa ei ole suhteessa aamuun tai iltaan paljon. Parempi akkuteknologia mahdollistaisi käyrän tasoittumisen ja parantaisi auringosta hyödynnettävän energian käyttömahdollisuuksia. (17)



Kaavio 9. "Duck curve", joka kuvaa järjestelmien nettokuormaa suhteessa kellonaikaan päivässä. Käyrä kuvaa tyypillistä Californian kevät päivää. (17 s. 1)

Aurinkolämmön käyttö varaenergiamuotona voisi olla kannattavaa, jos päälämmitysmuotona olisi esimerkiksi maalämpö. Kannattavuutta varten pitäisi tehdä kuitenkin omat laskelmansa, joita tähän raporttiin ei sisällytetty.

5.2 Aurinko- ja tuulisähkö

Suomen sääolosuhteet ja nykyinen energian varastointitekniikka eivät suosi auringosta tai tuulesta saatavaa sähköä. Sähköenergian varastointi nykyisellään on vaikeaa. Lämpöä pystytään varastoimaan helpommin mm. vesivaraajin ja rakenteellisin keinoin, mutta sähkö vaatisi nykyistä parempaa akkuteknologiaa. (ks. Kaavio 9)

Tuulivoiman hyötysuhteet riippuvat täysin siitä, että sattuuko tuulemaan ja millä voimakkuudella. Tuulivoiman hyödyntäminen toimivana lisälämmitysjärjestelmänä vaatisi jatkuvaa tuulta (mm. meren tai järven rannalla tai korkealla merenpinnasta) ja mahdollisuuden varastoida tuotettua sähköä paremmin.

Aurinkosähkön hyötysuhteet ovat huomattavasti pienemmät verrattuna aurinkolämpöön. Aurinkolämmön (lyhytaikainen) varastointi on myös helpompaa aurinkosähköön verrattuna. Aurinkosähköä voitaisiin parhaimmillaan hyödyntää apulaitteiden tai vastaavien energiantarpeen kattamisessa.

5.3 Maalämpö

Maalämpö on maaperään varastoitunutta auringon lämpöenergiaa ja geotermistä energiaa. Maalämpö kerätään talteen keruupiirillä, jonka voi upottaa vieressä virtaavaan Pielisjokeen tai kallioon porattuun reikään. Vaihtoehtoisesti maalämmön keräämiseen voi hyödyntää energiapaaluja, eli rakennuksen paalutetun perustuksen sisällä olevia energiakeräimiä. Maalämmön etuna on, että samaa piiriä voitaisiin käyttää lämmitykseen sekä jäähdytykseen (18).

Jäähdytysmahdollisuuden hyödyntäminen myös ehkäisee keruupiirin lämmönsiirtonesteen jäätymistä palauttamalla lämpöenergiaa takaisin maaperään jäähdytyskauden aikana. Jäähdytystarpeen ollessa lämmitystarvetta pienempi lämmönsiirtonesteen lämpötila alkaa hiljattain laskea, koska maasta otetaan enemmän lämpöä kuin viedään takaisin. (16 s. 48)

Maalämpöä harkitessa pitää alueelle tehdä selvitys maaperän energiapitoisuuksista. Joensuun kaupungin kartastosta löytyy mm. geoenergiakartta, josta voi päätellä karkeasti alueen geoenergian hyödynnettävyyden mahdollisuuden. Kartan perusteella pääteltiin, että alueella on vain vähän geoenergiaa varautuneena maaperään (ks. Kuva 14).



Kuva 14. Joensuun pielisjoen rannan geoenergiakartta. Kohteen sijainti kartalla punaisella neliöllä.

Maalämpöpiiriin pystyy myös yhdistämään kaukolämmön esimerkiksi lisälämpöjärjestelmäksi helposti, koska molemmat toimivat vesikiertoisilla lämmönjakojärjestelmillä (16 s. 53). Toisaalta kaukolämmön käyttäminen lisälämmityksenä on nykyisellään taloudetonta, koska lämmöntuottolaitokset perivät kalliin liittymismaksun riippumatta kaukolämmön käyttötarkoituksesta (päälämmitysmuoto tai lisälämmitysmuoto).

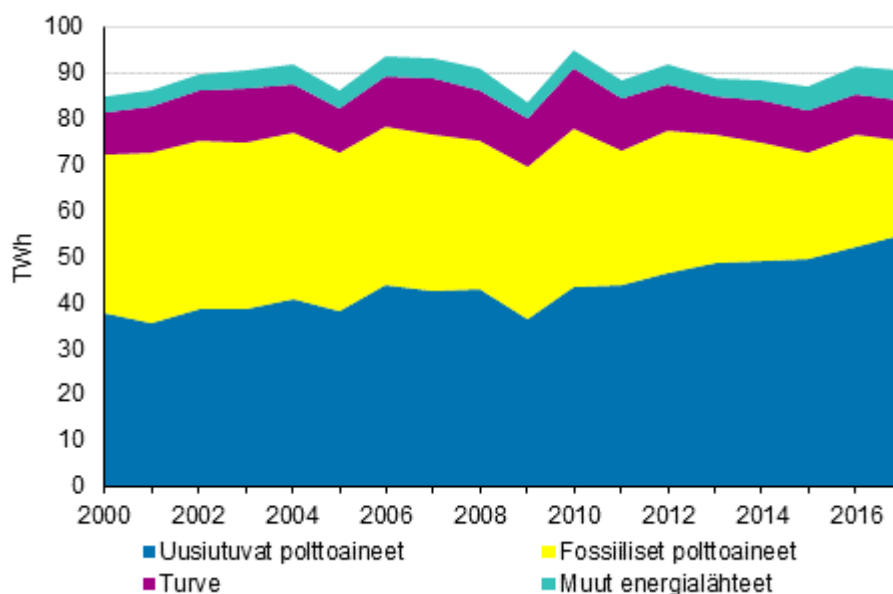
Maalämmön kannattavuudesta ei tehty erillisiä laskelmia kohteeseen, mutta tarvittaessa voisi ainakin mahdollisuuden maalämmön käytön lisälämmitysmuotona kaukolämmön rinnalla tarkastaa.

5.4 Kaukolämpö

Kaukolämmön tuotannossa suurin osa energiasta tuotetaan uusiutuvilla polttoaineilla. Vielä nykyiselläänkin lämmöntuotossa on käytössä kuitenkin fossiilisia polttoaineita. (ks. Kuva 15) Fossiilisia polttoaineita kuitenkin käytetään kaukolämmön tuottamiseen vähemmän kuin sähkön tuotannossa.

Nykyhetkellä paljon keskusteltu ydinkaukolämpö voisi tulevaisuudessa pienentää kaukolämmön hiilijalanjälkeä ja parantaa sen kilpailukykyä. Ydinkaukolämmön

kehittämisessä Suomessa ja varsinkin leviämisessä pääkaupunkiseudun ulkopuolelle voi kuitenkin kestää kauan. (19)



Kuva 15. Kaukolämmön ja teollisuuslämmön tuotanto polttoaineittain 2000-2017 Suomessa

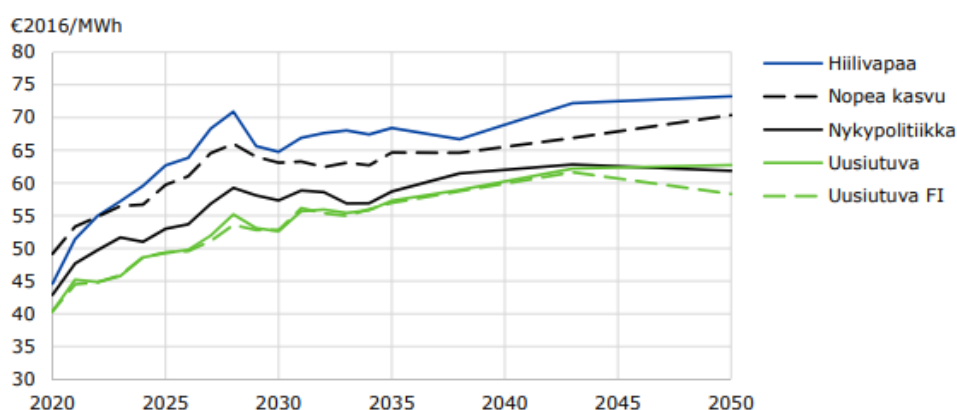
Kaukolämpö on kiinteistölle helppo ratkaisu. Kaukolämpö soveltuu käytännössä kaikille lämmönjakotavoille, joskaan se ei ole välttämättä taloudellisin vaihtoehto mm. lattialämmityksessä, jossa pystytään hyödyntämään matalampia lämpötiloja korkeammalla hyötysuhteella. Lämmön saatavuuden varmuus, energiatehokkuus ja sen myötä alhainen energiamuotokerroin ja vaivattomuus tekevät kaukolämmöstä varman vaihtoehdon. Kaukolämmitysjärjestelmää ei tarvitse säätää itse, se on lähes huoltovapaa ja hinta on vakaa. Kaukolämmön hiilidioksidipäästöt ovat kuitenkin keskimäärin korkeammat kuin muiden lämmitysmuotojen.

5.5 Suora sähkölämmitys

Suora sähkölämmitys on harvinainen lämmitysmuoto suomalaisissa kerrostoiloissa. Yleensä sähköä voidaan käyttää varalämmitysmuotona mm. kaukolämmön rinnalla. Joissain tapauksissa sähköä voidaan käyttää esimerkiksi apulaitteiden energiantarpeisiin tai märkätilojen lattialämmitykseen. Laskentakohteessa oli

oletettu sähköinen lattialämmitys kaikkiin märkätiloihin, mutta osuus koko lämmityksestä oli verrattain todella pieni, noin 5,5 % koko ostoenergiasta.

Sähkölämmityksen alkuinvestointi on pienempi kuin kaukolämmössä, mutta kulutetun energian hinta on korkeampi. Sähkön hinnan oletetaan myös nousevan tulevaisuudessa (ks. Kuva 16).



Kuva 16. Skenaarioiden mukaiset sähkön hinnat Suomessa.

Sähkön energiamuotokerroin on 1,2 (14) , joka on huomattavasti korkeampi kuin kaukolämmön (0,5). Jos sähköä käytettäisiin ainoana lämmitysmuotona ei päästäisi vaadittuihin E-luvun raja-arvoihin, jollei rakennus muuten olisi erittäin energiatehokas. Energiatehokkuuteen pyritäessä suora sähkölämmitys ei edes harkittaisi vaihtoehtona. Hiilidioksidipäästöiltään sähkö näyttää kuitenkin paremmalta, kuin kaukolämpö. Verkkosähkö Suomessa 2020 – 2070 arvio hiilijalanjäljestä on 0,048 kg CO²E/kWh, kun taas kaukolämmöllä vastaava arvio Joensuussa on 0,15 kg CO²E/kWh (ilman tulevaisuuden päästöjen vähennyksen huomiointia). Kaukolämmölle 2020-2070 tuotannon päästöt huomioiva arvo on sen sijaan 0,071 kg CO²E/kWh. Tietojen lähteenä ”Rakennusten hiilijalanjäljen arviointimenetelmä”.

6 Yhteenveto

Laskentapalvelujen ja IDA ICE :n tulokset vaikuttivat olevan oikeassa kokoluokassaan, joskin molemmat tuntuivat antavan ehkä hieman todellista korkeampia tuloksia. Tosin tarkastelun kannalta kyseiset korkeammat arvot ovat varmemmalla puolella kuin keskimääräisesti matalammat. Tulokset muuttuivat odotettuihin suuntiin tehdyillä toimenpiteillä.

Laskentakohteen suunnitelmissa todettiin, että rakennus soveltuisi rakenteiltaan matalaenergiakerrostaloksi. Kuitenkin lähtötietojen perusteella konsepti kerrostalo olisi saamassa C-luokan energiatodistuksen. Pelkillä rakenteiden muutoksilla ei normaalista talosta muututa matalaenergia taloksi. Luokitukseen B on kuitenkin suhteellisen helppo päästä mm. eristämällä lämpimän käyttöveden kierto, sijoittamalla paremman vuosihyötysuhteen omaavaan ilmastointikoneeseen, investoimalla parempiin ikkunoihin tai suojaamalla ikkunoita auringolta (passiivinen tai aktiivisena aurinkosuojauksena) ja kiinnittämällä huomiota rakennuksen tiiveyteen suunnittelu- ja rakennusvaiheessa.

Omavaraisella sähkö- tai lämpöenergialla E-lukua pystyisi parantamaan, joskin investoinnin kokonaiskannattavuus pitäisi tarkastaa käyttöiän ajalle. Rakennuksen sähkönkäyttöä pienentämällä vaikutetaan eniten sen E-lukuun. Tällä hetkellä kuitenkin sähkön energiamuotokerroin on aivan liian jyrkkä, varsinkin jos rakennuksessa suunniteltaisiin käytettävän vain ns. nollahiilisähköä, joka on tuotettu osittain tai kokonaan uusiutuvista energianlähteistä. Sähkön käyttöön pystyisi vaikuttamaan mm. valitsemalla märkätiloihin vesikiertoisen lattialämmityksen sähköisen sijaan, jonka lämmitykseen käytettäisiin kaukolämpöä tai vaihtoehtoisesti omavaraista energiaa, mm. maalämpö.

Rakennuksen suunnitteluvaiheessa olisi jo hyvä kiinnittää huomiota ikkunapinta-alan määrään, ikkunoiden suuntaamiseen ja aurinkosuojausvaihtoehtoihin. Laskentakohteen jäähdystarve oli pieni rakennuksen kokonaisenergian kulutukseen nähden. Ikkunoiden pienentämisellä huomattiin olevan vähentävä vaikutus sekä jäähdytys- että lämmityskuluihin. Ikkunapinta-alan pienentämisellä ja

auringolta suojaamisella voitaisiin välttyä jäähdytyskuluilta kokonaan, eikä jäähdytysjärjestelmään tarvitsisi investoida. Ilmaston lämpenemistä ja tulevaisuutta ajatellen on kuitenkin hyvä pitää jäähdytysmahdollisuus mielessä potentiaalisena vaihtoehtona.

Projektin alkupuolella osa käytetyistä arvoista on eroavia nykyisten standardien tai asetusten kanssa. Myöhemmin virheet on todettu, mutta aika ei riittänyt kaikkien laskujen sekä simulaatioiden tekemiseen uudelleen. Näistä päällimmäisenä tekijänä pinta-alan määrittäminen Laskentapalvelujen energialaskurissa. Lämmitetty nettoala on laskelmissa asuinhuoneistojen yhteenlaskettu pinta-ala, joskin lämmitettyyn nettoalaan olisi voinut huomioida osan kellarikerroksesta lisänä. Tällöin myös ilmamäärät sekä sisäisten lämpökuormien määrät olisivat suuremmat laskentapalvelujen laskuissa ja vastaisivat paremmin IDA ICE :lla laskettuja tuloksia. Rakennuksen vaipan määrittämisessä otettiin kuitenkin huomioon mm. kellarikerros, porras- ja hissikuilu sekä porraskäytävät.

Lämpimän kiertoveden eristämistä olisi voinut parantaa laskelmissa. Parempi eristystaso (mm. 0,5 d tai 0,5 d + suojaputki) kahdessa ensimmäisessä simulaatiossa olisi laskenut LKV kierrosta aiheutuneita häviöitä huomattavasti. Passiiviratkaisussa lämpimän kiertoveden olisi voinut eristää vielä entistä paremmin (mm. 1,5 D). Rakenteiden lisäeristäminen todettiin pienentävän käytönajan energiankulutusta. Ainakin puuinfo.fi :n U-arvo laskurissa korjaustasoilla on myös iso merkitys. Vertailua voisi jatkaa vielä rakennusmateriaaleista aiheutuvien lisäkustannuksien ja oletetusti muuttuvan hiilijalanjäljen pohjalta.

Parvekkeiden lasitukset pystyttäisiin luultavasti ottamaan huomioon IDA ICE :n laskelmissa, jos parvekkeista tekisi omat (kylmät tai puolilämpimät) vyöhykkeet. Nykyisessä muodossaan simulaatiosta siis puuttuu ylimääräinen lasikerros, joka voisi vaikuttaa mm. tuuleen sekä auringonsäteilyyn. Myös parvekkeen uloimman lasin ja rakennuksen vaipan välissä oleva ilma toimii eristeenä. Työn aikarajoituksen vuoksi parvekkeita ei ryhdytty mallintamaan omina vyöhykkeinä vaan käytettiin julkisivuun sijoitettuja varjostavia parvekemalleja, joille pystyi määrittämään vain (kaiteen) korkeuden, syvyyden ja leveyden.

6.1 Laskentapalvelut.fi laskurin soveltuvuus energialaskentaan

D.O.F. Tech Oy :n ja Saint-Gobain Finland Oy :n tarjoama laskentapalvelu on tällä hetkellä lähes monopoli asemassa yksinkertaisen ilmaisten energialaskureiden joukossa. Muutamia muita kevyitä laskentaohjelmia on saatavilla, mutta ne ovat ainakin tällä hetkellä päivityksiä vailla. Parantamisen varaa on laskentapalveluiden tarjoamassa e-luku laskurissa, mutta se ajaa asiansa.

Luvussa 2.9 kävi jo ilmi aurinkosuojauksen heikko määrittäminen ohjelmassa, mutta laskentapalvelulla onnistuu yksinkertaisten laskujen tekeminen. Laskurin käyttö on helppoa ja nopeaa. Energiatodistuksen saa käytännössä kohteesta kuin kohteesta ennen kuin IDA ICE :lla on edes aloitettu laskennan tekeminen. Laskennan tarkkuudelta ei vaadita nykyisellään paljon, mutta tulevaisuudessa, jos esim. hiilijalanjälkilaskentaa, tarkempia energiaselvityksiä tai vaikka jäähdytyslaskentoja pitää tehdä, eivät nykyisessä muodossaan olevat laskentapalvelut riitä laskentaan.

6.2 IDA ICE-ohjelman soveltuvuus energialaskentaan

Ohjelmistona IDA ICE tarjoaa kattavat mahdollisuudet erittäin tarkkaan energialaskentaan. Ohjelmaan pystyy tuomaan IFC-tiedoston, joka sisältää kaiken tarpeellisen mallin tekemiseksi, jonka pohjalta laskennan voi aloittaa. Kuitenkin verrattain ison rakennuksen saattaminen laskentakelpoiseksi on työlästä, ainakin jos vertaa muihin saatavilla oleviin vaihtoehtoihin, kuten laskentapalvelut.fi:n tarjoamaan energialaskuriin.

IDA ICE:n tämänhetkinen suurin kompastuskivi on sen muistin käyttö varsinkin isojen kohteiden tai monimutkaisien järjestelmien simuloinnissa. Ohjelma on rakennettu 32-bittiseen ympäristöön, jolloin käytössä olevaa välimuistia on vain 2 GB. IDA ICE on kuitenkin jaettu kahteen eri ohjelmaan, IDA modeler:iin sekä IDA solver:iin. Käytössä on siis yhteensä 4 GB muistia, joskin vain noin puolet tästä pystyy hyödyntämään simulaatioissa. Muistin riittämättömyys johtaa usein

ohjelman kaatumiseen ja hukattuun aikaan. Ohjelmalle on luvattu päivitys 64-bit-tiseen ympäristöön, jolloin välimuistin ongelmat vähentyisivät. (20)

Muistin säästämiseksi pystyy mallinnuksessa optimoimaan kuitenkin mallia useilla tavoin, jolloin tarkkuus yleensä heikentyy, mutta simulointiajat pienentyvät. Näitä eri tapoja ovat mm.: Vyöhykkeiden ja ikkunoiden yhdistely.

- Vyöhykekertoimien käyttö. Jos rakennuksessa on samanlaisia huoneita samoilla suuntauksilla, voidaan simuloida vain yksi huone ja asettaa tälle huoneelle kerroin sen mukaan, kuinka monta vastaavaa huonetilaa rakennuksessa on. Ongelmana tässä vaihtoehdossa on vääristyneet mittasuhteet rakennuksessa, mm. rakennuksen vaipan alassa ei oteta kertoimilla laskettuja vyöhykkeitä huomioon.
- Simuloinnin resoluutioiden pienentäminen, eli tarkkuuden heikentäminen.
- Simulaation rinnakkain ajo. Käytännössä tämä vaihtoehto ei heikennä tuloksien tarkkuutta, vaan käyttää tehokkaammin tietokoneen prosessorin laskutehoa. Simuloinnin ollessa käynnissä työskentely voi olla samalla tietokoneella ongelmallista.

Energialaskentaa tehdessä uudiskohteille, joille on mallinnettu kohteet 3-D ympäristössä, on siirtäminen IDA ICE-ohjelmaan helpohkoa. Vanhempien rakennusten kohdalla IDA :lla laskennan suorittaminen voi olla todella työlästä, varsinkin jos kohteesta ei ole piirustuksia digitaalisessa muodossa.

Ohjelmassa tuli vastaan useita pieniä parantamisen kohtia, kuten mm. väärin arvojen syöttäminen voi kaataa ohjelman kokonaan. Selvemmin tämä kävi ilmi mm. eri pinta-alojen ja sijaintien määrittämisessä (ikkunoiden koko, lattialämmityspiirin koko tai sijainti yms). Erinäisiä pinta-aloja on ohjelmassa myös vaikea määrittää, koska ohjelma tökkii vastaan jokaisen liikkeen jälkeen. Seinän, katon tai lattian editorissa työskentely on erittäin haastavaa, jos tilaan pitää lisätä mm. lattialämmityspiiri. Piiriä ei pysty pyörittämään tai muotoa muokkaamaan muuten, kuin syöttämällä suhteelliset koordinaatit numeroina ohjelmaan.

7 Lähdeluettelo

1. D.O.F. Tech Oy ja Saint-Gobain Finland Oy. Laskentapalvelut. [Online] D.O.F. Tech Oy ja Saint-Gobain Finland Oy, 11. 3 2018. [Viitattu: 13. 8 2019.] <https://www.laskentapalvelut.fi/>.
2. Ilmatieteen laitos. Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa. [Online] Ilmatieteen laitos, 19. 11 2018. [Viitattu: 13. 8 2019.] <https://ilmatieteenlaitos.fi/energialaskennan-testivuodet-nyky>.
3. Ympäristöministeriö. *Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta*. Helsinki : Ympäristöministeriö ja Suomen säädöskokoelma, 2017. 1010/2017.
4. Puuinfo. Puurakenteen U-arvon määrittäminen. [Online] Puuinfo, 31. 1 2012. [Viitattu: 13. 8 2019.] <https://www.puuinfo.fi/mitoitusohjelmat/puurakenteen-u-arvon-m%C3%A4%C3%A4ritt%C3%A4minen>.
5. Ympäristöministeriö. *Ympäristöministeriön asetus rakennusten vesi- ja viemärilaitteistoista*. Helsinki : Ympäristöministeriö ja Suomen säädöskokoelma, 2017. 1047/2017.
6. —. *Ohje, Energiatehokkuus - Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta*. Helsinki : Ympäristöministeriö ja rakentamismääräyskokoelma, 2018. 1010/2017.
7. Energiatehokas koti -hanke. Suuntaa-antavia ohjearvoja. [Online] Motiva Oy, 26. 2 2016. [Viitattu: 12. 8 2019.] https://www.energiatehokaskoti.fi/perustietoa/hyva_tietaa/suuntaa-antavia_ohjearvoja.
8. Ympäristöministeriö. *Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta*. Helsinki : Ympäristöministeriö ja Suomen säädöskokoelma, 2017. 1009/2017.
9. Gps-Coordinates.net. GPS Coordinates with Google maps. [Online] Gps Coordinates, 12. 8 2019. [Viitattu: 12. 8 2019.] <https://www.gps-coordinates.net/>.
10. Equa Simulation Oy. Suomi lokalisointi opas. [Online] Equa Simulation Oy, 1. 4 2018. [Viitattu: 12. 8 2019.] <http://forum.equa.se/upfiles/1524035353954112.pdf>.
11. Motiva. Laskukaavat: Lämmin käyttövesi. [Online] Motiva, 6. 2 2019. [Viitattu: 12. 8 2019.] https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kiinteiston_energiankaytto/kulutuksen_normitus/laskukaavat_lammin_kayttovesi.
12. Motiva . Energiatodistuksen lukuohje. [Online] Motiva, 30. 11 2017. [Viitattu: 12. 8 2019.] http://energiatodistus.motiva.fi/energiatodistustenlaatijat/aineistot/energiatodistus_2018_lukuohje_tulostukseen.pdf.

13. Ympäristöministeriö. *Tasauslaskenta opas 2018*. s.l. : Ympäristöministeriö, 2017.
14. Valtioneuvosto. Rakennusten energiamuutokertoimet uudistettu. [Online] Valtioneuvosto, 11. 30 2017. [Viitattu: 12. 8 2019.] https://valtioneuvosto.fi/artikkeli/-/asset_publisher/energiformsfaktorerna-for-byggnader-har-setts-over.788/2017.
15. Finsolar. Aurinkolämpöjärjestelmien hintatasot ja kannattavuus. [Online] Finsolar, 26. 9 2016. [Viitattu: 12. 8 2019.] <http://www.finsolar.net/aurinkoenergian-hankintaohjeita/aurinkolampojarjestelmien-hintatasot-ja-kannattavuus-suomessa/>.
16. Oksanen, Henri. Asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän optimointi uudis- ja korjausrakentamiskohteissa. [Online] 12. 1 2015. [Viitattu: 12. 8 2019.] https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/15096/master_Oksanen_Henri_2015.pdf?sequence=1..
17. Burnett, Michael. Energy Storage and the California "Duck Curve". [Online] Stanford University, 1. 6 2016. [Viitattu: 13. 8 2019.] <http://large.stanford.edu/courses/2015/ph240/burnett2/>.
18. Gebwell Oy. Maaviilennys. [Online] Gebwell Oy, 1. 1 2017. [Viitattu: 12. 8 2019.] <https://www.gebwell.fi/maalampo/maajaahdytys/>.
19. Vuorinen, Asko. *Loviisan ydinkaukolämmön kannattavuusselvitys 1/2019*. Espoo : Ekoenergy Oy, 2019.
20. Tibbelin, Emelie. Equa user forum (vaatii kirjautumisen). [Online] Equa Simulation Ab, 15. 8 2019. [Viitattu: 15. 8 2019.] <https://forum.equa.se>.
21. Jorma Säteri, Mervi Ahola. Sisäilmastoluokitus 2018. [Online] 1. 5 2018. [Viitattu: 13. 8 2019.] http://glt.rts.fi/wp-content/uploads/2018/05/Sis%C3%A4ilmastoluokitus2018-14052018_Jorma-S%C3%A4teri.pdf. RT 07-11297, LVI 05-10627, SIT 05-610148, Ratu 443-T, KH 27-00659.