



SunZEB – Plusenergiaa kaupungissa

Uusiutuvaa energiaa asumiseen ja toimistoon

Jari Shemeikka | Kimmo Lylykangas |
Jaakko Ketomäki | Ismo Heimonen |
Sakari Pulakka | Petri Pylsy



SunZEB – Plusenergiaa kaupungissa

Uusiutuvaa energiaa asumiseen ja toimistoon

Jari Shemeikka, Jaakko Ketomäki, Ismo Heimonen & Sakari Pulakka

VTT

Kimmo Lylykangas

Arkkitehtuuritoimisto Kimmo Lylykangas oy

Petri Pylsy

Kiinteistöliitto



ISBN 978-951-38-8296-9 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

VTT Technology 219

ISSN-L 2242-1211

ISSN 2242-122X (Verkkójulkaisu)

Copyright © VTT 2015

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

PL 1000 (Tekniikantie 4 A, Espoo)

02044 VTT

Puh. 020 722 111, faksi 020 722 7001

Teknologiska forskningscentralen VTT Ab

PB 1000 (Teknikvägen 4 A, Esbo)

FI-02044 VTT

Tfn +358 20 722 111, telefax +358 20 722 7001

VTT Technical Research Centre of Finland Ltd

P.O. Box 1000 (Tekniikantie 4 A, Espoo)

FI-02044 VTT, Finland

Tel. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7001

Alkusanat

Tämä on projektin “Plusenergiaa kaupungissa” (SunZEB) loppuraportti. Projektia rahoittivat Helen Oy, Energiateollisuus ry, Fortum Oyj, Helsingin kaupunki, Hyvinkään Lämpövoima Oy, Projectus Team Oy, Rakennustuoteteollisuus ry, Senaatti-kiinteistöt, Skaala Oy, Tampereen Sähkölaitos Oy, Turku Energia Oy, Työ- ja elinkeinoministeriö Uponor Oyj ja Ympäristöministeriö. Projekti toteutettiin 1.4.2014 – 31.3.2015 aikana.

EU:n asettamana tavoitteena on siirtyä lähes nollaenergiatalon kaltaiseen uudisrakentamiseen viimeistään 2020-luvun lopulla. Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi EPBD:n mukaan kaiken uudisrakentamisen on oltava lähes nollaenergiarakentamista vuoden 2020 jälkeen eli vuoden 2021 alusta alkaen. Tällä tulee olemaan merkittäviä vaikutuksia kaukolämpitettyyn rakennuskantaan Suomessa. Tällä hetkellä kansallinen määritelmä ”lähes nollaenergialle” on tekemättä. Tämä projekti tukee määrittelytyötä tutkimalla tiiviin kaupunkirakenteen tuomia uusia mahdollisuuksia uusiutuvien energioiden hyödyntämiseen, energiavirtojen innovatiiviseen kierrättämiseen ja päästöjen vähentämiseen.

Hankkeen tavoitteena oli esittää tiiviissä kaupunkirakenteessa toimivan yhdistetyn kaukolämpö- ja jäähdytysjärjestelmän piirissä olevan uudisrakennuksen suunnitteluratkaisu, jolla on suurin mahdollinen uusiutuvan energian hyödyntämispotentiaali. Lisäksi tarkasteltiin ratkaisun vaikutusta korjausrakentamisen uusiutuvan energian määrään aluetasolla laskemalla skenaarioita rakennuskannan eri korjausasteilla. Suunnitteluratkaisusta käytetään nimeä SunZEB.

Tuloksena saatiin vastaus kysymykseen: ”Millainen on kaukolämmitetyn ja –jäähdytetyn alueen suunnitteluratkaisu, jossa on otettu huomioon rakennuksen oman energiankäytön lisäksi myös yhdyskuntarakenteen innovatiivisen energian takaisinkierrätyksen ja uudelleenkäytön tuomat mahdollisuudet uusiutuvien energioiden lisäämisessä ja päästöjen vähentämisessä.”

Koko tutkimuksen projektijohtajana ja ideoijana toimi Jouni Kivirinne Helen Oy:stä. Hankkeen projektipäällikkönä VTT:llä toimi Jari Shemeikka. SunZEB -aurinkoarkkitehtuuri-suunnittelusta vastasi Arkkitehtuuri-toimisto Kimmo Lylykangas, optimaalisen energiaratkaisun energiasimuloinnin toteutti tutkija Jaakko Ketomäki (VTT), SunZEB-ratkaisun elinkaarikustannusvaikutukset laski Sakari Pulakka (VTT), energiavirtojen kierrätysratkaisut ja uusiutuvan energian määrän laski Ismo Heimo-

nen (VTT) ja SunZEB-ratkaisun CO₂-päästöjen skenaariotarkastelut aluetasolla teki Petri Pylsy (Kiinteistöliitto) Aalto yliopiston tohtorinväitöstyönsä osana.

Työtä ohjasi johtoryhmä, johon kuuluivat:

Jouni Kivirinne, Helen Oy
Antti Kohopää, Energiateollisuus ry
Ville Vastamäki, Helsingin kaupunki
Jyrki Kauppinen, Ympäristöministeriö
Juha Luhanka, Rakennustuoteteollisuus ry
Jari Shemeikka, sihteeri, VTT

Johtoryhmän lisäksi hankkeessa oli rahoittavien yritysten sekä eri sidosryhmäedustajien muodostama ohjausryhmä, joka antoi arvokasta palautetta hankkeen aikana. Lisäksi SunZEB-ratkaisun teknisiä yksityiskohtia pohdittiin yritysten ja tutkijoiden muodostamissa työryhmissä.

Tekijät ja VTT esittävät lämpimät kiitokset johtoryhmälle ja ohjausryhmälle hankkeen aikana saadusta palautteesta.

Espoo 31.3.2015

Tekijät

Sisällysluettelo

Alkusanat	3
1. Johdanto	7
2. Aurinkoarkkitehtuuri	9
2.1 SunZEB-arkkitehtuurin periaatteet	9
2.1.1 Tilaratkaisut.....	10
2.1.2 Julkisivun aukotus ja ikkunaratkaisut	10
2.1.3 Varjostavien julkisivurakenteiden mitoitus.....	12
2.1.4 Talotekniikka	16
2.1.5 Käyttäjakohtaisesti säädettävät varusteet	17
2.2 SunZEB-asuinkerrostalo	18
2.3 SunZEB-toimisto	21
2.3.1 Päivänvalo-olosuhteet toimistohuoneessa	25
2.3.2 Sisäolosuhteet	27
2.4 Kaupunki- ja korttelirakenteen vaikutus.....	29
3. SunZEB ratkaisujen energiaominaisuudet	34
3.1 Alustavat simuloinnit ja talotekniset ratkaisut	35
3.1.1 Toimistorakennus.....	35
3.1.2 Asuinkerrostalo	36
3.1.3 Ikkunat	36
3.1.4 LVI-tekniikka	36
3.1.5 Simuloitujen SunZEB _v erot SunZEB-rakennuksiin verrattuna.....	37
3.2 Asuinkerrostalo.....	37
3.2.1 Tilojen kuormitukset simuloinneissa.....	37
3.2.2 Ilmanvaihto.....	37
3.2.3 Kerrostalon simulointimalli	38
3.2.4 Kerrostalon energiantase	39
3.2.5 Sisäolosuhteet	41

3.3	Toimistorakennus	42
3.3.1	Tilojen kuormitukset simuloinneissa.....	42
3.3.2	Ilmanvaihto.....	43
3.3.3	Toimiston simulointimalli	43
3.3.4	Toimiston energiatase.....	45
3.3.5	Sisäolosuhteet	46
3.4	Talotekniikan kehitystarpeet.....	47
3.5	Energiavirtojen kierrätys ja uusiutuva energia	48
3.5.1	Uusiutuvan energian osuus asuinkerrostalossa ja toimistossa SunZEB-ratkaisulla	48
3.6	Ilmastonmuutoksen vaikutus SunZEB-ratkaisun energiankäyttöön 2030... 50	
4.	Elinkaarikustannustarkastelut	54
4.1	Asuinkerrostalo.....	55
4.2	Toimistorakennukset	56
4.3	Johtopäätöksiä	58
5.	SunZEB ratkaisun vaikutukset aluetasolla	60
5.1	Helen Oy:n tuotantorakenne	61
5.2	Helen Oy:n nykyisten asiakasryhmien tuntitason kulutusprofiilit	63
5.3	Tarkastellut skenaariot ja niiden kuvaukset.....	67
5.3.1	Uudisrakentaminen	67
5.3.2	Korjausrakentaminen	69
5.3.3	Energiantuotanto.....	70
5.4	Alueen vaikutukset eri skenaarioilla.....	72
5.4.1	Uudisrakentaminen	72
5.4.2	Korjausrakentaminen	76
6.	Yhteenveto ja johtopäätökset	81
	Lähdeluettelo	85

Liitteet

Liite A: Simuloitujen rakennusten tekniset yksityiskohdat

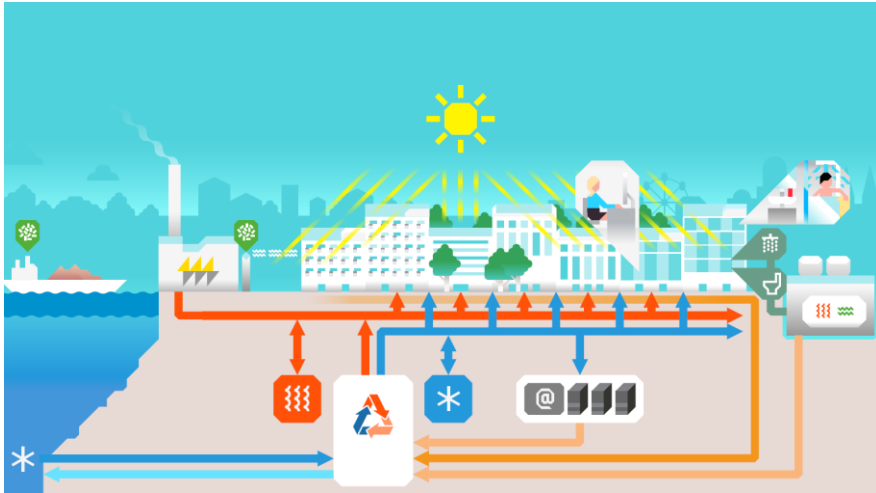
Liite B: Kustannuslaskennan yksityiskohdat

Liite C: Skenaariotarkasteluiden lähtötietoja

1. Johdanto

EU:n asettamana tavoitteena on siirtyä lähes nollaenergiatalon kaltaiseen uudisrakentamiseen viimeistään 2020-luvulle tullessa. Lisäksi rakennusten peruskorjauksissa tulee kiinnittää erityistä huomiota energiatehokkuuden parantamiseen ja päästöjen vähentämiseen. Tällä tulee olemaan merkittäviä vaikutuksia kaukolämpölämmitetyn rakennuskantaan Suomessa. Tällä hetkellä kansallinen määritelmä ”lähes nollaenergia”-rakennukselle on tekemättä, joskin taustatyö määräysten valmistelulle on tehty (FlnZEB 2015). Yleisesti ”lähes nollaenergiarakennuksella” tarkoitetaan rakennusta, jolla on erittäin korkea energiatehokkuus. Tarvittava lähes olematon tai erittäin vähäinen energian määrä tulee kattaa uusiutuvista lähteistä peräisin olevalla energialla, mukaan lukien paikan päällä tai rakennuksen lähellä tuotettava uusiutuvista lähteistä peräisin oleva energia. Tässä raportissa esitetään yksi vaihtoehtoinen ratkaisu kaukolämpölämmitetyn nollaenergiarakennuksen uusiutuvan energian tuotannolle ja selvitetään eri vaihtoehtojen kokonaisvaikutukset. Tässä ratkaisussa kuvataan rakennus, jonka rakennussuunnittelussa otetaan huomioon tiiviin kaupunkirakenteen tuomat mahdollisuudet integroidun kaukolämmityksen ja –jäähdytyksen käyttöön energiavirtojen kierrättämisessä uusiutuvana energiana. Ratkaisu sopii erityisesti sellaisiin kaupunkeihin, joissa uusiutuvan energian paikallinen saanto on rajoitettua kaupunkitilan rajoitteista johtuen.

Ratkaisun lähtökohtana on aurinkoarkkitehtuurilla suunniteltu energiatehokas ja sisäolosuhteiltaan laadukas rakennus, joka kytketään aluetason kaukolämmitys- ja jäähdytysverkkoon, mikä mahdollistaa rakennuksesta kerätyn jäähdytysenergian kierrättämisen aluelämpöpumpulla uusiutuvana energiana takaisin kaukolämpöverkkoon (kuva 1). Tutkimuksessa valittiin tarkasteluun asuinkerrostalo ja toimistotalo. Lisäksi tarkasteluun valittiin myös kaupunkirakenteen ja ilmastonmuutoksen näkökulma, jotta ratkaisun pitkäaikaisvaikutukset sekä sopivuus eri rakentamispaikoille tulisi otettua huomioon.



Kuva 1. Tiiviin kaupunkirakenteen integroitu kaukolämmitys- ja kaukojäähdytysjärjestelmä, jossa energiavirtojen kierrätys eri käyttötarkoituksiin on mahdollista (Helen Oy)

Työmenetelmänä hankkeessa valittiin rakennuksen käyttäjälähtöisen aurinkoarkkitehtuurin (Kappale 2) uudelleenajattelu yhdessä energia- ja sisäolosuhtesimulointien kanssa (Kappale 3), mikä mahdollistaa optimaalisen uusiutuvan tuotannon jäähdytysenergiana ja samalla hyvät olosuhteet toimistojen ja asuinkerrostalon käyttäjille. Lopuksi selvitettiin kehitetyn ratkaisun elinkaarikustannustehokkuus (Kappale 4) sekä toimivuus energiajärjestelmä- ja rakennuskantatasolla päästövaikutusten arvioimiseksi sekä rakennusten uudistuotannossa että korjausratkaisuissa (Kappale 5). Case-alueena tutkimukseen valittiin Helsinki. SunZEB-konseptin mukaisia rakennuksia verrattiin sisäolosuhteiltaan ja tiloiltaan vastaavan laisiin nykyisin käytössä olevilla menetelmillä rakennettuihin verokkirakennuksiin (SunZEB_v).

Tulokset mahdollistavat uutta ja kasvavaa liiketoimintaa kotimaassa sekä erityisesti vientiin eri arvoketjun jäsenille (rakennustuoteteollisuus, arkkitehtuuri, talotekniikka, energiateollisuus), erityisesti talotekniikan ja lasirakenteiden suunnitteluun kiinnitettiin huomiota. Teknisten ratkaisujen valintojen lähtökohtana oli yksinkertaisuus ja kustannustehokkuus, jotta konseptin kaupallistamisen esteitä ei olisi.

2. Aurinkoarkkitehtuuri

SunZEB-konseptin tavoitteena on hyödyntää auringon energia mahdollisimman tehokkaasti. Jos tarkastelut tehdään ainoastaan yhden rakennuksen tasolla, auringon lämpökuormista on yleensä hyötyä vain lämmityskauden aikana. Järjestelmätason tarkastelut osoittavat, että sisätiloista jäähdyttämällä poistettu lämpö voidaan käyttää hyödyksi toisaalla. Rakennusta ei kuitenkaan voida suunnitella pelkästään mahdollisimman tehokkaaksi aurinkokeräimeksi. Samalla, kun konsepti mahdollistaa verrattain suuret ikkunapinnat ja tilojen valoisuuden, huolehditaan siitä, että erinomaiset sisäolosuhteet voidaan varmistaa kaikissa tilanteissa. SunZEB-konseptissa arkkitehtisuunnittelun pääperiaatteena on auringon lämpösäteilyn ohjaaminen hallitusti sisätiloihin.

2.1 SunZEB-arkkitehtuurin periaatteet

Suunnittelun lähtökohtana on rakennuspaikan analysointi sekä lämpökuormien hallinnan huomioiminen systemaattisesti suunnitteluratkaisuissa. Auringonsäteilyn hyödyntäminen perustuu neljään suunnitteluperiaatteeseen:

- 1) Rakennukseen suunnitellaan riittävän laaja ikkunapinta-ala viihtyisien ja valoisien sisäolosuhteiden luomiseksi. Ikkunoissa käytetään ikkunatyyppejä, jossa lasiosan U-arvo on erittäin matala ja samalla lasin g-arvo on verrattain korkea (ei auringonsuojakalvoa).
- 2) Auringon lämpökuormahuiput leikataan oikein mitoitetuilla julkisivurakenteilla. Varjostus perustuu ensisijaisesti kiinteisiin julkisivurakenteisiin. Säädetäviä tai ohjattavia julkisivurakenteita käytettäessä on varmistettava järjestelmän toimivuus kaikissa olosuhteissa.
- 3) Yliämpeneminen estetään kaukojäähdytykseen perustuvalla jäähdytysjärjestelmällä, jonka avulla auringon lämpöenergia voidaan käyttää hyödyksi toisaalla.
- 4) Sisätiloissa häikäisyltä ja yliämpenemiseltä suojaudutaan lisäksi käyttäjäkohtaisesti säädettävillä varusteilla, kuten kaihtimilla tai verhoilla.

SunZEB-hankkeessa toteutetut simulaatiotarkastelut osoittivat, että jäähdytysjärjestelmä ei yksin riitä estämään sisälämpötilojen yllämpenemistä, kun ikkunapinta-ala on verrattain suuri. Edellä kuvattujen ratkaisujen yhtäaikaainen käyttö takaa sen, että hyvät sisäolosuhteet voidaan varmistaa myös mahdollisten häiriötilanteiden aikana. Mikäli sisälämpötilojen hallinta perustuisi yksinomaan jäähdytysjärjestelmään, luotaisiin rakennuksia, jotka ovat entistä riippuvaisempia talotekniikan toiminnasta.

Tilojen käyttötavoissa ja käyttäjäkohtaisissa mieltymyksissä on merkittäviä eroja, ja siksi on myös tärkeää myös varmistaa käyttäjän mahdollisuus vaikuttaa työskentely- tai asumisolosuhteisiinsa säätämällä esimerkiksi verhoa häikäisyn tai lämpösäteilyn torjumiseksi. Jo mahdollisuus käyttäjäkohtaiseen säätämiseen koetaan myönteisenä tekijänä.

Auringon lämpökuorman torjuminen ikkunapinta-alaa pienentämällä rajoittaisi mahdollisuuksia valoisien ja viihtyisien sisätilojen toteuttamiseen.

Auringon lämpökuormilta suojaudutaan usein lasiratkaisuilla. Siinä tapauksessa sisätiloihin pääsevän auringonsäteilyn osuutta ei voida ajallisesti kontrolloida. Lasitus leikkaa samalla tavoin eri kulmissa tulevaa säteilyä sekä lämmityskauden ulkopuolella että sen aikana. Kun aurinkosuojaus perustuu varjostaviin rakenteisiin, voidaan sisään pääsevän auringonsäteilyn määrään vaikuttaa myös ajallisesti.

Automaatiikan ohjaamalla, säädettävillä julkisivurakenteilla auringonsäteilyn määrä voidaan optimoida vaihtuvien olosuhteiden mukaan, mutta edellä kuvattu käyttäjäehtoisuus jää helposti toteutumatta. Liikkuvien julkisivuelementtien pitkäaikaiskestävyyden varmistaminen Suomen ilmasto-olosuhteissa on haastavaa. Automaatiikka lisää sähköenergiankulutusta ja olosuhteiden hallinnan riippuvuutta talotekniikkajärjestelmän toiminnasta.

2.1.1 Tilaratkaisut

SunZEB-konsepti ei vaikuta olennaisesti rajoittavan tilojen sijoittelua. Toteutetut energia- ja olosuhdesimulaatiot kuitenkin vahvistavat, että sisätilojen yllämpenemistä esiintyy kuitenkin helpommin pienissä huoneissa kuin laajoissa yhteistiloissa. Avotoimisto soveltuu siten paremmin SunZEB-konseptiin kuin erillisiin toimistohuoneisiin jaettu toimisto.

Auringon lämpökuormien hallitseminen on erityisen haastavaa itä- ja länsijulkisivuissa. On siis suositeltavaa välttää suurilla ikkunoilla varustettujen pienten huonetilojen suuntaamista itään tai länteen.

Kaupunkiympäristössä auringon lämpökuormat ovat suurimmat ylimmissä kerroksissa. Pieniä toimistohuoneita olisi edullista sijoittaa alimpiin kerroksiin lämpökuormien hallitsemiseksi.

2.1.2 Julkisivun aukotus ja ikkunaratkaisut

Aurinkoenergian passiivinen hyödyntäminen voi tuottaa merkittäviä säästöjä vielä niinkin pohjoisessa kuin Oulussa. Perinteisin menetelmin omakotitalon suunnittelu-

ratkaisut voidaan optimoida siten, että etelään suunnatun ikkunapinta-alan kasvataminen pienentää tilojen lämmitystarvetta. Tämä perustuu siihen, että lämmityskauden aikana ikkunoista saatava auringon lämpöenergia pienentää tilojen lämmitystarvetta enemmän kuin ikkunoiden pinta-alan muutos kasvattaa lämpöhäviöitä. Tämä mahdollisuus on toistaiseksi osoitettu vain pientaloissa. (Lylykangas et al. 2014).

SunZEB-hankkeessa toteutetuissa simulaatioissa vastaavaa tilannetta ei havaittu asuinkerrostalossa tai toimistotalossa. Toteutettujen simulaatioiden perusteella ikkunapinta-alan kasvattaminen nostaa asuinkerrostaloissa ja toimistorakennuksissa tilojen lämmitystarvetta ja kasvattaa myös investointikustannuksia. Toisaalta laajat ikkunapinnat voivat oikein toteutettuina lisätä tilojen viihtyisyyttä ja valoisuutta. Energiansäästöä voidaan saavuttaa valaistuksen sähkökulutuksessa. Toimistotilan viihtyisyys vaikuttaa myös työn tuottavuuteen, jolla voi olla merkittävä taloudellinen vaikutus. (Beck et al. 2011)

Ikkunan tai lasin g-arvo ilmoittaa auringonsäteilyn kokonaisläpäisyn, joka koostuu suorasta ja epäsuorasta säteilystä. Erityisesti toimistorakennusten aurinkosuojaus perustuu usein ikkunoihin, joissa sekä U-arvo että g-arvo ovat mahdollisimman pienet. Mitä useampi tasolasi lämpölaselementissä on, sitä pienempi sen g-arvo tyypillisesti on. U- ja g-arvon välillä ei kuitenkaan ole suoraa korrelaatiota. G-arvoa voidaan pienentää esimerkiksi auringonsuojakalvoilla. Esimerkkejä toimistotaloissa käytettävien lasiratkaisujen tyypillisistä g- ja U-arvoista on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Lasityyppien g- ja U-arvoja (Thalfeldt et al. 2013).

Lasityyppi	g-arvo	U-arvo
2K-lasi	0,61	1,1
2K-lasi, auringonsuoja	0,27	1,0
3K-lasi	0,49	0,54
3K-lasi, auringonsuoja	0,36	0,54
3K-lasi, auringonsuoja	0,24	0,54
4K-lasi	0,36	0,32
5K-lasi	0,24	0,21

Thalfeldt et al. tarkastelivat vuonna 2013 julkaistussa tutkimuksessaan toimistorakennusten optimaalisia ikkunaratkaisuja energiankulutuksen kannalta. Tutkimus keskittyi tarkastelemaan verrattain pieniä ikkunapinta-aloja, ja siinä ikkunalasien matalaa g-arvoa pidettiin hyvän energiatehokkuuden lähtökohtana.

SunZEB-konseptissa tavoitteena ei kuitenkaan ole auringon lämpökuorman minimointi. Tavoitteellisessa tilanteessa vältetään auringon lämpökuorman hetkelliset huiput ja saadaan sen sijaan sisätilaan hallittavissa ja ennakoitavissa oleva lämpökuorma, joka ei missään tilanteessa ylitä jäähdytyskapasiteettia.

Esimerkiksi toimistorakennuksen ikkunalasitusten g-arvo tulee valita tästä lähtökohdasta. Mikäli varjostava julkisivurakenne ei torju riittävästi lämpökuormia itä-

ja länsijulkisivulla, saattaa olla tarkoituksenmukaista käyttää niissä matalamman g-arvon lasitusta kuin eteläjulkisivussa.

Asuinrakennuksissa on tyypillisesti lasitettu parveke. Oikein käytettynä aurinkoiseen ilmansuuntaan suunnattu lasitettu parveke muodostaa puskurivyöhykkeen, joka parantaa rakennuksen energiatehokkuutta (Hilliaho 2010). Parvekelasitus leikkaa osan auringonsäteilystä. Kun lämpösäteilyn halutaan ulottuvan parvekkeen takana olevaan sisätilaan asti, parvekkeen taustaseinällä voidaan käyttää laajaa ikkunapintaa ja ikkunatyyppejä, jolla on verrattain korkea g-arvo. Samalla ikkunan lämmönläpäisykertoimen on kuitenkin oltava erinomainen, koska muuten lämpöhäviöt kasvavat hyötyjä enemmän laajemman ikkunapinta-alan myötä.

Matalan U-arvon ja korkean g-arvon yhdistelmä saavutetaan parhaissa passiivitaloikkunoissa, jotka ovat tyypillisesti ns. dk-ikkunoita. Tämä keskieuropalainen dk-ikkunatyyppejä on Suomessa vähemmän käytetty. Suomalaisista ikkunatyypeistä tarkoitukseen sopii kiinteästi lasitettu ikkunatyyppejä eli ns. MEK-ikkuna, esimerkkinä nelinkertaisella lämpölasilla varustettu Skaala Alfa ULEK_4K, jossa $U=0,58$ ja $g=0,42$. Tuuletusmahdollisuus on järjestettävä erillisellä avattavalla tuuletusikkunalla tai -luukulla.

Kun ikkunat suunnataan suoraan etelään, auringon lämpökuormia voidaan hallita hyvin vaakarakenteilla. Asuinrakennuksista sivukäytävätilo eli luhtitalo on lähtökohtaisesti yhteen ilmansuuntaan suuntautuva. Kun suuntaus on etelään ja ikkunat varjostetaan oikein mitoitettulla vaakarakenteella, auringon lämpökuorma pienentää tilojen lämmitystarvetta talvella, mutta kesän lämpökuormat ovat silti hallittavissa. Tarvittavan vaakarakenteen syvyys riippuu ikkunoiden korkeudesta sekä varjostavan rakenteen etäisyydestä ikkuna-aukon yläreunaan.

2.1.3 Varjostavien julkisivurakenteiden mitoitus

Aurinkokaavion (kuva 2) avulla voidaan tarkastella julkisivun vastaanottamaa auringonsäteilyä ja varjostavien rakenteiden vaikutusta. Kuvissa 2 ja 3 on esitetty esimerkkejä varjostavien julkisivurakenteiden vaikutuksesta sisätiloihin tulevaan auringonsäteilyyn eteläjulkisivussa Helsingissä sijaitsevassa rakennuksessa. Auringon säteilykulmat on esitetty kaaviossa, jossa radiaaliasteikko osoittaa auringon korkeusaseman. Kaaviossa katkoviivat osoittavat auringon päivittäisen kulun kesäpäivänseisauksena (20.–22.6.), talvipäivänseisauksena (21.–22.12.) sekä syys- ja kevätpäiväntasauksina (22.–23.9. ja 20.–21.3.).(NASA, New 2002) (Hilliaho 2010).

Kuvassa esitetyllä mitoituksella yllälämpenemis- ja haittähäikäisyongelmat ajoittuvat kevääseen ja syksyyn. Noin 40 asteen kulmassa varjostava vaakarakenne ikkunan yläpuolella torjuu kesällä keskipäivän auringonsäteilyn kokonaan. Alle 40 asteen kulmassa tulevasta säteilystä vaakarakenne torjuu osan. Mitä matalammalta aurinko paistaa, sitä suurempi osa siitä pääsee sisätilaan.

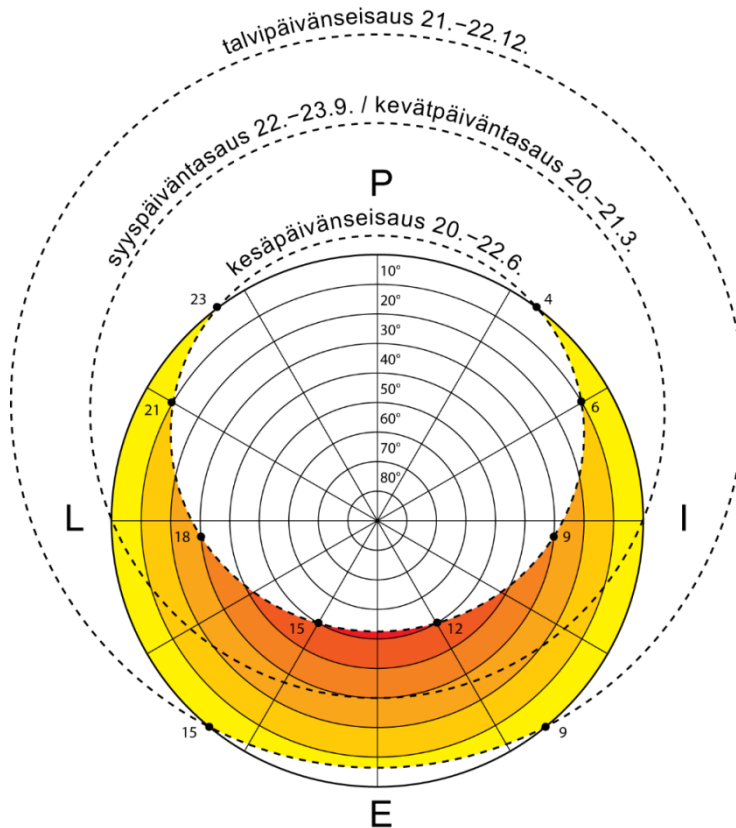
Kun kulma laskee alle 20 asteen, suora auringonsäteily alkaa aiheuttaa haittähäikäisyä istumakorkeudella. Kaavio osoittaa, että syys- ja kevätpäiväntasauksen aikaan aurinko paistaa alle 20 asteen kulmassa työpäivän alussa ja lopussa. Toisaalta aamu- ja iltaurinko kohtaa lasipinnan niin loivassa kulmassa, että lasin läpäisee vain pieni osa säteilystä. Talvipäivänseisauksen aikaan kaikki auringon-

säteily tulee alle 20 asteen kulmassa, mutta haittahäikäisyyden riski on vähäinen. Kaupunkirakenteessa ympäröivä rakennuskanta käytännössä torjuu hyvin matalalta lankeavan auringonsäteilyn.

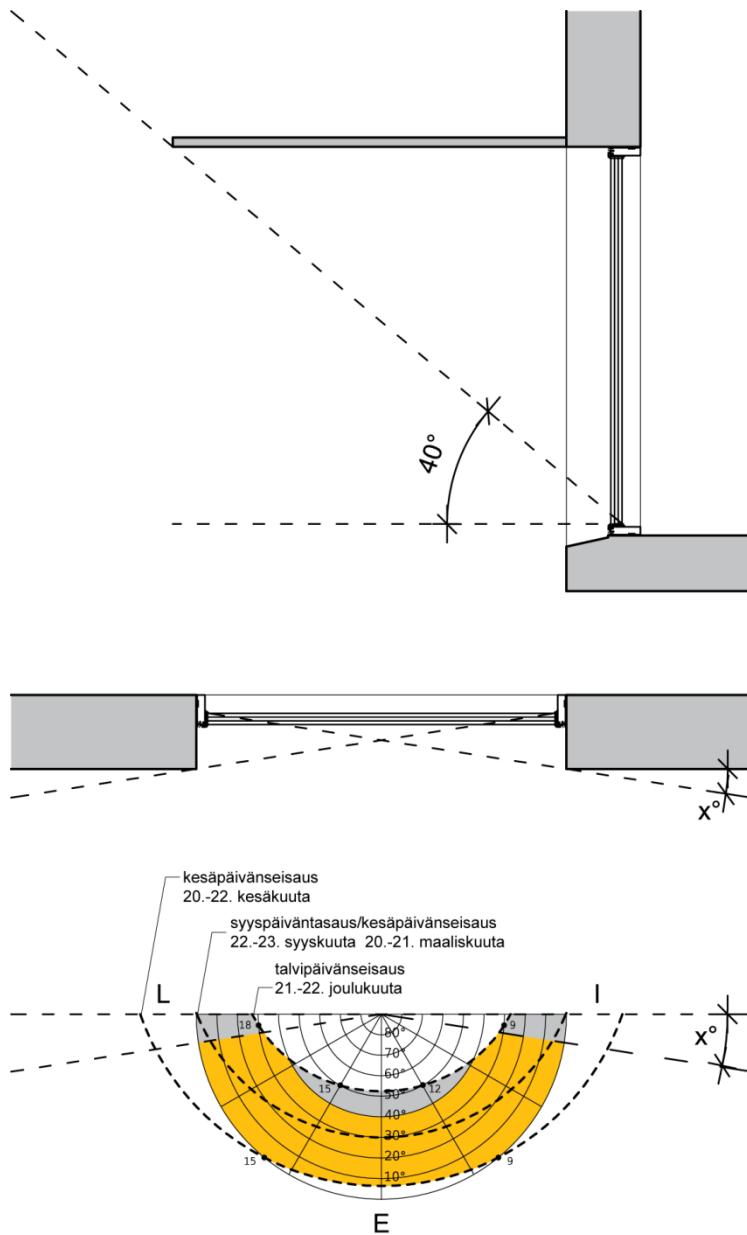
Varjostava vaakarakenne voidaan sijoittaa välittömästi ikkunan yläpuolelle, kun tavoitteena on ensisijaisesti vain torjua ylälämpenemistä.

Ikkunan asennussyvyys julkisivussa vaikuttaa sisätilaan pääsevän suoran säteilyn päivittäiseen alkamis- ja päättymisajankohtaan. Kuvassa 2 ikkunapielet ovat edellistä tapausta syvemmät, mutta tällä on vain vähäinen vaikutus sisään lankeavan auringonsäteilyn kokonaismäärään.

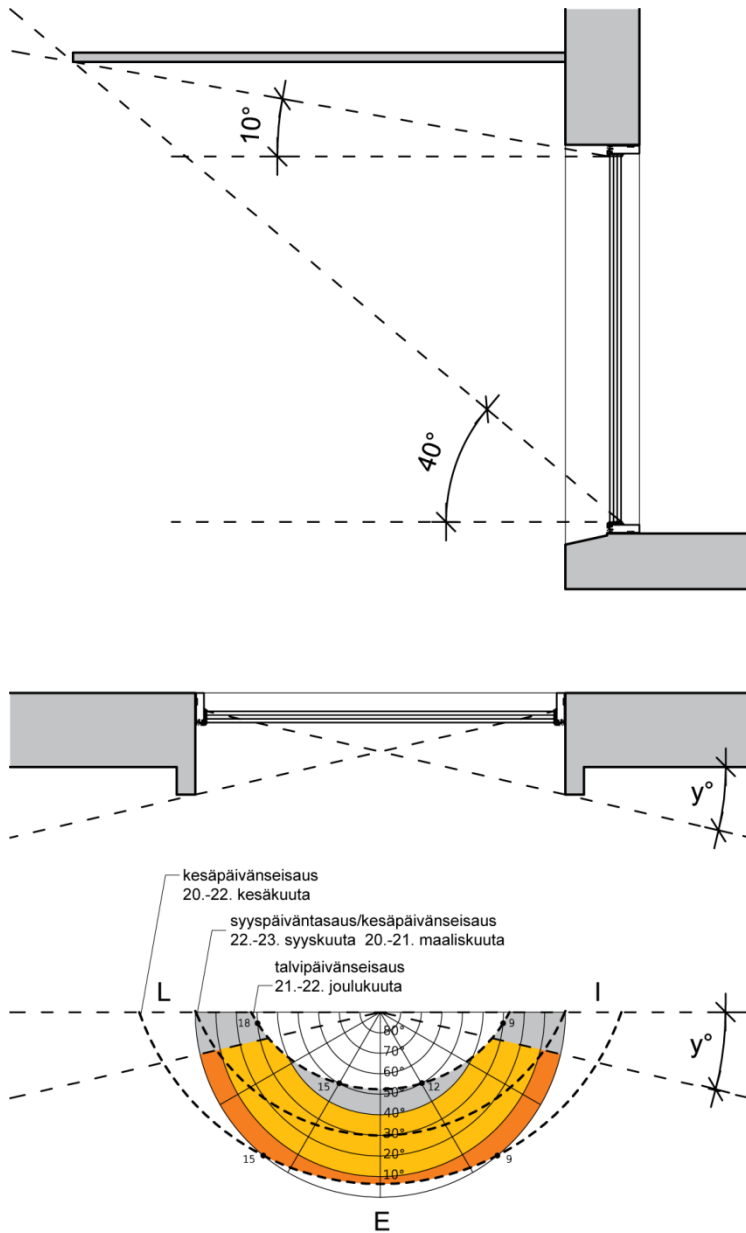
Kuvassa Kuva 4 vaakarakenne varjostaa ikkunaa 40 asteen kulmassa kuten edellisessäkin tapauksessa, mutta vaakarakenne on sijoitettu ylemmäksi. Alle 10 asteen kulmassa tuleva auringonsäteily pääsee kokonaisuudessaan sisään. Tämän kaltaista mitoitusta käytetään silloin, kun aurinkoenergiaa hyödynnetään passiivisesti, silloin, kun auringonsäteilyn halutaan pienentävän tilojen lämmitystarvetta talvella.



Kuva 2. Aurinkokaavio, Helsinki.



Kuva 3. Varjostavan vaakarakenteen vaikutus sisätiloihin tulevaan auringonsäteilyyn eteläjulkisivussa. Harmaa väri kaaviossa osoittaa suunnat, joista tulevan auringonsäteilyn ikkunasyvennykset ja lippa torjuvat kokonaan. Alle 40 asteen kulmassa tulevaa säteilyä (keltainen väri) lippa varjostaa osittain.

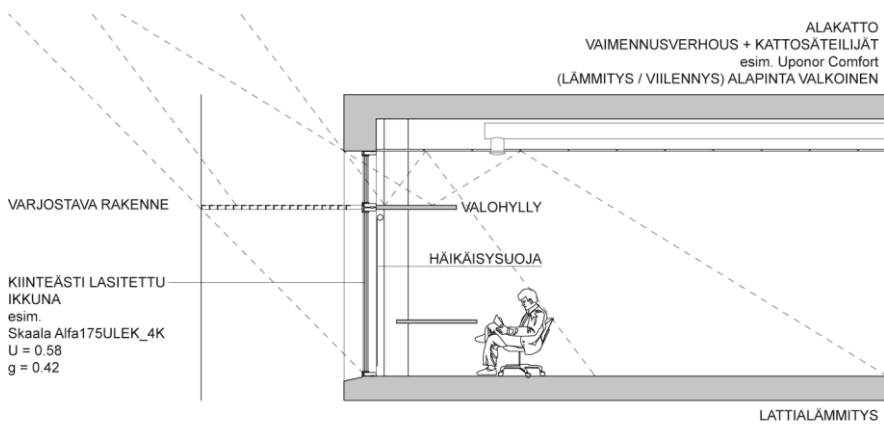


Kuva 4. Varjostavan vaakarakenteen vaikutus sisätiloihin tulevaan auringonsäteilyyn eteläjulkisivussa. Harmaa väri kaaviossa osoittaa suunnat, joista tulevan auringonsäteilyn ikkunasyvennykset ja lippa torjuvat kokonaan. Ikkunapielten syventämisen vaikutus on vähäinen. Alle 10 asteen kulmassa tuleva säteily (oranssi väri) pääsee sisätilaan kokonaan varjostamattomana.

Varjostavien rakenteiden mitoitus voidaan laskea hyvinkin tarkasti ja teoriassa rakenteet voidaan suunnitella torjumaan auringonsäteilyä juuri silloin, kun sisätilassa dynaamisen energia- ja olosuhdesimulaation perusteella esiintyy yllämpenemistä. Käytännössä matalalta paistavan auringon säteilyn torjuminen kiinteällä rakenteella on kuitenkin erittäin vaikeaa. Vain erittäin loivan säteilykulman päättäminen sisätilaan edellyttää käytännössä kaihdinta muistuttavaa säleikköä, joka vaikuttaa olennaisesti sisätilan näkymiin. Erittäin syvän vaakarakenteen integroiminen julkisivuun on teknisesti ja arkkitehtonisesti haastavaa.

2.1.4 Talotekniikka

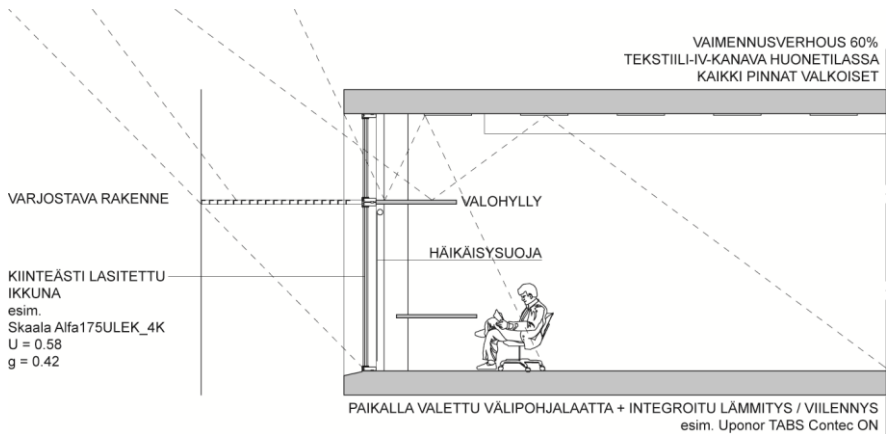
Kuvassa 5 esitetään yksi ratkaisu SunZEB-toimistohuoneen talotekniikka-asennuksista. Toimistotilan jäähdytys voidaan toteuttaa esimerkiksi alakattoon asennettavilla paneeleilla (esim. Uponor Comfort panel). Ilmanvaihtokanavat asennetaan alakaton sisään. Valohylly ja vaalea, valoa heijastava alakatto tuovat auringonvaloa syvälle huoneeseen. Alakattopintaan on sijoitettava myös vaimennusverhous ja valaisimet. Varjostava vaakarakenne, valohylly ja häikäisyuojaksi tarkoitettu rullaverho sisätilassa estävät häikäisyn. Lattialämmitys mahdollistaa lattiaan saakka ulottuvan ikkuna-aukotuksen. Vastaavaa ratkaisumallia voidaan käyttää asuinrakennuksissa.



Kuva 5. Alakatolla varustetun toimistohuoneen poikkileikkaus.

Vaihtoehtoinen toteutusmalli voi perustua esimerkiksi rakenteisiin integroituun lämmitys- ja jäähdytysratkaisuun, jossa ei ole lainkaan alakattoa (kuva 6). Ns. TABS-ratkaisu (thermally activated building system) on toistaiseksi toteutettu enemmän Keski-Euroopassa kuin Suomessa. Niissä paikalla valettu välipohjalaatta lämmittää ja jäähdyttää sekä ylä- että alapuolella olevaa tilaa. Toimistohuoneen

sisäkattoon tarvittava vaimennusverhous on toteutettava materiaaleilla, jotka eivät estä katon lämmitys- ja jäähdytystoimintoa. Ilmanvaihtokanavat asennetaan huonetilaan näkyviin. Ne voivat olla esimerkiksi palonsuojakäsiteltyjä tekstiilikankavia, jotka on tarkoitettu asennettaviksi näkyville.



Kuva 6. TABS-ratkaisuun perustuvan toimistuhuoneen poikkileikkaus.

2.1.5 Käyttäjakohtaisesti säädettävät varusteet

Käyttäjän kontrolloima varjostava rakenne voi olla esimerkiksi

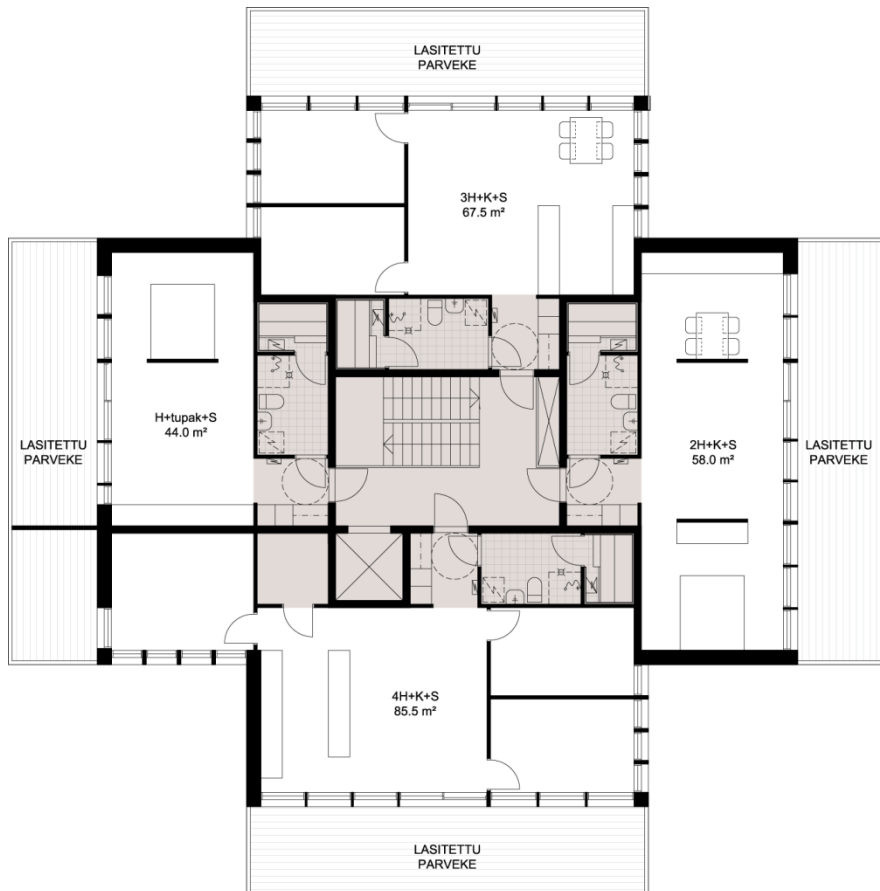
- asunnon parvekelasituksen sisäpuolelle asennettava kaihdin
- toimistossa huonetilaan asennettava, osittain valoa läpäisevä rullaverho tai kaihdin
- ikkunan ulkopuolelle tai puiteväliin asennettava kaihdin.

Lämpökuormien hallinta ei kuitenkaan missään vaihtoehdossa perustu pelkästään edellä kuvattuihin ratkaisuihin. Niiden merkityksenä on tarjota mahdollisuus käyttäjäkohtaiseen hienosäätöön miellyttävien asuin- ja työolosuhteiden luomiseksi.

Käyttäjäkohtaisen kontrolloinnin tavoitetta tukee myös mahdollisuus tuuletusikkunan tai -luukun avaamiseen ilmanvaihdon häiriintymättä.

2.2 SunZEB-asuinkerrostalo

Kuvissa 7-9 on esitetty esimerkki SunZEB-konseptiin soveltuvan asuinkerrostalon ratkaisuista. Ratkaisu on pistetalo, jossa huoneistot suuntautuvat eri ilmansuuntiin. Eteläjulkisivussa parvekkeen rakenteet estävät yllilämpenemisen, vaikka ikkunapinta-ala on verrattain suuri. Muista ilmansuunnista auringonsäteily tulee hyvin matalassa kulmassa. Lämpökuorman hallitsemiseksi itä- ja länsijulkisivuilla voidaan joko käyttää ikkunaratkaisua, jolla on matala g-arvo tai varustaa parvekelasi-tuksen sisäpuoli sälekaihtimilla.



Kuva 7. Pistetalon pohjaratkaisu.

KIINTEÄSTI LASITETTU
esim. IKKUNA Skaala
Alfa175ULEK_4K
 $U = 0.58$
 $g = 0.42$

AVATTAVA
PARVEKELASITUS

LÄMMITTÄMÄTÖN
PARVEKE

SISÄTILA



Kuva 8. Asuinkerrostalon leikkaus.



Kuva 9. SunZEB-pistetalo. Lasitetut parvekkeet ja varjostava säleikkö ikkunoiden yläpuolella estävät sisätilojen liiallisen yllämpenemisen.



Kuva 10. SunZEB-kaupunkitalo. Perinteisen, helsinkiläisen umpikorttelikerrostalon malliin perustuvassa asuinkerrostalotyypissä on katujulkisivun mittainen lasitettu parvekevyyhyke, joka torjuu sisätilojen liiallisen yllämpenemisen.

Pistetalo voi sijaita ympäröivästä kaupunkirakenteesta irrallisena, puistomaisessa ympäristössä, jolloin julkisivupinnat saavat runsaasti auringonvaloa ja asunnoista avautuu näkymiä eri suuntiin. Ratkaisumalli soveltuu myös korkeampiin tornitaloihin, jotka eivät yleensä ole ympäristönsä varjostamia.

Kuvassa 10 esitetään umpikorttelimaiseen kaupunkirakenteeseen soveltuva asuinkerrostalomalli, joka hyödyntää myös lasitettuun parvekevyöhykkeeseen perustuvaa varjostusta.

2.3 SunZEB-toimisto

Kuvissa 11-14 on esitetty SunZEB-konseptiin soveltuvan toimistotalon ratkaisuja.

Avokonttoriratkaisu soveltuu konseptiin erinomaisesti. Mikäli pieniä toimistohuoneita tarvitaan, ne voitaisiin sijoittaa esimerkiksi

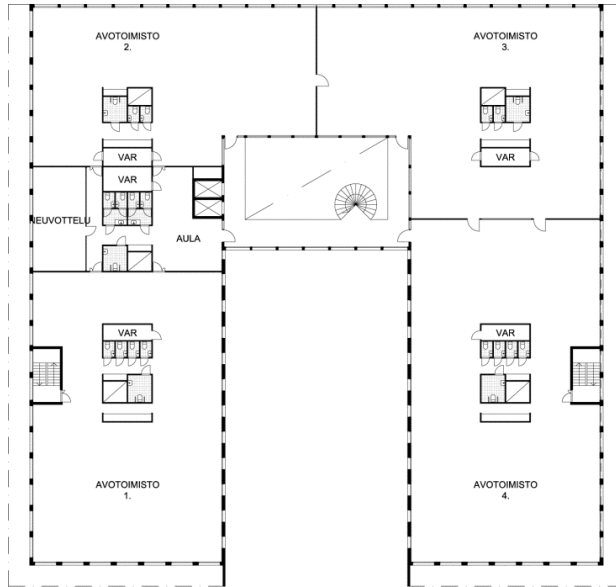
- sisäpihan julkisivua vasten (sisäpihan kate varjostaa)
- etelään (ylilämpeneminen hallittavissa vaakarakenteella), ei kuitenkaan rakennuksen ulkonurkkaan
- alimpiin kerroksiin (ympäröivä rakennuskanta ja puusto varjostavat)
- pohjoisjulkisivulle (kesällä hyvin matalalta paistava aurinko voi aiheuttaa piikkejä lämpökuormissa, mutta nämä ajoittuvat työajan ulkopuolelle).

Julkisivuratkaisu mahdollistaa avotoimiston jakamisen yksittäisiksi huonetiloiksi. Ikkunakoko on esimerkkiratkaisuissa 2000x2800 mm. Varjostava rakenne jakaa ikkunan kahteen osaan 2100 mm korkeudelta. Ikkuna on asennettu syvyyssuunnassa mahdollisimman syvälle julkisivuun.

Aurinkosuojaus perustuu varjostavaan vaakarakenteeseen, jonka syvyys on n. 2000 mm (varjostaa ikkunan n. 40 asteen kulmassa). Itä- ja länsijulkisivussa tarvitaan lisäksi kaihdin, jotta hyvin matalassa kulmassa tuleva auringonsäteily voidaan hallita. Lasituksen g-arvo itä- ja länsijulkisivussa voidaan myös valita eteläjulkisivua pienemmäksi. Vaihtoehtona kuvassa 14 esitetään samaa pohjaratkaisua vastaava julkisivu, jossa vaakasäleikkö suojaa itä- ja länsijulkisivun tiloja ylilämpenemiseltä ja häikäisyltä.

Sisäpiha on lämmittämätön mutta katettu. Sisäpihan kattaminen ja lasittaminen antavat mahdollisuuden myös tehokkaaseen, rakenteelliseen aurinkosuojaukseen.

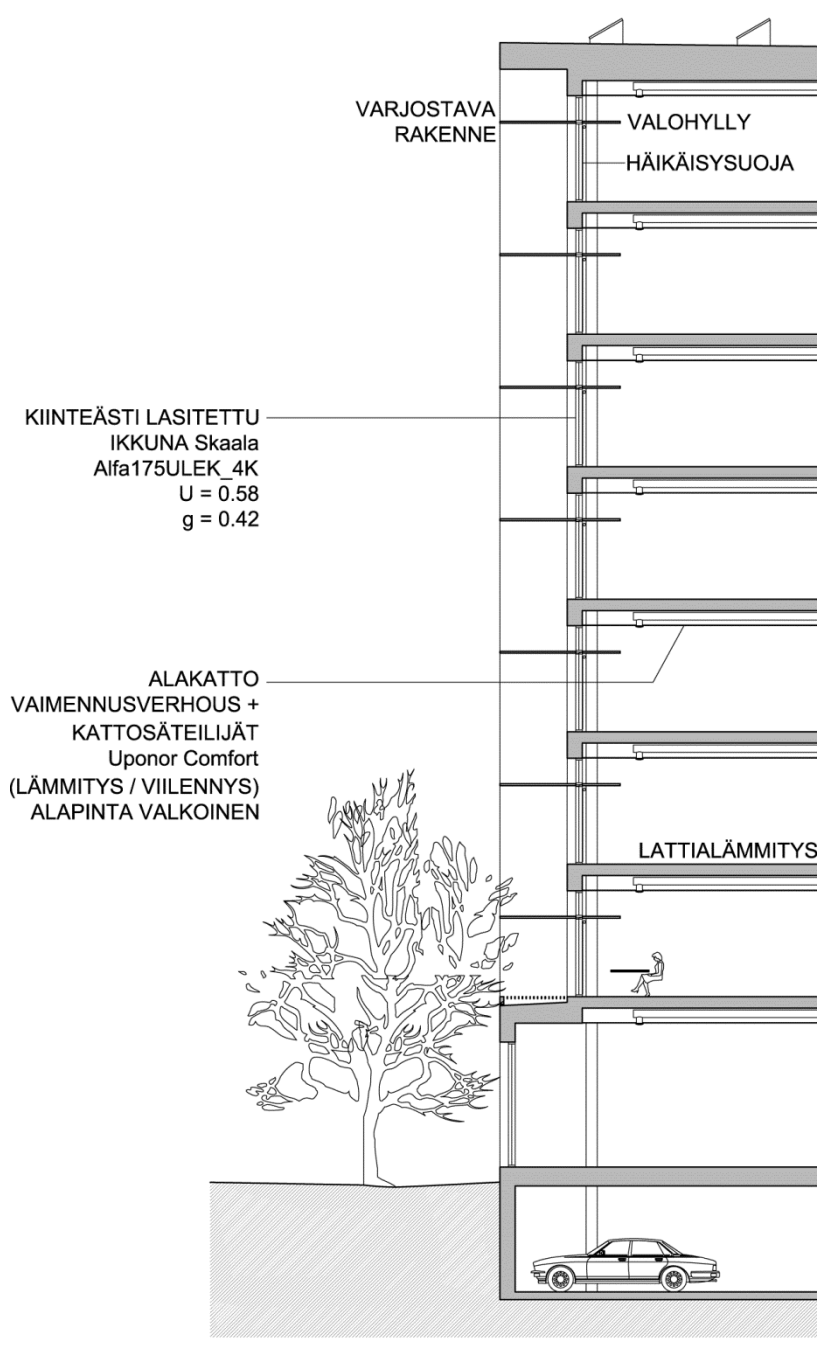
Maantasokerros sisältää yhteiskäytössä olevia kokous-, neuvottelu-, luento- ja ravintolatiloja. Ylemmät kerrokset voivat toimia yhtenä kokonaisuutena tai ne voidaan jakaa neljäksi erilliseksi toimitilaksi.



Kuva 11. Esimerkki SunZEB-konseptiin soveltuvasta toimistotalosta, normaalin kerroksen pohjapiirustus.



Kuva 12. Esimerkki SunZEB-konseptiin soveltuvasta toimistotalosta, pohjakerroksen pohjapiirustus.



Kuva 13. Esimerkki SunZEB-konseptiin soveltuvasta toimistotalosta, leikkaus.



Kuva 14 Ylemmässä kuvassa varjostava vaakarakenne ja valohylly. Alemmassa kuvassa eteläjulkisivun ikkunoiden varjostus vaakarakenteella; itä- ja länsijulkisivun varjostus vaakasäleiköllä.

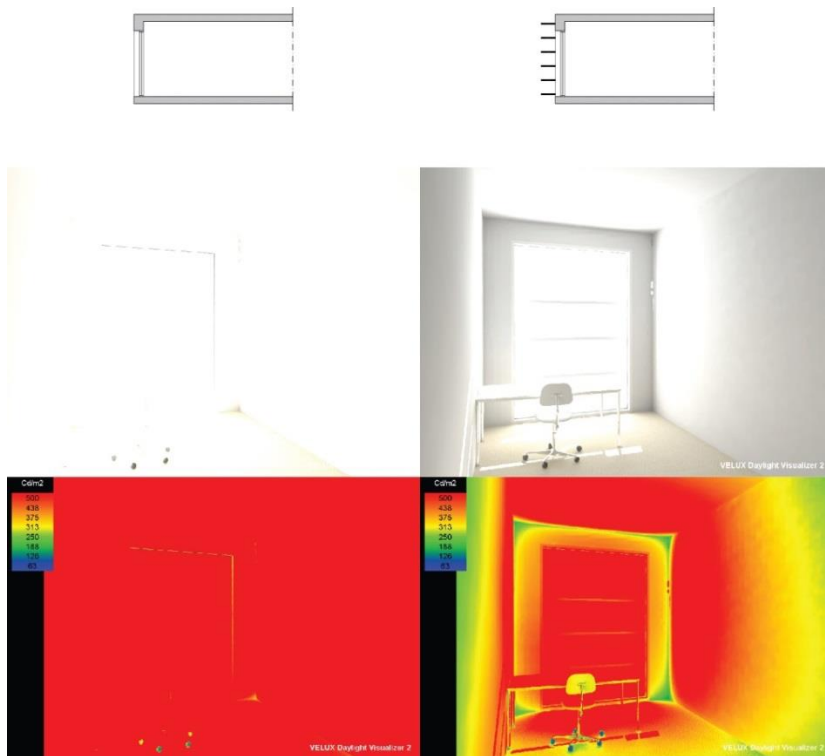
2.3.1 Päivänvalo-olosuhteet toimistohuoneessa

Päivänvalo-olosuhteita toimistohuoneessa tarkasteltiin Velux Daylight Visualizer -ohjelmalla.

Vaakarakenteet

Auringonvalon häikäisyä torjuminen on haastavinta itään ja länteen suuntautuvissa tiloissa. Kuvassa 15 on esitetty luonnonvalo-olosuhteet itään suuntautuvassa toimistohuoneessa kesäkuun 21. päivänä klo 8. Ikkunan koko on 2000x2800 mm. Ilman varjostavaa rakennetta häikäisy on vaikeasti hallittavissa ja työskentelyolosuhteet ovat huonot. Ikkunan ulkopuolelle asennettu vaakasäleikkö (syvyys 600 mm, kk 600 mm) vähentää häikäisyä merkittävästi, mutta vaikuttaa myös olennaisesti ikkunasta avautuvaan näkymään.

Häikäisyä voidaan estää säleikön lisäksi ikkunan sisäpuolelle, huonetilaan asennettavalla verholla tai kaihtimella, joka voi olla osittain valoa läpäisevä.



Kuva 15. Vaakasäleikön (syvyys 600 mm) vaikutus päivänvalo-olosuhteisiin itään suuntautuvassa toimistohuoneessa kesäkuussa klo 8 aamulla. Vasemmalla tilanne ilman varjostusta.

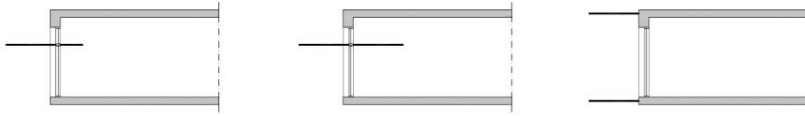
Valohylly

Kuvassa 16 esitetään valohyllyn periaate. Valohylly suojaa häikäisyltä ja heijastaa epäsuoraa valoa syvemmälle sisätilaan. Häikäisyn hallitsemiseksi valohyllyn alapuolella oleva suuri ikkuna varustetaan huonetilaan asennettavalla kaihtimella tai verholla.



Kuva 16. Valohylly etelään suunnatussa toimistohuoneessa, aurinkoinen päivä.

Kuvassa 17 esitetään toimistotalon suunnitelmissa käytetty varjostavan vaakarakenteen ja valohyllyn yhdistelmä 2100 mm:n korkeudella ja verrataan sitä ratkaisuun, jossa vaakarakenteet ovat välipohjien kohdilla. Eteläjulkisivussa välipohjan kohdalle sijoitettu vaakarakenne ei kahden metrin syvyyseenäkään riitä suojaamaan sisätilaa haittahäikäisyltä keväällä ja syksyllä. Alemmaksi ($h=2100$) sijoitettuna vaakarakenne suojaa häikäisyltä paremmin. Valohylly heijastaa yläikkunan valon katon kautta syvemmälle huoneeseen. Valohyllyn syvyyden kasvattaminen ei kuitenkaan näytä olennaisesti parantavan luonnonvalo-olosuhteita huoneessa. Vertailu osoittaa, että kaikki esitetyt vaakarakenteet vähentävät häikäisyä kesäkuussa; ongelmallisimmat tilanteet syntyvät keväällä ja syksyllä.



Kuva 17. Vasemmalla varjostava vaakarakenne ja 900 mm syvä valohylly; keskellä varjostava vaakarakenne ja 2100 mm syvä valohylly; oikealla varjostavat vaakarakenteet välipohjien kohdilla. Tarkastelussa etelään suunnattu toimistohuone; aurinkoinen päivä maaliskuussa, kesäkuussa ja syyskuussa.

2.3.2 Sisäolosuhteet

Työntekijöiden ja asukkaiden tilassa kokemaa viihtyvyyttä voidaan arvioida sisäolosuhteiden avulla. Niistä yleisimmät ovat sisäilmastoon vaikuttavat Rakennustiedon julkaisemassa RT-kortissa Sisäilmastoluokitus 2008 (RT 07-10946) – ohjeistuksessa mainitut

- lämpötila, joka voi olla huoneen ilman lämpötila tai lämpöviihtyvyyttä paremmin kuvaava operatiivinen lämpötila
 - ilman laatu, johon luetaan ilman hiilidioksidipitoisuus, ilman kosteus ja esimerkiksi radonpitoisuus
 - ääni-olosuhteet joihin vaikuttaa vahvasti tilan akustiikka
 - valaistus joka vaikuttaa paitsi näön tarkkuuteen, näkömukavuuteen ja näkötehokkuuteen myös tilan yleiseen estetiikkaan

Näiden lisäksi sisäolosuhteisiin voidaan katsoa kuuluviksi esimerkiksi tilan sisustus ja sen sisustus, ääniolosuhteet, tilan yleinen käytettävyys ja siisteys.

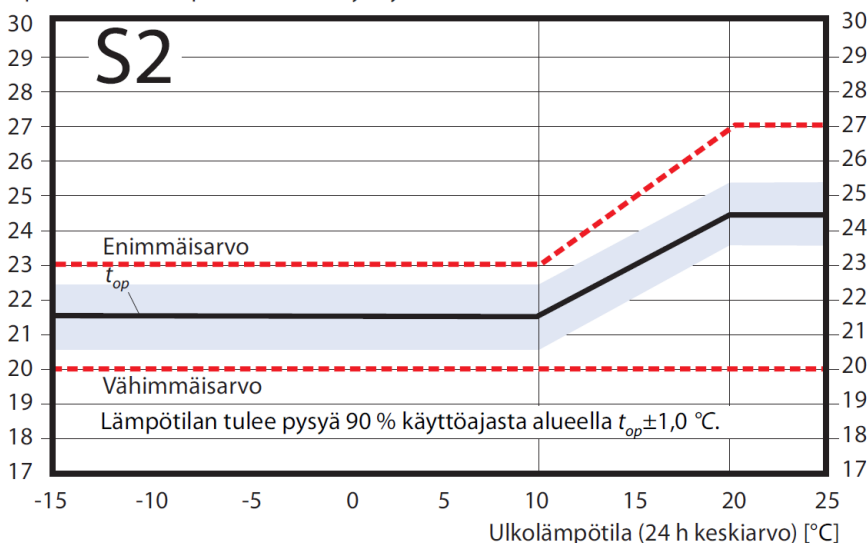
Sisäolosuhteiden hallinta on ollut merkittävä tekijä koko SunZEB-hankkeessa. Pääasiassa hankkeessa on keskitytty tarkastelemaan lämpöolosuhteita mutta myös ilman laatua sekä valaistusta etenkin päivänvalon saatavuuden ja auringon aiheuttaman häikäisyn osalta.

Sisäilman laadulle määritellään kriteerit Rakennustiedon julkaisemassa RT-kortissa Sisäilmastoluokitus 2008 (RT 07-10946). Siellä sisäilmastolle on annettu kolme luokkaa:

- S1: Yksilöllinen sisäilmasto, jossa esimerkiksi lämpöolosuhteita ja valaistusta on voitava säätää kunkin käyttäjän tarpeiden mukaisesti
- S2: Hyvä sisäilmasto, jossa esimerkiksi lämpöolosuhteet ovat pääosin hyvät ja vedottomat, mutta yllilämpeneminen on ajoittain mahdollista
- S3: Tyydyttävä sisäilmasto, joka täyttää rakentamismääräysten minimivaatimukset

SunZEB-hankkeessa erityisesti lämpöolosuhteita on tarkasteltu sisäilmastoluokan S2 näkökulmasta. Sen ajatuksena on, että tilan operatiivisen lämpötilan tulee pysytellä pääosin (90 % ajasta) ulkolämpötilan funktiona määräytyvän optimilämpötilan alueella $\pm 1^\circ\text{C}$ tarkkuudella kuvan 18 mukaisesti. Optimilämpötilan määrittelyssä on huomioitu se, että jäähdytyskaudella ihmisten sisälläkin käyttämä vaatetus on tavallisesti kevyempää kuin talvella ja näin ollen myös sisälämpötilan on oltava lämmityskautta korkeampi.

Operatiivinen lämpötila oleskeluvyöhykkeellä [$^\circ\text{C}$]



Kuva 18. Sisäilmastoluokan S2 vaatimus tilan operatiiviselle lämpötilalle.

S2-luokan vaatimus operatiiviselle lämpötilalle on varsin tiukka ja sen toteutuminen vaatii todella hyvin suunniteltua LVI-järjestelmää ja sen tarkkaa ohjausta.

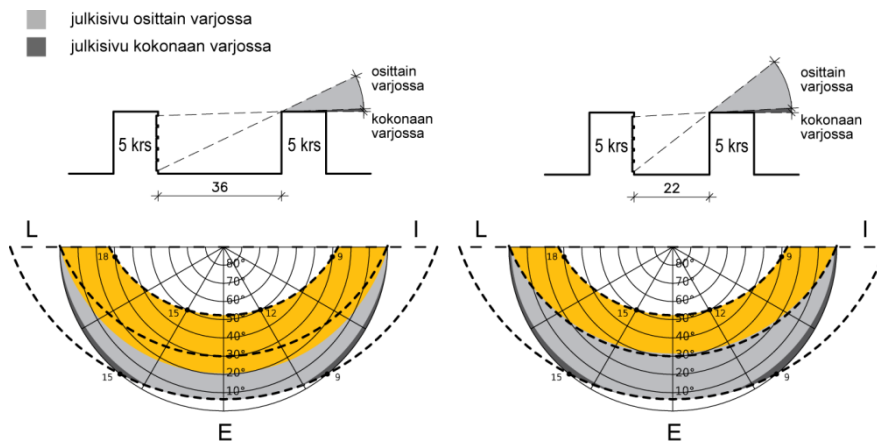
Operatiivisen lämpötilan suhteen S2-luokituksesta on esitetty myös kritiikkiä. Vaikka optimaalisen lämpötilan alue onkin tarkasti määritelty, se ei välttämättä kuitenkaan ole siinä kohdassa mikä kulloinkin olisi tilan käyttäjän kannalta paras mahdollinen lämpötila. Yksilölliseen lämpöviihtyvyyteen vaikuttavat vahvasti henkilöt ruumiinrakenne, aktiivisuustaso sekä ikä ja sukupuoli. Näiden huomioiminen esimerkiksi laajoissa avokonttoreissa ei tietenkään aina ole mahdollista, mutta yksilön kannalta optimaalisen lämpötila-alueen tiedostaminen voisi auttaa suunnittelijoita kehittämään entistä toimivampia taloteknisiä ratkaisuja tilojen lämmönhallintaan (Tuomaala et al. 2013, Tuomaala et al. 2014)

2.4 Kaupunki- ja korttelirakenteen vaikutus

Asemakaavoitus määrittelee käytännössä rakennuspaikan uusiutuvan energian hyödyntämispotentiaalin. Aurinkoenergian tuottopotentiaalin ja luonnonvalo-olosuhteiden rakennuspaikkakohtainen analyysi voi jatkossa olla keskeinen asemakaavoituksen työmenetelmä, koska hajautettu uusiutuvan energian tuotanto on saamassa yhä tärkeämmän roolin energiatehokkuusratkaisuissa.

Kaupunkirakenteessa ympäröivä rakennuskanta ja puusto estävät tyypillisesti matalalta paistavan auringonsäteilyn, joka pienentää tilojen lämmitystarvetta lämmityskauden aikana. Aurinkoenergiaa passiivisesti hyödyntäville rakennuksille suotuisia sijaintipaikkoja olisivat esimerkiksi puiston, puistokadun tai urheilukentän laidat, jolloin vastapäinen varjostava rakennus on mahdollisimman kaukana.

SunZEB-konseptissa voidaan kuitenkin hyödyntää myös jyrkemmässä kulmassa tuleva auringonsäteily. Tämän vuoksi vaatimukset rakennuspaikalle eivät ole yhtä tiukat. Esteeksi voivat muodostua esimerkiksi epäedullinen suuntaus tai voimakkaasti varjostava, muurimainen ja korkea korttelirakenne aurinkoisella puolella. Julkisivuun lankeavaan auringonsäteilyyn voidaan vaikuttaa kaavoituksen ratkaisuilla: kadun leveydellä, rakennusten korkeuksilla ja kattomuodoilla. Kuvassa 19 esitetään aurinkodiagrammin avulla ympäristön varjostava vaikutus umpikorttelirakenteessa, jossa rakennusten keskinäinen etäisyys on 36 tai 22 metriä.



Kuva 19. Eteläpuolella sijaitsevan naapurirakennuksen varjostava vaikutus aurinkokaaviossa esitettynä. Vaalea harmaa väri osoittaa tilanteet, joissa julkisivu on osittain varjostettu. Tumma harmaa väri osoittaa tilanteet, jossa julkisivu on kokonaisuudessaan varjossa. Vasemmassa kuvassa rakennusten välinen etäisyys on 36 metriä ja oikeassa etäisyys on 22 metriä.

Tarkastelussa on viisikerroksiset rakennukset, jotka ovat keskenään yhtä korkeat. Etäisyydet on valittu Helsingin kaupunkisuunnitteluviraston katusuunniteluohjeen (Helsingin kaupunki 2001) perusteella. Ohjeen mukaiset katualueen leveydet ja niistä johdetut rakennusten vähimmäisetäisyydet on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Katualueiden ohjeelliset leveydet Helsingissä. (Helsingin kaupunki 2001)

Katutyyppi	Ohjeellinen leveys (m)	Rakennusten vähimmäisetäisyys (m)
Pääkatu, nelikaistainen	36,5	36,5
Pääkatu, kaksikaistainen	22	22
Alueellinen kokoojakatu	24,5	24,5
Paikallinen kokoojakatu	16	16
Tonttikatu, rakennusoikeus $\leq 5000 \text{ k-m}^2$	9,5	9,5 (8,5)
Tonttikatu, rakennusoikeus $5000 - 20\,000 \text{ k-m}^2$	6,5	8
Piha- ja hidaskadut	5,5 – 7,5	8

Kun rakennusten keskinäinen etäisyys on 22 metriä, rakennus on osittain varjostettuna syyspäivän tasauksesta kevätpäivän tasaukseen. Tämä merkitsee käytännössä sitä, että alimman kerroksen ikkunat ovat koko talvikauden varjossa. Kun rakennukset ovat keskenään yhtä korkeat, ylin kerros on vain hyvin harvoin naapurirakennuksen varjostama.

Kuvassa 20 on analysoitu rakennusten sijainnin soveltuvuutta SunZEB-konseptiin Jätkäsaaren ja Kalasataman kaupunginosien asemakaavojen perusteella. Uusien kaupunginosien korttelityyppi on kantakaupungissa tyypillisesti umpikorttelimainen.

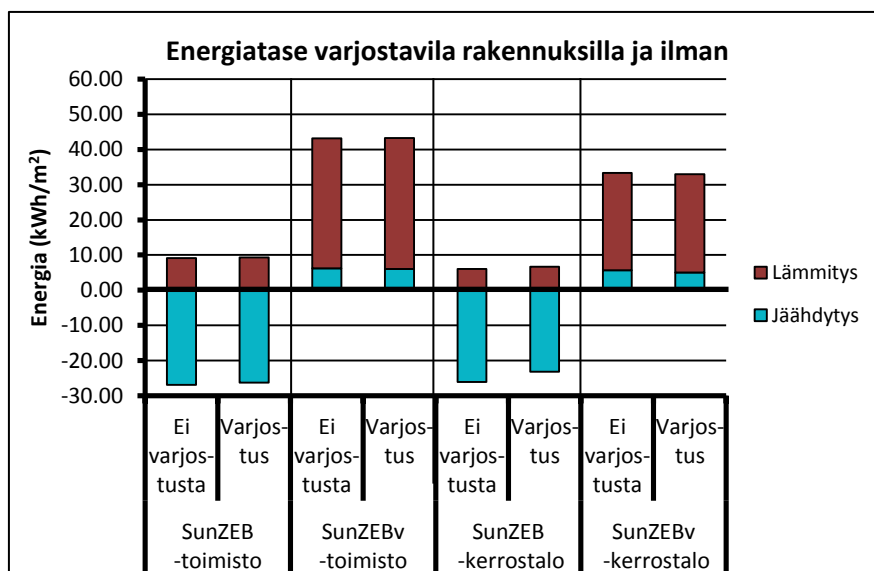
Esimerkkitarkastelut osoittavat, että SunZEB-konseptille soveltuvia rakennuspaikkoja on nykyaikaisessa umpikorttelirakenteessakin verrattain paljon. Tämä johtuu osittain tarkasteltavien alueiden sijainnista meren rannalla, mutta myös siitä, että laadukkaassa kaupunkisuunnittelussa kiinnitetään huomiota avoimiin näkymiin ja valoisuuteen. Jätkäsaaren ja Kalasataman asemakaavoissa on tyypillisesti korkeintaan kaksi umpikortteliriviä vierekkäin.



Kuva 20. Vihreä väri (asuinrakennukset) ja keltainen väri (toimistorakennukset) osoittavat SunZEB-konseptille erityisen sopivia rakennuspaikkoja Jätkäsaaren (vasemmalla) ja Kalasataman (oikealla) asemakaavoissa Helsingissä. Olemassa olevat rakennukset (musta väri) ovat pääsääntöisesti matalia.

Rakennustyypeistä aurinkoenergian passiiviseen hyödyntämiseen soveltuvat hyvin esimerkiksi pistetalot ja korkeat tornitalot, joiden julkisivupinnat saavat verrattain paljon auringonsäteilyä. Mikäli sivukäytävätila suuntautuu aurinkoiseen ilmansuuntaan, se soveltuu rakennustyyppinä hyvin SunZEB-konseptiin, koska sen ikkunapinta-ala painottuu pohjaratkaisusta johtuen yhteen suuntaan. Kun sivukäytävätilan ikkuna- ja parvekejulkisivu suunnataan etelään, auringonsäteilyn määrää voidaan kontrolloida hyvin vaakarakenteilla. Mikäli sivukäytävätilan ikkuna- ja parvekejulkisivu suuntautuu länteen, auringonsäteilyn määrää ja sisälämpötiloja on erittäin vaikeaa hallita.

Kuvassa 21 on esitetty kaupunkirakenteen varjostuksen vaikutus asuinrakennuksen ja toimistorakennuksen lämmitys- ja jäähdytysenergiankulutukseen sekä SunZEB-konseptin mukaisissa rakennuksissa että verokkirakennuksissa SunZEB_V. Energiasimulaatio toteutettiin IDA Indoor Climate and Energy -ohjelmistolla. Tarkasteltavat varjostustapaukset valittiin Jätkäsaaren ja Kalasataman asemakaavojen perusteella. Varjostusta koskevat oletukset on esitetty kuvassa 22. Tarkastelluissa asemakaavoissa rakennus on erittäin harvoin kaikilta sivuiltaan kapeiden katujen reunustama. Energiasimulaatiossa tarkasteltiin kohderakennuksen kerroksia 3–5. Ympäröivät rakennukset oletettiin seitsemän kerrosta korkeiksi.



Kuva 21. Naapurirakennusten varjostuksen vaikutus toimistorakennuksen ja asuinkerrostalon kaukolämmön kulutukseen ja jäähdytyksen tarpeeseen. Huomioitava on, että SunZEB_V-tapauksessa jäähdytys tuotetaan sähköllä (COP = 3), jolloin jäähdytyksen energiantarve on pienempi kuin kaukojäähdytyksen tapauksessa.



Kuva 22. Oletukset varjostavien naapurirakennusten sijainnista SunZEB-toimistotalon (vas.) ja SunZEB-asuinkerrostalon (oik.) simulaatiotarkasteluissa. Laskennassa tarkasteltiin energiankulutusta kerroksissa 3–5.

Simulaatiotuloksen mukaan ympäröivät yksittäiset naapurirakennukset eivät oleellisesti vaikuta toimistorakennuksen jäähdytstarpeeseen. Asuinrakennuksessa tilojen jäähdytyksen tarve on hieman vähäisempää. Huomioitava on, että SunZEB_V-tapauksessa jäähdytys tuotetaan sähköllä (COP = 3), jolloin jäähdytyksen energiantarve on pienempi kuin kaukojäähdytyksen tapauksessa. Ympäröivän rakennuskannan vaikutus aiheuttaa lämmitysenergiankulutuksessa hienoista kasvua, joka johtuu siitä että talvikaudella matalassa kulmassa sisätiloihin lankeava auringonsäteily vähenee. Tuloksia arvioitaessa on huomattava, ettei neljän laskentatapauksen perusteella voi tehdä yleistyksiä. Saatua tulosta vaikuttaa kuitenkin johdonmukaiselta sen vuoksi, että ympäröivät rakennukset estävät ensisijaisesti talvikuukausien auringonsäteilyä, jonka osuus vuosittaisesta auringon kokonaisäteilystä on vähäinen.

3. SunZEB ratkaisujen energiaominaisuudet

Arkkitehtimallinnuksen tuottamat suunnitteluratkaisut mallinettiin energiasimuloinnein ja etsittiin rakennustason eri variaatioista optimaalinen ratkaisu valituille käyttötarkoituksille. Tavoitteena oli taata hyvät sisäolosuhteet ihmisille ja maksimoida uusiutuvan aurinkoenergian saanto. Lisäksi tarkastelussa oli ns. nykyinen 2012 määräystaso vertailutasona. Hypoteesina käytettiin ajatusta, että kaukolämmitys ja –jäähdytys mahdollistavat suuret ikkunat rakennukseen, minkä avulla uusiutuvan energian määrä saadaan mahdollisimman suureksi. Sisäolosuhteiden laatutasoksi valittiin sisäympäristöluokittelun taso S2 (Sisäilmastoluokitus 2008).

Työ aloitettiin alustavilla parametriherkistelyillä, joissa tutkittiin uusiutuvan energian hyödyntämisen maksimaalista potentiaalia teoreettisesti käyttäen arkkitehtisuunnittelun mahdollisuuksia. Näitä herkistelykierroksia tehtiin useita, jotta eri vaihtoehtojen vaikutus saataisiin esiin. Tämän jälkeen valittiin parhaan sisäolosuhteen ja maksimaalisen uusiutuvan energian hyödyntämisen mahdollistavat tekniset yksityiskohdat, jotka sovellettiin esitettävien SunZEB-kerrostalon ja SunZEB-toimiston ratkaisuihin.

Tarkastelussa olivat mukana seuraavat tekniset parametrit:

- rakennuksen vaipan osat, eristävyys (U-arvo), aurinkoenergian läpäisy (g-arvo), pinta-alat ja suuntaukset
- ikkunan aurinkosuojauksen ratkaisut
- talotekniikka, tilatason lämmitys- ja jäähdytysratkaisut
- järjestelmien paluulämpötilat alueverkon siirtimille eri vuodenaikoina

Teknisten ratkaisujen valintojen lähtökohtana pidettiin koko tutkimuksen ajan ajatusta ratkaisujen yksinkertaisuudesta, pitkäikäisyydestä, huoltovarmuudesta monistettavuudesta ja kustannustehokkuudesta, jolloin osa olemassa olevista teknisistä ratkaisuista jouduttiin jättämään lopullisesta SunZEB-ratkaisusta pois. Esimerkkinä mainittakoon rakennuksen ulkopuoliset aktiiviset aurinkosuojaratkaisut, joiden soveltaminen Suomen ilmastossa saattaa tuoda ylimääräisiä ylläpitokuluja. Mainittakoon kuitenkin, että esitetyt SunZEB-ratkaisut eivät kuitenkaan estä käyttämästä aktiivisia aurinkosuojaratkaisuja arkkitehtuurisuunnittelussa, mikäli rakennuksen arkkitehtuurissa niitä tarvitaan.

Tuloksena saatiin SunZEB suositusratkaisut asumiselle ja toimistokäytölle. Yksityiskohtainen lista optimaalisista teknisistä parametreista on esitetty liitteissä A SunZEB-ratkaisujen tulokset on esitetty kappaleissa 3.2 ja 3.3.

3.1 Alustavat simuloinnit ja talotekniset ratkaisut

Alustavissa simuloinneissa keskityttiin hakemaan maksimaalista uusiutuvan energian tuottoa. Samalla tarkasteltiin sisäolosuhteiden pysyvyyttä ja laatutasoa. Simulointien tarkoituksena oli löytää ikkunoiden optimaaliset ominaisuudet aurinkoenergian saannon kannalta sekä varmistaa talotekniikan palvelukyky eri teknisten ratkaisujen yhdistelmillä. Simuloinneissa herkisteltiin ikkunoiden g-arvoa eli aurinkoenergian kokonaisläpäisyominaisuutta, ikkunoiden suuntausta eri ilmansuuntiin, ikkunoiden lämmönläpäisyä, verhorakenteita, ulkopuolisia varjostuksia sekä pinta-alaa. Nämä laskelmat toimivat pohjana lopullisten SunZEB-ratkaisujen teknisten yksityiskohtien määrittelyyn. Tulokset on esitetty seuraavissa kappaleissa.

3.1.1 Toimistorakennus

Ensimmäinen simuloitu toimisto oli n. 600 m²/kerros kokoinen tila, joka oli jaettu selkeästi kahteen osaan. Tilan toiselle sivulle oli sijoitettu yhden hengen työhuoneita ja toinen puoli oli yhtä tilaa esimerkiksi avokonttorikäyttöä ajatellen.

Simuloinneissa rakennusta käännettiin eri ilmansuuntiin. Tällöin huomattiin, että pienten tilojen suuntaaminen etelään aiheuttaa helposti niin suurta yllämpenemistä, että talotekniikan avulla ei pystytä saavuttamaan hyviä sisäolosuhteita. Sen sijaan suuren avonaisen tilan sijoittaminen rakennuksen eteläpuolelle on mahdollista, sillä se puskuroi tehokkaasti liikaa lämpenemistä.

Simuloinneissa varioitiin myös eteläpuoleisten ikkunoiden pinta-alaa sekä ikkunan lämmönjohtavuutta kuvaavaa U-arvoa ja auringon lämpösäteilyn läpäisyä kuvaavaa g-arvoa. Paljon auringonlämpöä keräävässä rakennuksessa g-arvon tulisi olla korkea, mutta toisaalta matala U-arvo on tärkeä rakennuksen matalan energiankulutuksen kannalta.

Tavoitteena oli selvittää, onko Suomen oloissa mahdollista löytää energiapositiivinen ikkuna. Toisin sanoen sellainen U- ja g-arvojen sekä ikkunan pinta-alan ja suuntauksen yhdistelmä, joilla ikkunoista saataisiin enemmän lämpöä sisälle kuin mitä sen kautta lämmityskaudella johtuisi ulos. Näin olisi ollut mahdollista tinkiä hieman ikkunan U-arvosta, mikäli sen mukanaan tuoma g-arvon nousu olisi johtanut energiansäästöön.

Tällaista yhdistelmää ei kuitenkaan Suomen oloissa löytynyt vaikka g-arvo vaihdeltiin jopa epärealistisesti välillä 0,1...1 ja ikkunan U-arvo oli pienimpiä nykyisellään saavutettava 0,3 K/Wm². Johtopäätöksenä oli se, että ikkunoiden valinta kannattaa tehdä ensisijaisesti U-arvon perusteella.

Simuloinneista saattoi tehdä myös sen huomion, että kun ikkunalla on matala U-arvo, g-arvon muuttuminen ei merkittävästi vaikuta rakennuksen lämmitysenergian tarpeeseen. Myöskään ikkunan koolla ei ole suurta vaikutusta. Sen sijaan molemmat vaikuttavat merkittävästi rakennuksesta viilennyksellä poistettavan lämmön määrään. Ikkunan pinta-alan ja g-arvon kasvaessa rakennukseen pääsevän auringon säteilyn määrä nousee merkittävästi.

3.1.2 Asuinkerrostalo

Kerrostalon osalta tehtiin kaksi alustavaa simulointikierrosta ennen lopullista SunZEB-ratkaisua. Ensimmäisellä simulointikierroksella kohteena oli pohjaratkaisutaan tavallinen rakennus. Rakennus oli pinta-alaltaan 290 m² kerrosta kohti ja yhteen kerrokseen oli sijoitettu yhden-, kahden, kolmen ja neljän huoneen asunnot.

Saaduista tuloksista opittiin, että pienet ja etenkin etelään, länteen tai itään suunnatut ikkunalliset huoneet ovat lämmönhallinnan kannalta ongelmallisia varsinkin, jos ikkuna pinta-ala on suuri. Pohjoiseen suunnatuissa huoneissa vastaavia haasteita ei havaittu.

Toisessa simuloitussa kerrostalossa lähtökohtana oli kapearunkoinen sivukäytävätaalo. Lähes kaikki ikkunat oli suunnattu etelään ja varjostavat rakenteet oli minimoitu sisäänvedettyjen parvekkeiden avulla.

Simuloinnit osoittivat, että tällainen talo kerää tehokkaasti auringon lämpöä mutta samalla sisäolosuhteiden hallinta muodostuu vaikeaksi. Erilaisilla varjostavilla rakenteilla sekä sijoittamalla rakennus sopivasti muiden rakennusten lomaan lämpenemistä voidaan kuitenkin hallita.

Rakennus todettiin kuitenkin hankalasti sijoitettavaksi kaupunkiympäristöön sen vaatiman avoimen rakennusympäristön vuoksi. Tämän johdosta SunZEB-konseptin mukaista kerrostaloa kehiteltiin edelleen päätyen kuvissa 7-9 esitettyyn rakennustyyppiin.

3.1.3 Ikkunat

Hankkeen eräs tavoite oli löytää SunZeb-rakennukseen hyvin soveltuva ikkuna. Alustavien simulointien perusteella energiapositiivista ikkunaa ei ole tarkasteltavissa rakennuksissa Suomen oloissa löydettävissä.

Tyypillisessä nykyään käytössä olevassa ikkunassa U-arvo on 1,0 W/Km² ja vastaavasti g-arvo 0,35. Tällainen ikkuna on tyypillisesti kolmilasinen ja yleensä avattavaa mallia.

Alustavien simulointien perusteella SunZEB-konseptin mukaisissa rakennuksissa valittiin käytettäväksi Skaalan valmistamaa nelilasista kiinteää ikkunaa ULEK175-S sovellettuna. Näin ikkunalle saatiin erityisen matala U-arvo (0,4 W/Km²) mutta g-arvoksi kuitenkin 0,5.

Suurikokoisten ikkunoiden kanssa on suositeltavaa käyttää kaihtimia häikäisyn torjumiseksi. Simuloinneissa kaihtimet on otettu mukaan varjostavana elementtinä osassa tapauksista. SunZEB-konseptin mukaisissa rakennuksissa kaihtimet on sijoitettu kiinteän ikkunan sisäpuolelle ja tyypillisissä rakennuksissa sisä- ja ulkopuitteen väliin nykyisen rakennustavan mukaisesti.

3.1.4 LVI-tekniikka

Asunnon simuloinneissa lämmityksessä ja viilennyksessä käytettäväksi tuotteeksi valittiin Uponorin Renovis-paneeli. Sen suurin jäähdytysteho on 60 W/paneeli-m²

ja sen asentaminen asuinrakennukseen on helppoa sillä erillistä alas laskua ei tarvita. Toimistoissa käytettiin Uponorin Comfort lämmitys- ja jäähdytyspaneelia. Sen jäähdytysteho on 90 W/paneeli-m² ja sillä saavutettava lopputulos muistuttaa tavallista alas laskettua moduulikattoa.

Lämmön talteenoton hyötysuhteeksi valittiin 85 % SunZEB-konseptin mukaisessa rakennuksessa.

3.1.5 Simuloitujen SunZEB_v erot SunZEB-rakennuksiin verrattuna

Simuloinnit tehtiin paitsi SunZEB-konseptin mukaisille rakennuksille myös palvelukyvyltään samanlaisille rakennuksille mutta tyypillisillä nykyään käytössä olevilla rakenne- ja talotekniikkaratkaisuilla. (SunZEB_v, verrokki). Palvelukyvyn mittareina käytettiin tilaratkaisuja sekä sisäolosuhteita. Toimistorakennuksissa jäähdytys on nykyäänkin yleisesti käytössä, mutta asuinrakennuksiin se tekee vasta tuloaan. Silti myös SunZEB_v-kerrostalo varustettiin viilennyksellä. Muutoin sisäolosuhteiden hallinta lämpötilan osalta olisi ollut hankalaa tai jopa mahdotonta.

SunZEB-konseptin mukaisia rakennuksia muokattiin sellaiseksi, että se rakenteiltaan muistuttivat nykyään suuressa mittakaavassa rakennettavia rakennuksia. Rakenteellisesti merkittävin muutos SunZEB-kerrostaloon nähden on ikkunapinta-alan pienentyminen noin 15 %:iin lattiapinta-alasta. Ikkunoiden pienentäminen toteutettiin pääosin nostamalla ikkunan alareuna 80 cm korkeuteen, kun se aiemmin oli lattiatasossa, sekä kaventamalla ikkunoita tarvittaessa.

Muita muutoksia SunZEB-kerrostaloon nähden olivat lämmöntalteenoton hyötysuhteen ja puhaltimien SFP-luvun asettaminen nykyisin yleisesti käytössä olevalle tasolle sekä rakenteiden korvaaminen U-arvoiltaan rakennusmääräysten mukaisilla rakenteilla. Suurin muutos tapahtui ikkunan U-arvossa.

Tyypillisten rakennusten parametrit on esitetty liitteessä A.

3.2 Asuinkerrostalo

3.2.1 Tilojen kuormitukset simuloinneissa

Asuinrakennuksen simuloinnissa sisäiset kuormat eli laitteet ja valaistus oli oletettu suuruudeltaan ja käyttöprofiililtaan D3 määräysten mukaisiksi. Laitekuormia tiloissa oli kaikissa tehdyissä simuloinneissa 4 W/m² ja valaistusta 11 W/m².

Henkilökuorman kokonaiskuormitus taso oli niin ikään D3 ohjeistuksen mukainen, mutta henkilöiden läsnäoloprofiilit asetettiin FINVACin (2014) ohjeistuksen mukaisesti siten, että ne vastaavat paremmin tilojen todellista käyttöä.

3.2.2 Ilmanvaihto

Ilmanvaihdon ilmamäärät säädettiin D2 ohjeistuksen mukaisiksi ja ilmanvaihdon lämpötilaa ohjattiin sisälämpötilan mukaan. Tuloilman lämpötila säädettiin välille

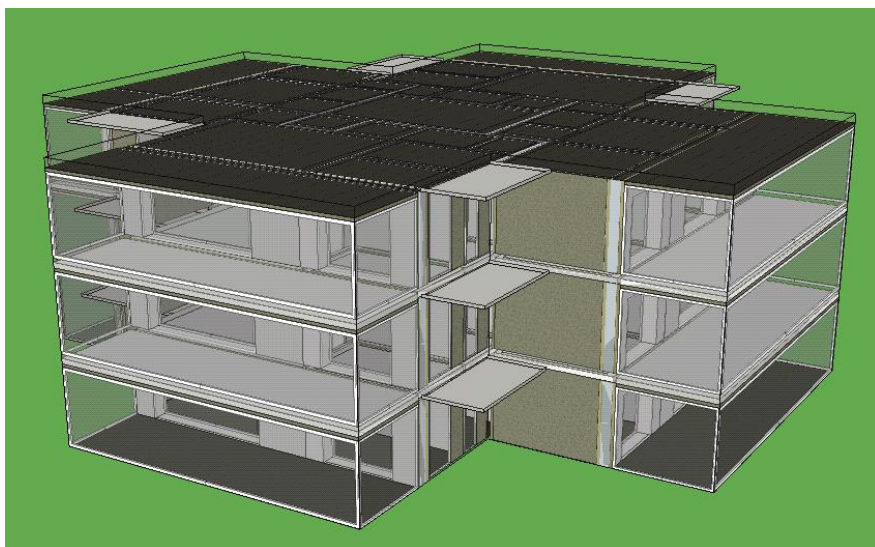
18...22 astetta, jolloin ilmanvaihto ei aiheuta vedon tunnetta. Ilmanvaihtoa säädettiin minimiteholle klo 9...16 eli tyypillisen työpäivän ajaksi.

Ilmanvaihdon arvot olivat samat sekä SunZEB-konseptin kerrostalossa että tyypillisessä kerrostalossa. Ilmanvaihdon puhaltimien SFP-luku oli SunZEB-toimistorakennuksessa $1,2 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ ja tyypillisessä toimistorakennuksessa $2,4 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$

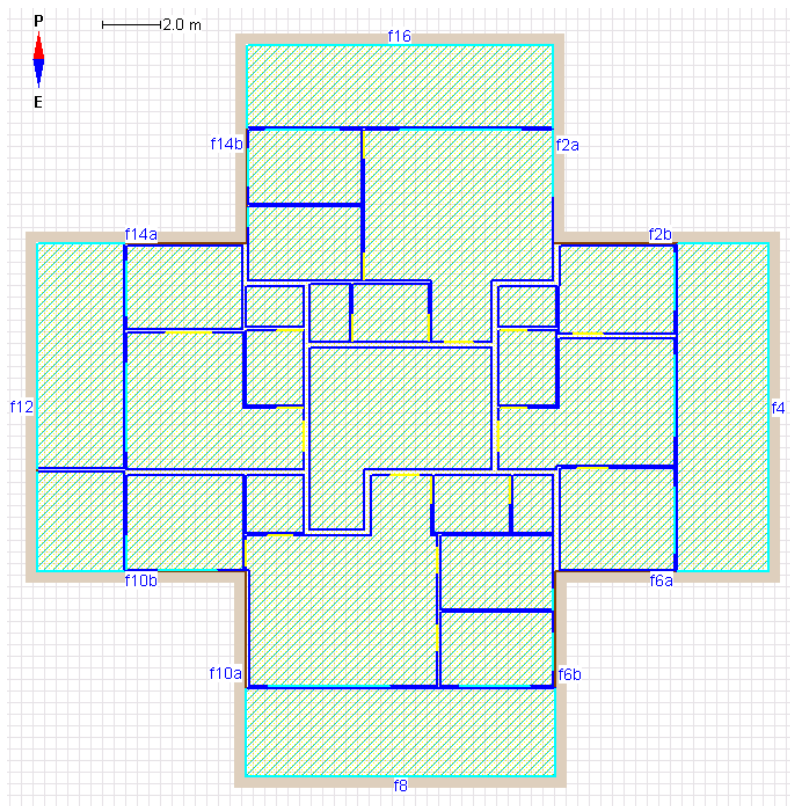
3.2.3 Kerrostalon simulointimalli

Edellisistä simuloinneista saatujen kokemusten perusteella lopulliseksi asuinrakennukseksi jalostui kerrosta kohti neljä huoneistoa ja n. 750 m^2 käsittävä pistetalo (kuva 23). Rakennuksen ikkunapinta-ala on n. 39 % seinäpinta-alasta ja 26 % lattia-alasta. Ikkunat mitoitettiin siten, että ikkunallisesta seinästä ikkunaa on noin 50 %.

Rakennuksessa on jokaisella asunnolla suuret lasitetut parvekkeet. Ne mallinnettiin simuloinneissa omina vyöhykkeinä, joten niiden vaikutus energian kulu- tukseen ja sisäolosuhteisiin tuli huomioitua. Parvekelasit avattiin kun lämpötila parvekkeella ylitti $30 \text{ }^\circ\text{C}$



Kuva 23. Kerrostalon simulointimalli johdettuna arkkitehtimallista (Kappale 2.2). Simulointi tehtiin kolme kerroksiselle mallille ja keskimmäisen kerroksen energiankulutus kerrottiin 7:llä. Kuvassa näkyvät lasitetut parvekkeet sekä erilliset varjostavat rakenteet.

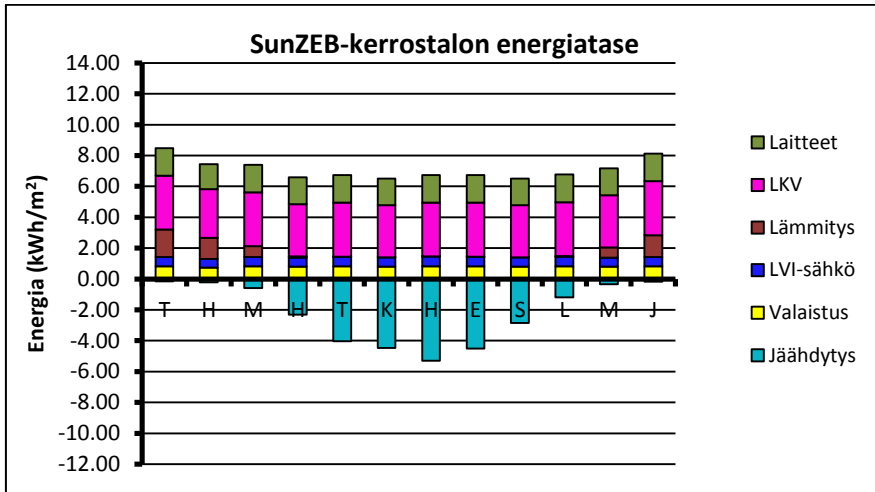


Kuva 24. Asuinkerrostalon simuloinneissa käytetty vyöhykejako kaikissa kerroksissa. Uloimpana näkyvät parvekkeet.

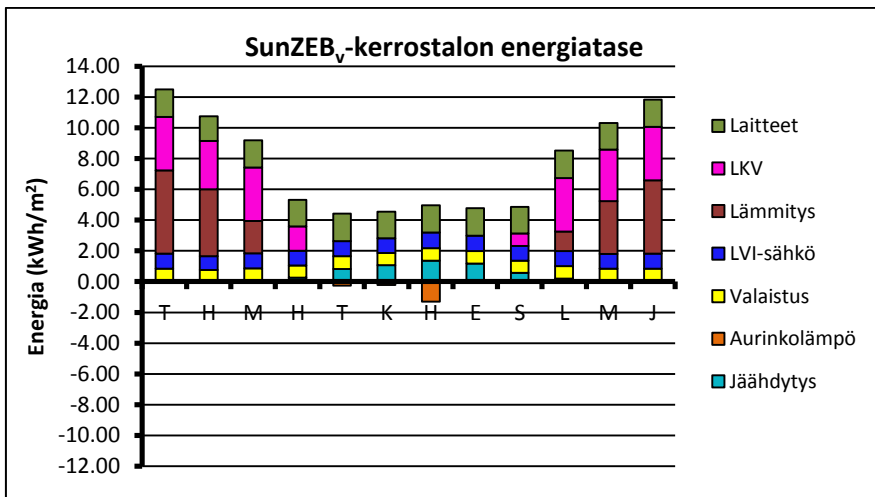
3.2.4 Kerrostalon energiantase

SunZEB-kerrostalon lämmitysenergian tarvetta dominoi käyttöveden lämmityksen vaatima energia (41 kWh/m^2). Varsinaisen tilojen lämmitykseen tarvittava energia on melko vähäinen, vain 6 kWh/m^2 . Rakennuksesta jäädytyksen avulla poistetun lämmön osuus on kohtalaisen suuri (26 kWh/m^2). Kuukausittainen energian ominaiskulutus on esitetty kuvassa 25. E-luvun laskeminen SunZEB-ratkaisulle ei ole tarkoituksenmukaista, sillä viilennyksestä saatavan uusiutuvan energian osuuden huomiointi on laskentasääntöjen puitteissa epämääräistä.

Rakennuksen pieni energiantarve selittyy energiatehokkailta rakenneratkaisuilta. Lämmityskaudella auringonsäteily pienentää tilojen lämmitystarvetta. Lisäksi lasitettu parveke muodostaa lämpöhäviötä pienentävän puskurivyöhykkeen. Suuri ikkuna pinta-ala ei kuitenkaan aiheuta vastaavasti suuria lämpöhäviöitä johtuen ikkunan varsin matalasta U-arvosta. Lisäksi on huomioitava, että kyseessä on simuloinnin antama energiankulutus, jolloin lämmitysjärjestelmän säätö ja rakennuksen käyttö on optimaalista.



Kuva 25. SunZEB-kerrostalon energiatase kuukausitasolla. Kaukojäähdytyksellä talteen otettu energia katsotaan uusiutuvaksi energiaksi ja esitetään taseessa negatiivisena.



Kuva 26. SunZEB_v-kerrostalon energiatase kuukausitasolla. Auringolla tuotettu lämpö on uusiutuvaa energiaa ja esitetään negatiivisena.

SunZEB_v-kerrostalon tapauksessa tulokset poikkeavat SunZEB-konseptin mukaisesta kerrostalosta. Lämmityksen osuus energiankulutuksesta kasvaa merkittävästi (41 kWh/m²). Tähän vaikuttavat eniten energiatehottomammat rakenneratkaisut sekä huonompi hyötysuhde ilmanvaihdon lämmöntalteenotossa.

SunZEB_v-kerrostalon uusiutuvan energian ratkaisuksi valittiin aktiivinen aurinkolämpö, joka mitoitettiin tuotannoltaan vastaamaan SunZEB-kerrostalon uusiutuvan energian tuotantoa. Lisäksi ratkaisussa oletettiin, että oman käytön ylittävä kesäajan ylijäämälämpö aurinkokeräimistä voidaan syöttää takaisin kaukolämpöverkkoon. Katolle mitoitettiin optimikulmaan 90 m² ja eteläseinälle pystyyn 110 m² aurinkokeräimiä. Keskimääräinen tuotto oletettiin olevan n. 360 kWh/keräin-m²,a, mikä edustaa hyvän hyötysuhteen keräimen arvoa. Keräinkohtaista ominaistuottoa heikentää jonkin verran kaukolämpöverkon korkea lämpötilataso 80 °C kesäisin, kun ylijäämälämpö siirretään kaukolämpöverkkoon sekä etelän seinän pystysuuntauksen optimikulmasta poikkeaminen. Aurinkolämpökeräimeksi valittiin SavoSolarin tuote.

3.2.5 Sisäolosuhteet

SunZEB-konseptin mukainen asuinkerrostalo on suunniteltu siten, että parvekkeet varjostavat suurinta osaa ikkunoista. Niiden muutamien parvekkeettomalle seinälle sijoitettujen ikkunoiden yläpuolelle on sijoitettu erillinen varjostava rakenne. Näin ollen rakennuksessa ei ole vakavia ongelmia yllämpenemisen suhteen.

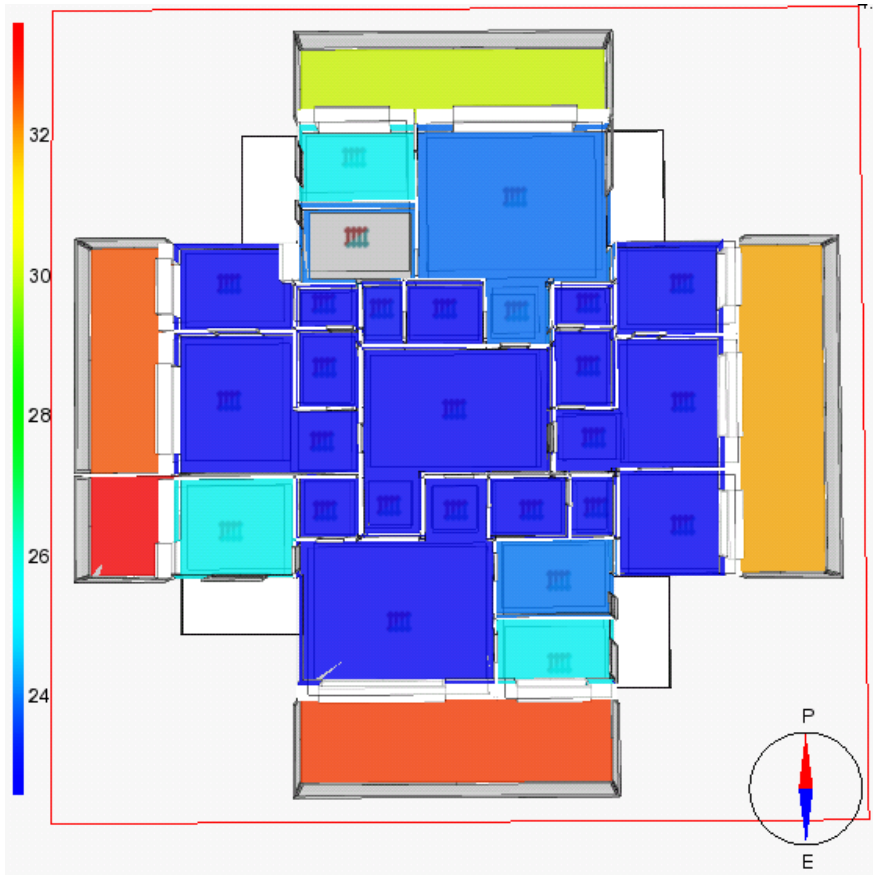
Sisälämpötilan hallinnan kannalta edelleen haastavimpia tiloja ovat pienet ja ikkunalliset huoneet. Näissäkin tapauksissa lämpötila ei ylittänyt asuinrakennuksille vaadittua 27°C maksimilämpötilaa.

Sisälämpötila pystyttiin pitämään suositusten mukaisena käytetyn viilennyksen ansiosta. Alustavissa simuloinneissa todettiin, että ilman jäähdytystä lämpötilat nousisivat helposti lähelle 30°C ja myös astetuntimäärä ylittyisi reilusti.

SunZEB-konseptin mukaisessa kerrostalossa sisäilmastoluokituksen (2008) luokan S2 tavoitearvoja operatiiviselle lämpötilalle ei täysin saavutettu. Tilojen lämpötila ylitti vaatimukset n. 20...40 %:ssa tunneista. Tämä selittyy kuitenkin sillä, että tilan lämpötilan maksimiarvo oli kuitenkin asetettu arvoon 23°C S2 vaatimuksen ollessa lämmityskaudella 22,5°C. Suosituslämpötila ylitettiin pääosin vain muutamilla asteen kymmenyksillä. Asuinkerrostalon maksimilämpötilat on esitetty kuvassa 27.

Sisäilman kosteus pysyi joitain poikkeuksia lukuun ottamatta alle 60 %:ssa ja ylitti 70 % vain yhden tunnin aikana. Ilman kosteuteen olisi voitu tarvittaessa vaikuttaa jäähdyttämällä tuloilmaa matalampaan lämpötilaan. Tätä haluttiin kuitenkin välttää vedontunteen ehkäisemiseksi.

Johtopäätöksenä voidaan sanoa, että sisäolosuhteet on mahdollista saada SunZEB-konseptin mukaisessa kerrostalossa pidettyä hyvälaatuisina ja S2-sisäilmaluokan vaatimukset operatiiviselle lämpötilalle ovat saavutettavissa tarkan viilennyksen ja lämmityksen ohjauksen avulla.



Kuva 27. SunZEB-kerrostalon tilojen maksimilämpötilat. Kuumimmat alueet ovat parvekkeilla. Sisätiloissa lämpenevät ne tilat, joissa on ikkuna vailla parvekkeen antamaa varjostusta.

SunZEB_v-kerrostalossa sisäolosuhteet olivat pääosin samankaltaiset, sillä rakennuksen arkkitehtuuri ja talotekniikan suorituskyky eivät merkittävästi poikenneet SunZEB-kerrostalosta. Huoneiden maksimilämpötilat olivat joissain tapauksissa hieman alempia johtuen ikkunoiden pienemmästä koosta.

3.3 Toimistorakennus

3.3.1 Tilojen kuormitukset simuloinneissa

Toimistorakennuksen simuloinnissa laitekuormat olivat pääosin rakentamismääräskokoelman osan D3 (RakMk D3 2012) mukaiset. Poikkeuksena yhden henki-

lön työhuoneet, joissa kuormitus oli laskettu kannettavan tietokoneen ja näytön arvioidun tehon perusteella.

Valaistuksen teho oli SunZEB-konseptin mukaisessa toimistorakennuksissa 7 W/m^2 , jota voidaan pitää hyvänä arvona energiatehokkaalle valaistukselle. Verrokitoimiston simuloinneissa valaistukselle käytetty arvo oli D3 mukainen 12 W/m^2 , jota voidaan pitää tyypillisenä arvona nykyiselle toimistolle

Valaistusta ohjattiin päivänvalon mukaan siten, että päivänvalon tason ylittäessä 500 lx valaistus sammutettiin ja vastaavasti valaistus oli täydellä teholla päivänvalon valaistustason alittaessa 100 lx.

Henkilökuormituksessa kokonaiskuormitus oli D3 mukainen, mutta läsnäolo profiileja muokattiin vastaamaan paremmin todellisuutta ottamalla huomioon m.-liukuvat työntekijät

Henkilökuormitus arvot olivat samat sekä SunZEB-konseptin mukaisessa että verrokitoimistossa.

3.3.2 Ilmanvaihto

Ilmanvaihto säädettiin kahden eri periaatteen mukaisesti. Pienissä toimistohuoneissa ilmapirtta ohjattiin ilman hiilidioksidipitoisuuden ja lämpötilan funktiona siten, että sisäilman laatu pysyi annetuissa rajoissa. Avotiloissa, käytävillä ilmanvaihdon ilmapirtta oli vakio klo 6...19 ja öiseen aikaan minimiteholla.

Ilmanvaihdon arvot olivat samat sekä SunZEB-konseptin mukaisessa että tyypillisessä toimistotalossa. Ilmanvaihdon puhaltimien SFP-luku oli SunZEB-toimistorakennuksessa $1,2 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ ja tyypillisessä toimistorakennuksessa $2,4 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$

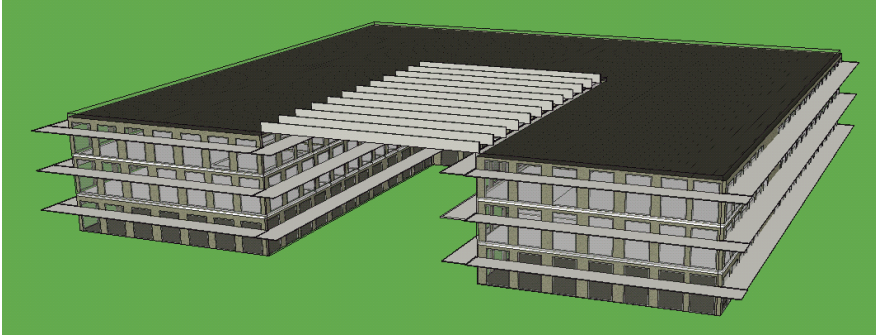
3.3.3 Toimiston simulointimalli

Ensimmäisen toimistorakennuksen tulosten perusteella suunniteltiin SunZeb-konseptia palveleva toimisto (kuva 28). Toimistorakennuksen pinta-ala on noin 2300 m^2 kerrosta kohti. Jokainen kerros voidaan jakaa neljään itsenäiseen osaan esim. eri yrityksille. Edelleen jokainen osa voidaan sisustaa joko avokonttoriksi tai sinne voidaan sijoittaa yksittäisiä työhuoneita. Simulaatiotarkasteluihin valittiin malli, jossa on erisuuntiin sijaitsevia pieniä toimistohuoneita sekä avotoimistotilaa.

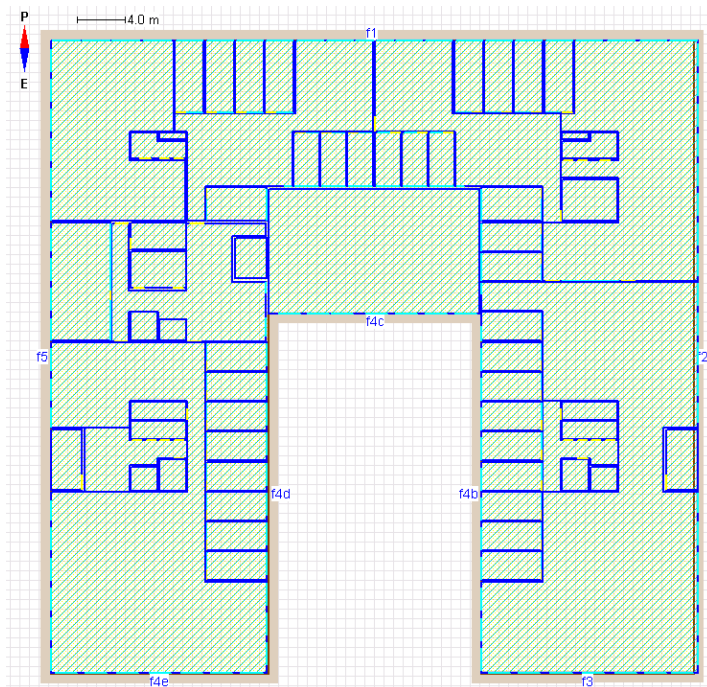
Rakennuksen ikkunapinta-ala on n. 70 % seinäpinta-alasta ja 24 % lattia-alasta. Ikkunat mitoitettiin siten, että ikkunallisesta seinästä ikkunaa on noin 80 %.

Simulointimalli rakennettiin arkkitehtisuunnitelmien (kuvat 11, 12, 13 ja 14) mukaisesti. Rakennus on varjostettu 2 metrin syvyisellä varjostavalla rakenteella joka on sijoitettu 210 cm korkeuteen lattiatasosta. Tällöin jokaisen ikkunan yläosaan jää vielä 70 cm aukko ilman varjostusta. Arkkitehtisuunnitelman mukaista valolippaa rakennuksen sisäpuolelle ei sisällytetty simulointiin sillä sen tarkoituksena on lisätä päivänvalon osuutta tilojen valaistuksessa ja sen vaikutus rakennuksen energiataaseeseen on vähäinen. Rakennuksen keskiosa on varjostettu poikittaisella palkkirakenteella.

Simulointia varten mallinnettiin rakennuksen yhdeksästä kerroksesta kolme, joista keskimmäisen energiankulutus kerrottiin seitsemällä. Sinne sijoitettiin myös työhuoneita ja muita tiloja sisäolosuhteiden mallintamiseksi. Ylin ja alin kerros simuloitiin yhtenä tilana.



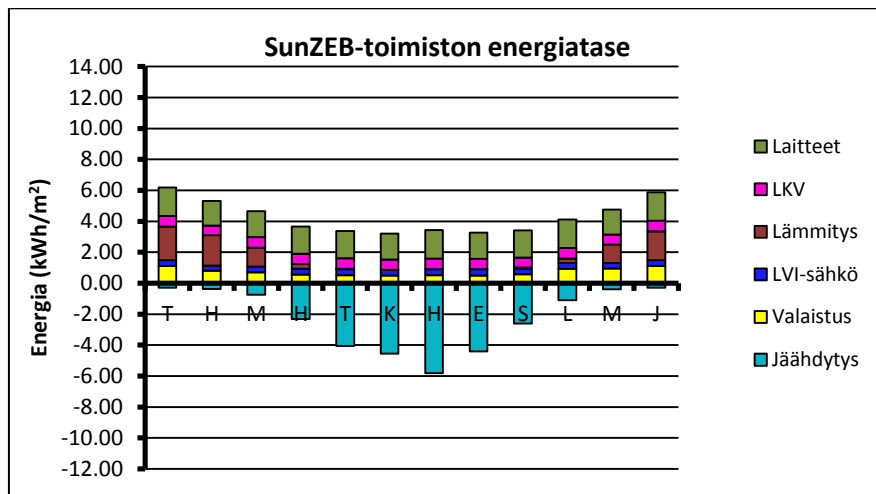
Kuva 28. SunZEB-toimistorakennuksen simulointimalli johdettuna arkkitehtimallista (Kappale 2.3). Simulointi tehtiin kolmekerroksiselle mallille ja keskimmäisen kerroksen energiankulutus kerrottiin 7:llä. Ylin ja alin kerros mallinnettiin yhtenä tilana.



Kuva 29. Toimistorakennuksen simuloinneissa käytetty vyöhykejako kerroksissa 2...8. Kerrokset 1 ja 9 mallinnettiin yhtenä vyöhykkeenä.

3.3.4 Toimiston energiatase

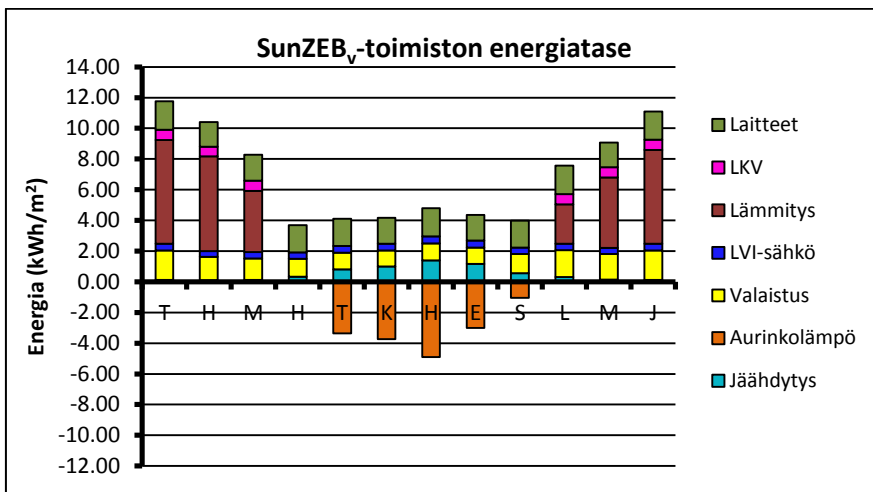
SunZEB-konseptin mukaisessa toimistorakennuksessa lämmityksen tarve on melko vähäinen, $9,1 \text{ kWh/m}^2$. Rakennuksesta jäähdytyksen avulla poistetun lämmön osuus on kohtalaisen suuri (27 kWh/m^2). Kuukausittainen energian ominaiskulutus on esitetty kuvassa 30. Rakennuksen pieni energiantarve selittyy energiatehokkailla rakenneratkaisuilla sekä suurella ikkunapinta-alalla. E-luvun laskeminen SunZEB-ratkaisulle ei ole tarkoituksenmukaista, sillä viilennyksestä saatavan uusiutuvan energian osuuden huomiointi on laskentasääntöjen puitteissa epämääräistä.



Kuva 30. SunZEB-toimiston energiatase kuukausitasolla. Kaukojäähdytyksellä talteen otettu energia katsotaan uusiutuvaksi energiaksi ja esitetään taseessa negatiivisena.

SunZEB_v-toimistorakennuksen -tapauksessa tulokset poikkeavat SunZEB-konseptin mukaisesta toimistorakennuksesta. Lämmityksen osuus energiankulutuksesta kasvaa merkittävästi (45 kWh/m^2). Tähän vaikuttavat eniten energiatehottomammat rakenneratkaisut sekä huonompi hyötysuhde lämmöntalteenotossa.

SunZEB_v-toimiston uusiutuvan energian ratkaisuksi valittiin aktiivinen aurinkolämpö, joka mitoitettiin tuotannoltaan vastaamaan SunZEB-toimiston uusiutuvan energian tuotantoa. Lisäksi ratkaisussa oletettiin, että oman käytön ylittävä kesäajan ylijäämälämpö aurinkokeräimistä voidaan syöttää takaisin kaukolämpöverkkoon. Katolle mitoitettiin optimikulmaan 900 m^2 ja eteläseinälle ikkunan aurinkosuojauksen vaakarakenteeseen 20 asteen kulmaan 590 m^2 aurinkokeräimiä. Keskimääräinen tuotto oletettiin olevan n. $375 \text{ kWh/keräin-m}^2\text{,a}$, mikä edustaa hyvän hyötysuhteen keräimen arvoa. Keräinkohtaista ominaistuottoa heikentää jonkin verran kaukolämpöverkon korkea lämpötilataso 80 °C kesäisin, kun ylijäämälämpö siirretään kaukolämpöverkkoon sekä etelän seinän pystysuuntauksen optimikulmasta poikkeaminen. Aurinkolämpökeräimeksi valittiin SavoSolarin tuote.



Kuva 31. SunZEB_v-toimiston energiatase kuukausitasolla. Auringolla tuotettu lämpö on uusiutuvaa energiaa ja esitetään negatiivisena.

3.3.5 Sisäolosuhteet

Sisälämpötilan hallinnan kannalta ongelmallisimpia tiloja länteen ja itään suuntautuvat pienet työhuoneet. Simuloinneissa huomattiin, että varjostavilla rakenteilla suoran auringon paisteen aiheuttamia lämpöpiikkejä on mahdollista hallita tehokkaasti. Kun ilman varjostusta pienen työhuoneen astetuntimäärä saattoi nousta reilusti yli D3 ohjearvon 150, niin käyttämällä varjostavia rakenteita astetuntimäärä putosi pahimmassakin tapauksessa alle kymmeneen (kuva 32). Myös kaihtimien käytöllä on pieni vaikutus vaikkakin kiinteän ikkunan tapauksessa käytetyt sisäpuoliset kaihtimet eivät erityisen hyvin suojaa lämpösäteilyltä.

Simuloiduissa tapauksissa Sisäilmastoluokituksen (2008) luokan S2 tavoitearvoja operatiiviselle lämpötilalle ei täysin saavutettu. Pahimmassa tapauksessa eli pienessä länteen suuntautuvassa toimistohuoneessa suosituksen operatiivinen lämpötila ylitettiin 38 % tunneista. Ylitykset olivat kuitenkin maltillisia ja johtuivat osin viilennykselle säädetystä 23°C lämpötilasta. 25°C ylittäviä tunteja oli vain alle 5 % ja tällöinkin maksimilämpötila oli 25,5°C.

Avotiloissa tilanne oli parempi. 24 % tunneista ylitti S2 suositusarvon, mutta yli 25°C lämpötiloja ei esiintynyt. Simulointimallissa pieniä toimistohuoneita ei sijoitettu itä-, länsi tai länsijulkisivuille. Simulointien perusteella voidaan kuitenkin sanoa, että niissä lämpöolosuhteiden hallinta olisi haastavampaa kuin sisäpihan julkisivuille tai pohjoiseen suunnatuissa pienissä työhuoneissa.

Sisäilman kosteus pysyi joitain poikkeuksia lukuun ottamatta alle 60 %:ssa ja ylitti 70 % vain yhden tunnin aikana. Ilman kosteuteen olisi voitu tarvittaessa vaikuttaa jäähdyttämällä tuloilmaa matalampaan lämpötilaan. Tätä haluttiin kuitenkin välttää vedontunteen ehkäisemiseksi.

SunZEB_v-toimiston sisäolosuhteet olivat lämpötilan osalta samankaltaiset. Tämä on ymmärrettävää, sillä suurimmat ongelmat liittyivät tilojen liialliseen lämpenemiseen ja molemmissa tapauksissa ikkunoiden g-arvo oli samaa suuruusluokkaa. Lämmityskaudella rakennuksen lämmitysjärjestelmä oli riittävän tehokas kompensoimaan rakenteiden korkeamman U-arvon mukaan tuoman lämpöhäviön.

Johtopäätöksenä voidaan sanoa, että sisäolosuhteet saadaan SunZEB-konseptin mukaisessa toimistorakennuksessa pidettyä hyvälaatuisina ja S2 vaatimuksen operatiiviselle lämpötilalle ovat saavutettavissa tarkan viilennyksen ja lämmityksen ohjauksen avulla.



Kuva 32. SunZEB-toimiston asetunnit.

3.4 Talotekniikan kehitystarpeet

SunZEB-konseptin mukainen rakennus vaatii talotekniikalta tarkkaa ohjausta. Erityisesti nyt simuloituissa kohteissa, joissa ilmanvaihto säädettiin toimimaan vain omassa tehtävässä eikä varsinaisesti viilentämään tai lämmittämään tiloja, on varsinaisen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmän kyettävä mukautumaan vaihteleviin olosuhteisiin. Vaihtelevat olosuhteet asettavat myös uusia vaatimuksia automaati-

on integraatiolle ja säädön nopeudelle, jotta päällekkäinen lämmitys ja jäähditys voidaan välttää.

Auringon aiheuttama yllämpeneminen sekä häikäisy ovat myös asioita, joita tulevaisuudessa on pyrittävä hoitamaan talotekniikan avulla. Simuloinneissa oletettiin, että ikkunoiden kaihtimet toimivat optimaalisesti, eli sulkeutuvat kun auringon säteilyn intensiteetti ulkopuolella ylittää 300 W/m^2 . Käyttäjät eivät kuitenkaan ohjaa kaihtimia optimaalisesti ja etenkin toimistorakennuksessa ne usein suljetaan kun aurinko alkaa häikäistä eikä niitä muisteta avata loppupäivästä. Näin auringon mahdollinen lämpö jää rakennuksen ulkopuolelle myös seuraavana aamuna

Kolmas talotekninen kysymys on ilmanvaihdon ohjaus. Simuloinneissa käytettiin osin muuttuvalla ilmavirralla ja CO_2 -ohjauksella varustettua ilmanvaihtoa. Tällä järjestelyllä ilma pysyy aina raikkaana ja sekä ilmanvaihtokoneen sähköä että poistoilman mukana karkaavaa lämpöä säästyy. Tällaisen järjestelmän käyttö esimerkiksi kotiolosuhteissa olisi hyvinkin perusteltua.

3.5 Energiavirtojen kierrätys ja uusiutuva energia

Tässä kappaleessa esitetään optimaalisten SunZEB-ratkaisujen tasetarkastelu Helsingin energian tuotantojärjestelmässä. Kappaleessa 3.2 esitetyt optimoidut SunZEB-sunnitteluratkaisut liitettiin aluetasolle ja ratkaistiin aluetason uusiutuvan energian osuus ja takaisinkierätykset.

Tarkastelussa etsittiin optimaalisten ratkaisujen passiivinen aurinkoenergian hyödyntäminen Helsingin Energian alueverkossa. Takaisinkierätykset toteutettiin Katri-Valan lämpöpumppulaitoksella Helsingin energian lähtötietojen mukaan. Hypoteesina uusiutuvan tuotantoon käytettiin energiavirtojen kierrätystä ja sen maksimipotentiaalia, siten että käyttäjien sisäolosuhteet säilyvät laadukkaina. Rakennus toimi siis suurena aurinkokerääjänä ja sitä kautta uusiutuvan tuottajana. Lisäksi oletettiin, että kerätty aurinkoenergia on hyödynnettävissä kaukolämpöjärjestelmän piirissä olevissa kiinteistöissä samanaikaisesti.

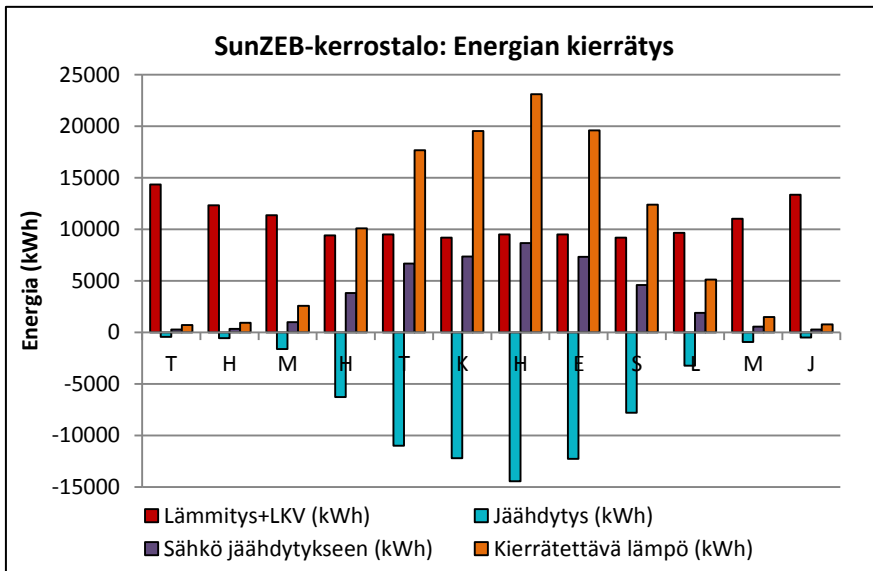
Tuloksena saatiin yksittäisen SunZEB-rakennuksen uusiutuvan energian potentiaali kaukolämmössä, kun kaukojäähdytyksessä on aluetason lämpöpumppu. Tulokset on esitetty kappaleessa 3.5.1.

3.5.1 Uusiutuvan energian osuus asuin- ja toimistorakennuksissa ja SunZEB-ratkaisulla

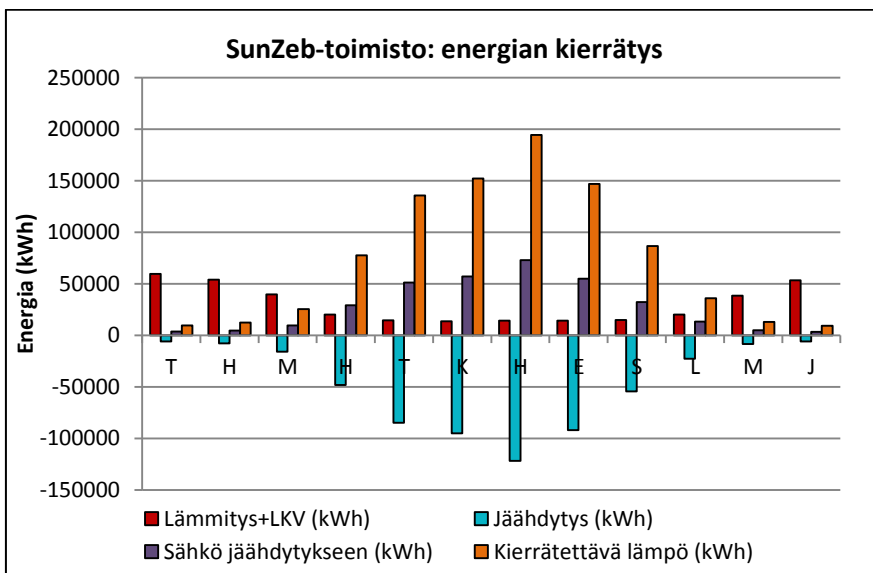
SunZEB-konseptin mukaisessa asuin- ja toimistorakennuksessa kierrätetyn energian osuus rakennuksen koko lämmöntarpeesta on 55 % (kuva 33). SunZEB-toimistossa vastaava luku on 157 % eli yli kaksinkertaisesti rakennuksen oman tarpeen verran. Tästä osa on talteen otettua auringon lämpöä ja merkittävä osa on peräisin rakennuksen kuormista (valaistus, laitteet, ihmiset). Näitä lämpöenergian lähteitä ei simuloinneista voitu erottaa toisistaan.

Vaikka molemmissa rakennuksissa jäähdityksellä talteen otetut energian määrät on lähes sama (26 ja 27 kWh/m^2) ja toimiston tilojen lämmitykseen kuluvan

energian kulutus hieman suurempi kuin asuinkerrostalossa (9,1 ja 8 kWh/m²) on asuinkerrostalossa lämpimän käyttöveden vaatima energiamäärä moninkertainen toimistoon verrattuna (41 ja 8 kWh/m²). Luvut on esitetty taulukossa 3.



Kuva 33. Kierrätetty energia SunZEB-asuinkerrostalossa sisältäen



Kuva 34. Energian kierrätys SunZEB-toimistossa.

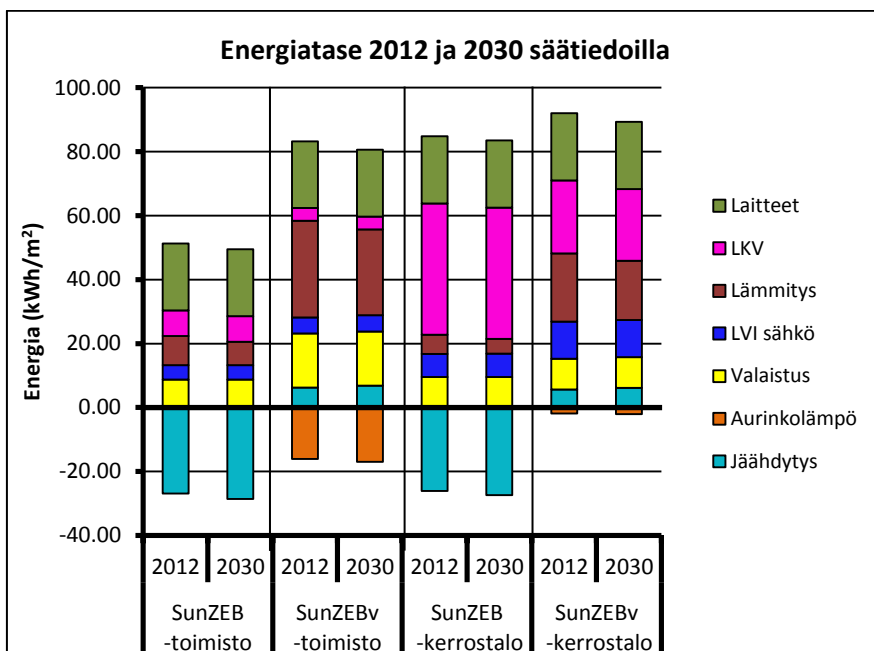
Taulukko 3. Energian kierrätys SunZEB-rakennuksissa

	SunZEB-kerrostalo	SunZEB-toimisto
Lämmitys	8 kWh/m ²	9,1 kWh/m ²
Jäähdytyksellä talteen otettu energia	26 kWh/m ²	27 kWh/m ²
LKV	41 kWh/m ²	8 kWh/m ²
Kierrätettävän energian osuus	55 %	157 %

3.6 Ilmastonmuutoksen vaikutus SunZEB-ratkaisun energiankäyttöön 2030

Tässä kappaleessa tarkastellaan SunZEB-ratkaisun energiankulutuksen muutosta verrattuna nykyiseen ilmastoon. Ilmatieteen laitos on tehnyt tutkimuksissaan ennusteen sään muuttumisesta tulevaisuudessa (Jylhä et al. 2011). SunZEB-ratkaisun toimivuutta tarkasteltiin tulevaisuuden ennustetulla muuttuneella säällä. Suomi sijaitsee alueella, jossa lämpötilan nousun arvioidaan olevan selvästi voimakkaampaa kuin koko maapallon keskimääräinen lämpeneminen. Lisäksi muutokset näyttävät olevan suurempia talvella kuin kesällä. Lämpenemisen ohella sademäärien arvioidaan kasvavan. Lämpötilojen osalta ennustetaan talvilämpötilojen kohoavan sekä hyvin alhaisten lämpötilojen ennustetaan harvinaistuvan. Lisäksi hellejaksot yleistynevät, millä on erityisesti vaikutusta SunZEB-ratkaisuun. Energiasimuloinneissa käytettiin Ilmatieteen laitoksen tekemää ennustetta vuodelle 2030 (Ilmatieteenlaitos 2015). Tyyppivuosi 2030 on arvioiva kuvaus tilastollisesti tyypillisen vuoden säätiedoista. Siinä eivät tule esille mitoitustilanteet kylmillä jaksoilla eikä pitkäkestoisten hellejaksojen vaikutus.

Kuvassa 35 on esitetty simulointien tulokset kootusti vuositasolla. Siitä voidaan nähdä, että ilmaston lämmittäessä rakennuksesta on jäähdytyksen avulla poistettava nykyistä enemmän energiaa.

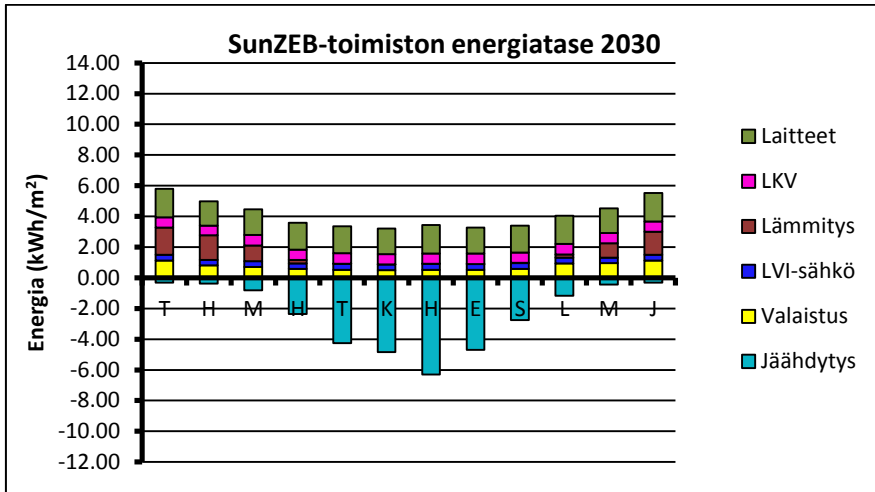


Kuva 35. SunZEB-konseptin mukaisten ja tyypillisten rakennusten energiataseet simuloituna vuosien 2012 ja 2030 säätiedoilla. SunZEB-ratkaisuissa jäähdytyksellä talteenotettu energia on merkitty negatiiviseksi. Huomioitava on, että SunZEBv-tapauksessa jäähdytys tuotetaan sähköllä (COP = 3), jolloin jäähdytyksen energiantarve on pienempi kuin kaukojäähdytyksen tapauksessa.

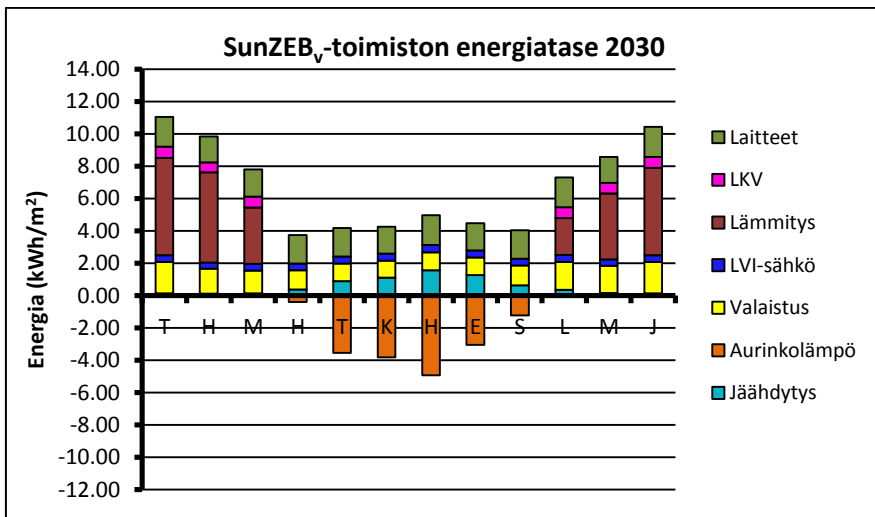
SunZEB-toimiston tapauksessa lisäys on 6,3 % ja SunZEB-asunnossa 5,0 %. Kaukolämmön tarve pienenee toimistossa 10,5 % ja kerrostalossa 3,0 %. Prosentuaalisen vähenemän suureen eroon toimiston ja kerrostalon välillä vaikuttaa kerrostalon merkittävästi suurempi lämpimän käyttöveden kulutus. Tyypillisessä toimistossa tarvittavan jäähdytyksen määrä kasvaa 10 % ja tyypillisessä kerrostalossa 8,5 %. Kaukolämmön tarve kasvaa tyypillisessä toimistossa 9,7 % ja kerrostalossa 7,3 %.

Kuvissa Kuva 36, Kuva 37, Kuva 38 ja Kuva 39 on esitetty rakennusten energian kulutus kuukausitasolla vuoden 2030 ennustetuilla säätiedoilla simuloituna. Kuukausittaisissa energiakulutuksissa ei ole nähtävillä erityistä nousua esimerkiksi kesäkuukausien jäähdytyksen osalta.

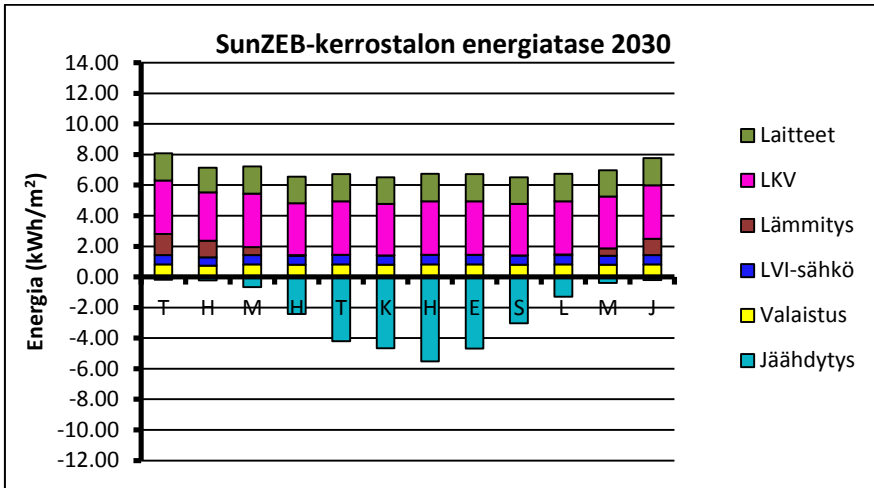
Johtopäätöksenä voidaan sanoa, että SunZEB-konseptin mukainen rakennus on immuunimpi ilmastomuutoksen aiheuttamalle energian tarpeen muutokselle kuin tyypilliset rakennukset.



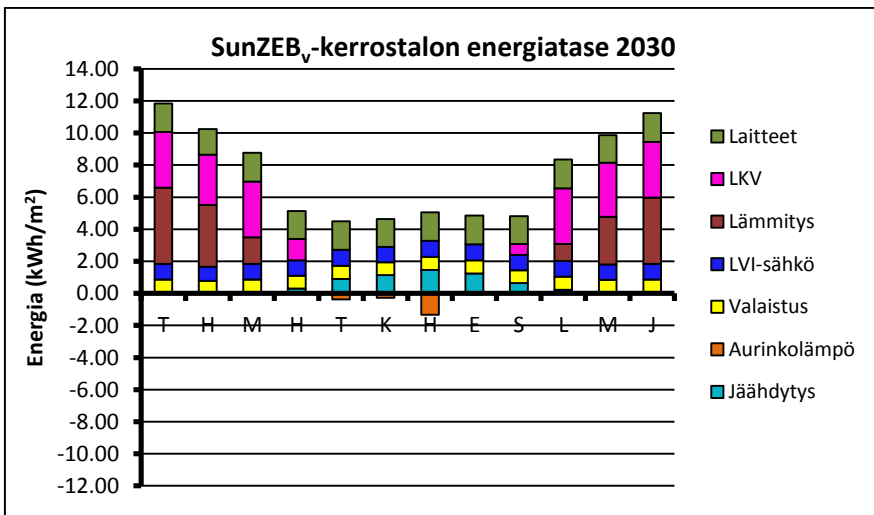
Kuva 36. SunZEB-toimiston energiatase kuukausitasolla laskettuna vuoden 2030 säätiedoilla. Kaukojäähdytyksellä talteen otettu energia katsotaan uusiutuvaksi ja esitetään taseessa negatiivisena.



Kuva 37. SunZEB_v-toimiston energiatase kuukausitasolla laskettuna vuoden 2030 säätiedoilla. Auringolla tuotettu lämpö on uusiutuvaa energiaa ja esitetään negatiivisena.



Kuva 38. SunZEB-kerrostalon energiatase kuukausitasolla laskettuna vuoden 2030 säätiedoilla. Kaukojäähdytyksellä talteen otettu energia katsotaan uusiutuvaksi energiaksi ja esitetään taseessa negatiivisena.



Kuva 39. SunZEB_v-kerrostalon energiatase kuukausitasolla laskettuna vuoden 2030 säätiedoilla. Auringolla tuotettu lämpö on uusiutuvaa energiaa ja esitetään negatiivisena.

4. Elinkaarikustannustarkastelut

Tässä kappaleessa tarkastellaan SunZEB -suunnitteluratkaisun pääoma- ja elinkaarikustannuksia ja vertaillaan niitä nykyisen rakentamistavan vastaaviin seuraavin vertailuperustein.

- **SunZEB** -ratkaisu, jossa uusiutuvan energian tuotto rakennukseen toteutetaan kierrättämällä rakennuksen kaukojäähdytysenergia lämpöpumpun kautta takaisin kaukolämpöön. Vaipparakenteiden lämpöhäviöt ovat kokonaisuudessaan samaa suuruusluokkaa kuin verrannollisessa ratkaisussa ikkuna-alan ollessa huomattavasti isompi.
- Verrannollinen ratkaisu **SunZEB_v**, joka on olosuhteiltaan (Sisäilma-luokka S2) yhteneväinen SunZEB – ratkaisun kanssa. **SunZEB_v** -ratkaisussa on aurinkolämmitys, jossa rakennuksessa hyödynnetyn uusiutuvan aurinkoenergian määrä on sama kuin SunZEB – ratkaisun uusiutuvan tuotto.

Päätavoitteena oli määrittää kehitetyn SunZEB - ratkaisun taloudellisuuspotentiaali. Lisäksi määriteltiin suuruusluokkaiset investointikustannuserot suhteessa Minimitasoon, mikä ei sisällä aurinkolämpöä ja jäähdytystä. Menettelytapa, yksityiskohtaiset lähtötiedot ja tulostaulukot on esitetty liitteessä B.

Taloudellisuuslaskenta toteutettiin 20 vuoden laskentajaksolle ottaen huomioon seuraavat elinkaarikustannustekijät:

- Hankintakustannus (investointikustannus) kattaen suunnittelun ja rakentamisen kokonaiskustannukset
- Pääomakustannus (= hankintakustannus + rahoituskustannus - jäänösarvo); ollen huomattavasti investointikustannusta alhaisempi
- Huolto- ja kunnossapitokustannus, mikä on suhteellisen alhainen, koska rakennusosia tai järjestelmiä ei tarvitse laskentajaksolla uusia
- Energiakustannus; energiamaksu lähtökohtaisesti 1/2015 keskimääräisin kausitariffein sekä perusmaksu perustuen liityntätehoihin Helsingissä

Rahoituskustannukset on määritetty käyttäen 1 %:n reaalkorkoa.

4.1 Asuinkerrostalo

Taulukossa 3 on esitetty SunZEB –ratkaisun ja siihen verrannollisen SunZEBv –ratkaisun hankintakustannukset (investointikustannukset), energiakustannukset sekä elinkaarikustannukset lämmitettyä nettoalaa ($n\text{-m}^2$), kohti. Hankintakustannusten osalta on määritetty spekuloitu energiatehokkuudesta riippumaton peruskustannus ($1\,500\text{ €/n-m}^2$), mihin lisätty laskennalliset rakennusvaipan ja talotekniikan kustannukset. Laskentaperusta ja tulostaulukko on esitetty liitteessä B.

Taulukko 4. SunZEB -ratkaisun ja SunZEBv –ratkaisun hankinta- ja elinkaarikustannukset 20 vuoden laskentajaksolla asuinkerrostalossa lämmitettyä nettoalaa (€/n-m^2) kohti.

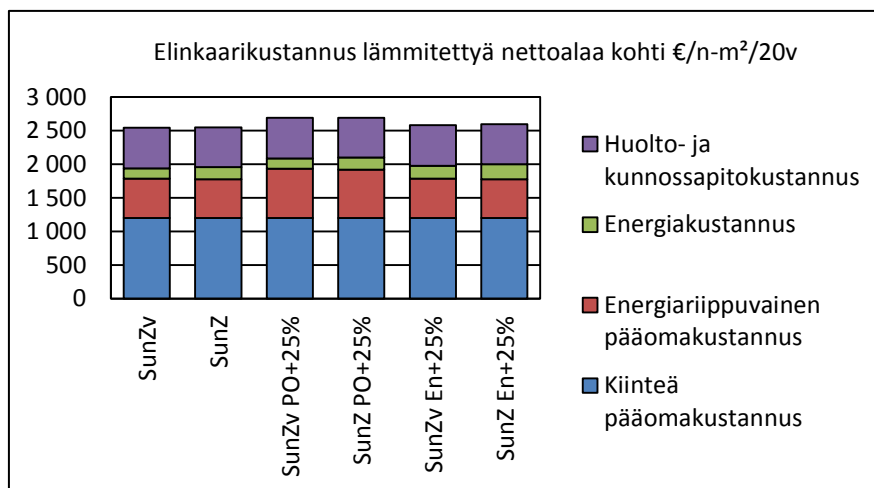
Kerrostaloratkaisu	Hankintakustannus (€/n-m^2)	Energia-kustannus ($\text{€/n-m}^2/20\text{v}$)	Elinkaari-kustannus ($\text{€/n-m}^2/20\text{v}$)	Sisäilma-luokka	Uusiutuvan energian tuotto* (%)
SunZEB	2138	182	2690	S2	55
SunZEBv	2235	153	2678	S2	55
SunZEBv ei aurinkolämpöä	2058	176	2647	S2	0
SunZEBv ei jäähdytysjärjestelmää	2099	143	2633	S3	55
SunZEBv ei aurinkolämpöä eikä jäähdytysjärjestelmää (Minimitaso)	2024	166	2598	S3	0

* Teoreettinen keräinpinta-alalla 90 m^2 optimikulmassa katolla ja 110 m^2 eteläseinällä pystysuorassa

Kuvassa 40 on esitetty asuinkerrostalovaihtoehtojen elinkaarikustannukset ja herkkyystarkastelun tulokset

Asuinkerrostalon osalta SunZEB -ratkaisun hankintakustannus (investointikustannus) on samaa suuruusluokkaa kuin SunZEBv -ratkaisun. SunZEBv -ratkaisun hankintakustannuksia nostavat erilliset aurinkolämpö- ja jäähdytysjärjestelmät vaipparakenteiden kustannusten ollessa SunZEB -ratkaisussa korkeammat. SunZEB –ratkaisun elinkaarikustannukset ovat samaa suuruusluokkaa kuin SunZEBv –ratkaisun. Tasaisuus säilyy myös muin kriittisin herkkyystarkastelutekijöihin. Mikäli kaukojäähdytyksen perusmaksua ja samalla elinkaarikustannusta olisi mahdollista alentaa esimerkiksi 20 %, ratkaisu olisi noin $10\text{ €/m}^2/\text{v}$ edullisempi elinkaarikustannuksiltaan tarkasteltujen ratkaisujen tapauksessa.

SunZEB –ratkaisun investointikustannuslisä olisi noin 100 €/m² (130...150 €/as-m²), mikäli SunZEBv -ratkaisussa ei olisi sen enempää jäähdytystä kuin aurinkolämpöä. Samalla elinkaarikustannus olisi noin 90 €/m² (6...7 €/as-m²/v) korkeampi. Mikäli molemmilla vaihtoehdoilla on sama jäähdytysjärjestelmä, eivät hankinta- tai elinkaarikustannuserot juurikaan muutu perusvaihtoehtoon verrattuna. Nämä vertailut eivät kuitenkaan osoita taloudellisuuseroja, koska vertailuperusta (sisäilmaluokka ja uusiutuvan energian tuotto) ei ole yhteneväinen.



Kuva 40. SunZEBv - ja SunZEB -ratkaisujen elinkaarikustannukset lämmitettyä nettoalaa kohti (€/m²/20v) perustapauksissa sekä, mikäli pääomakustannukset (PO) tai energiakustannukset (En) olisivat 25 % korkeammat nykyarvona 20 vuoden laskentajaksolla asuinrakennusten osalta.

Kuvassa alin palkki kattaa ne pääomakustannukset, jotka eivät ole energiatehokkuusriippuvaisia ollen siten samat molemmissa vaihtoehdoissa. Huolto- ja kunnossapitokustannukset kattavat niin ikään koko rakennuksen. SunZEBv –ratkaisun huolto- ja kunnossapitokustannukset verrattuna SunZEB –ratkaisuun ovat hieman korkeammat johtuen pääosin erillisistä jäähdytys- ja aurinkolämpöjärjestelmistä. Energiariippuvaiset pääomakustannukset sekä energiakustannukset on eritelty liitteessä B.

Uusiutuvan energian tuotto on kannattavampaa asuinrakennuksen SunZEB-ratkaisussa kuin erillisen aurinkolämpöjärjestelmän keinoin.

4.2 Toimistorakennukset

Taulukossa 4 on esitetty SunZEB –ratkaisun mukaisen ja siihen verrannollisen SunZEBv –ratkaisun mukaiset hankintakustannukset (investointikustannukset), energiakustannukset sekä elinkaarikustannukset lämmitettyä nettoalaa kohti. Hankintakustannusten lähtökohdaksi on määritetty spekuloitu energiatehokkuus-

desta riippumaton peruskustannus (1700 €/n-m²), mihin lisätty laskennalliset rakennusvaipan ja talotekniikan rakennusosakustannukset. Laskentaperusta ja tulostaulukko on esitetty liitteessä B.

Taulukko 5. SunZEB -ratkaisun ja SunZEBv -ratkaisun hankinta- ja elinkaarikustannukset lämmitettyä nettoalaa (€/n-m²) kohti 20 vuoden laskentajaksolla toimistorakennuksessa.

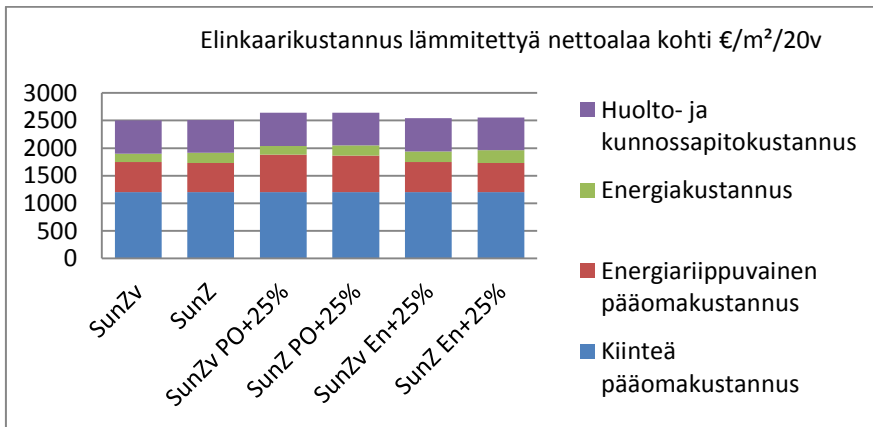
Toimistorakennus-ratkaisu	Hankintakustannus (€/n-m ²)	Energia-kustannus (€/n-m ² /20v)	Elinkaari-kustannus (€/n-m ² /20v)	Sisäilma-luokka	Uusiutuvan energian tuotto* (%)
SunZEB	2281	134	2620	S2	157
SunZEBv	2306	128	2658	S2	157
SunZEBv ei aurinkolämpöä	2228	138	2598	S2	0

* Teoreettinen keräinpinta-alalla 900 m² katolla optimikulmassa ja 590 m² 20 asteen kulmassa eteläseinällä

Kuvassa 41 on tarkasteltu vaihtoehtojen elinkaarikustannuksia toimistorakennuksen osalta (laskentaperusta ja tulostaulukko liitteessä B).

Toimistorakennuksen osalta SunZEB -ratkaisun hankintakustannus (investointikustannus) ja sen pohjalta määritetty pääomakustannus samoin kuin elinkaarikustannukset ovat hieman alhaisemmat kuin SunZEBv -ratkaisun. Vuosikustannukset alenevat noin 2 €/n-m²/v. SunZEB -ratkaisun hankintakustannuslisä olisi noin 50 €/n-m², mikäli SunZEBv -ratkaisussa ei olisi aurinkolämpöä. Samalla elinkaarikustannus olisi noin 1 €/m²/v korkeampi.

SunZEB -ratkaisu pysyy elinkaarikustannuksiltaan edullisempänä ratkaisuna kriittisin herkkyystartastelutekijöihin.



Kuva 41. SunZEB- ja SunZEBv –ratkaisujen elinkaarikustannukset lämmitettyä nettoalaa kohti (€/n-m²/20v) perustapauksissa sekä, mikäli pääomakustannukset tai energiakustannukset olisivat 25 % korkeammat nykyarvona 20 vuoden laskentajaksolla toimistorakennusten osalta.

4.3 Johtopäätöksiä

Asuinrakennusten osalta ratkaisuvaihtoehtojen hankintakustannusero (investointikustannusero) on hyvin vähäinen. Elinkaarikustannukset ovat SunZEB – ratkaisun osalta noin 0,2 €/n-m²/v eli 0,017 €/n-m²/kk korkeammat ottaen huomioon hankinta-, rahoitus-, energia- ja huolto- ja kunnossapitokustannukset samoin kuin jäähdytysarvo. SunZEB – ratkaisun hankintakustannuslisä olisi noin 100 €/n-m² (130–150 €/as-m²/v), mikäli SunZEBv -ratkaisussa ei olisi sen enempää jäähdytystä kuin aurinkolämpöä.

Samalla elinkaarikustannus olisi noin 4,5 €/n-m²/v (6–7 €/as-m²/v) korkeampi. Jos SunZEBv – ratkaisussa on jäähdytys, mutta ei aurinkolämpöä, on SunZEB -ratkaisu hankintakustannukseltaan noin 70 €/n-m² (90–110 €/as-m²) ja elinkaarikustannuksiltaan noin 1,75 €/n-m²/v kalliimpi.

Toimistorakennuksen osalta SunZEB – ratkaisun hankintakustannus ja sen pohjalta määritetty pääomakustannus samoin kuin elinkaarikustannukset ovat hieman alhaisemmat kuin SunZEBv – ratkaisun. Vuosikustannukset alenevat noin 2 €/n-m²/v. SunZEB – ratkaisun hankintakustannuslisä olisi noin 50 €/n-m², mikäli SunZEBv -ratkaisussa ei olisi aurinkolämpöä. Samalla elinkaarikustannus olisi noin 1 €/m²/v korkeampi.

SunZEB -ratkaisu pysyy elinkaarikustannuksiltaan edullisempänä ratkaisuna kriittisin herkkyytystarkastelutekijöin.

Jälleenmyyntiarvon voi SunZEB – ratkaisun osalta odottaa olevan koko laskentajakson ajan SunZEBv – ratkaisua hieman korkeampi.

Erityisesti uusiutuvaan omavaraisenergiaan ja jäähdytysvaatimukseen liittyvällä toteutusratkaisulla samoin kuin ikkuna-alalla voidaan huomattavasti vaikuttaa

kokonaistaloudellisuuteen. Aurinkolämpöenergiajärjestelmä erillisenä omavaraisenergiaratkaisuna muodostui tarkastelluissa SunZEBv -ratkaisuihin epätaloudelliseksi.

Ilmaston lämpenemisen kustannusvaikutus (vuoden 2030 tilanteessa) on muutoin hyvin vähäinen paitsi, että jäähdytyksen kustannustehokkuuden merkitys lisääntyy toimistorakennusten osalta.

Laskentajakson pituuden lisääminen heikentää hieman SunZEB – ratkaisun kannattavuutta, koska vuotuiset energiakustannukset ovat korkeammat.

Energiatehokkuuden ollessa tasapainottelua sisäolosuhdetavoitteiden, päästötavoitteiden ja uusiutuvan energian osuuden sekä investointikustannusten ja kustannustehokkuuden kesken, tulee kustannusohjaukseen kiinnittää huomattavaa huomiota koko yhteistyömuotoisen hankeprosessin ajan.

Yleispätevästi voi SunZEB – ratkaisun kannattavuudesta tehdä seuraavat johtopäätökset

- Tarjoaa toimintavarmun ja kustannustehokkaan jäähdytysratkaisun
- Mahdollistaa ison ikkuna-alan energia- ja kustannustehokkain keinoin
- Laaja alueellinen kattavuus mahdollistaen mittakaavaedut

5. SunZEB ratkaisun vaikutukset aluetasolla

SunZEB-konseptin alueellisia vaikutuksia verrattuna SunZEB verrokkitapaukseen on tarkasteltu skenaariotarkastelujen avulla uudis- ja korjausrakentamiselle. Skenaariotarkasteluissa on käytetty yksinkertaistettua mallia alueellisesta energiajärjestelmästä, joka ottaa huomioon myös muutosten vaikutukset Suomen sähkön tuotantoon. Skenaariotarkasteluissa tarkastellaan muutoksia suhteessa valittuun referenssivuoteen, joka on 2012.

Skenaariotarkastelujen tuloksena on saatu vaikutukset kaukolämmön ja – jäähdytyksen tuotantoon, sähkönkulutukseen ja – tuotantoon, primäärienergiaan ja CO₂-päästöihin. Vaikutukset on laskettu suhteessa skenaarioiden uudis- tai korjausrakentamisen määrään.

Skenaarioiden perusteella SunZEB-konseptin vaikutukset tarkastellun paikallisen alueen polttoaineiden primäärienergiaan ja CO₂-päästöihin ovat uudisrakentamisessa 76–117 % ja korjausrakentamisessa 1-6 % alhaisemmat kuin SunZEBv -tapauksissa, joissa on käytössä rakennuskohtainen jäähdytysjärjestelmä ja aurinkokeräimet. Jos verrataan vain jäähdytyksen tuotannon tuomia eroja ja pidetään itse rakennus vakiona, saavutetaan kaukojäähdytyksellä 17 % -42 % alhaisemmat päästövaikutukset verrattuna rakennuskohtaiseen jäähdytysjärjestelmään aluetasolla.

Kun otetaan huomioon myös skenaarioiden vaikutukset valtakunnalliseen sähköntuotantoon, ei eri skenaarioita voida laittaa suoranaisesti varsinaiseen paremmuusjärjestykseen primäärienergian tai CO₂-päästöjen näkökulmasta. SunZEB-konseptin ja verokkiratkaisun vaikutukset ovat likipitään yhtä suuret. Sama tilanne on vertailtaessa vain jäähdytyksen tuotantotapoja keskenään

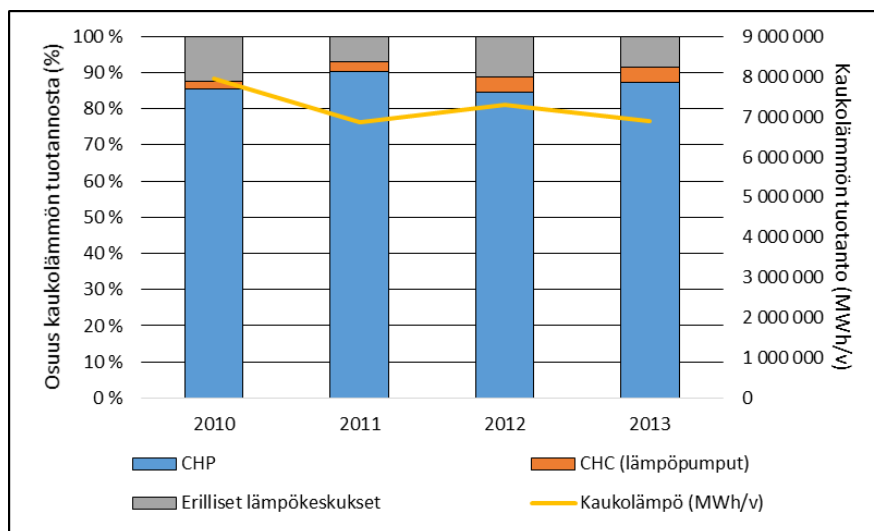
Tulokset osoittavat, että primäärienergian ja CO₂-päästöjen näkökulmasta on hyvin olennaista, kuinka poistuva yhteistuotantosähkö korvataan ja lisääntyvä sähkönkäyttö tuotetaan koko Suomen sähkön tuotannossa. Näin ollen on mahdollista, ettei SunZEB -konseptissa kannata yrittää maksimoida jäähdytysenergian tarvetta ja tätä kautta CHC:n (lämpöpumppu, joka tuottaa kaukolämpöä ja kaukojäähdytystä samanaikaisesti) tuotantoa.

5.1 Helen Oy:n tuotantorakenne

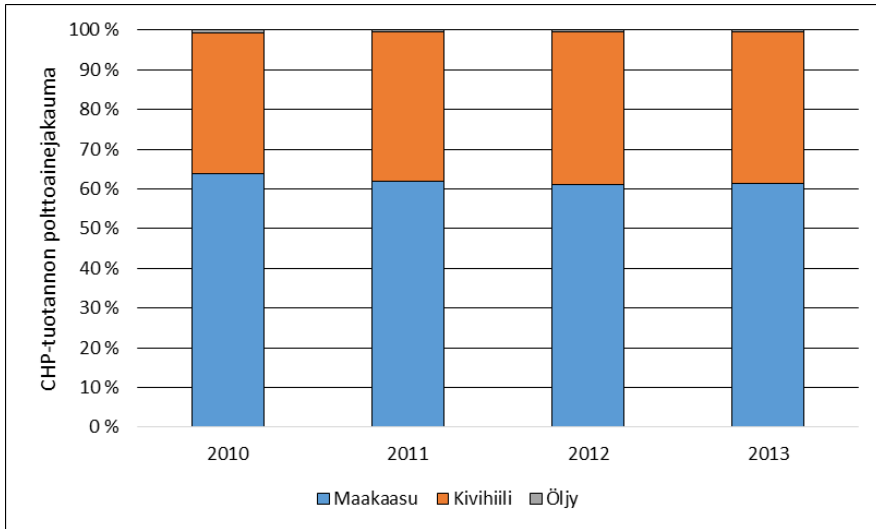
Helen Oy:n kaukolämmön tuotanto perustuu lähtökohtaisesti lämmön ja sähkön yhteistuotantoon (CHP). Tämän lisäksi hyödynnetään lämpöpumppulaitoksia, joissa lämmönlähteenä toimivat sekä jätevesi vedenpuhdistusprosessin jälkeen että kaukojäähdytyksen paluuvesi. Näin ollen lämpöpumppulaitoksella voidaan tuottaa yhtä aikaa sekä kaukolämpöä että –jäähdytystä (CHC). Kaukolämmön tuotantorakennetta täydentävät perinteiset erilliset lämpölaitokset.

Yhteistuotannolla (CHP) on tuotettu vuosina 2010-2013 86-90 prosenttia kaukolämmöstä (kuva 42). Lämpöpumppujen osuus on ollut 2-4 % ja erillisten lämpölaitosten 7-12 %. Vuositasolla yhteistuotannosta on tuotettu 61-64 % maakaasulla ja 35-39 % kivihiihellä (kuva 43). CHP-laitosten nimelliset rakennusasteet ovat maakaasulla toimivalle laitokselle 1,09 ja kivihiihellä toimivalle 0,54. Kuvan 44 mukaisesti erillisissä lämpölaitoksissa polttoaineina on käytetty maakaasua (37-45 %), kivihiihtä (10-24 %) ja öljyä (33-45 %). Lämpöpumppujen keskimääräinen lämpökerroin on ollut noin 2,7.

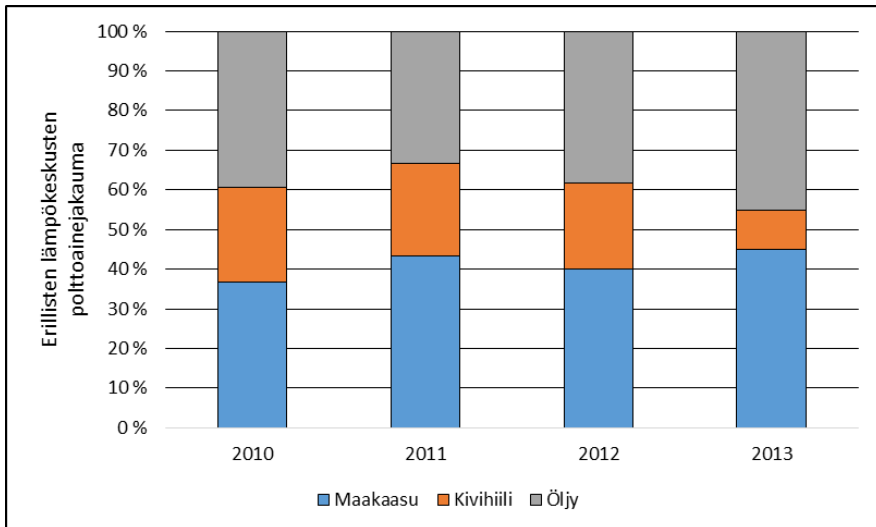
Kaukojäähdytystä on tuotettu meriveden, lämpöpumppulaitosten ja absorptiokoneikkojen avulla. Merivedellä tuotettua vapaajäähdytystä hyödynnetään lähtökohtaisesti tammi-toukokuussa ja loka-joulukuussa. Kesäaikana hyödynnetään lämpöpumppulaitosten lisäksi absorptiokoneikkoja.



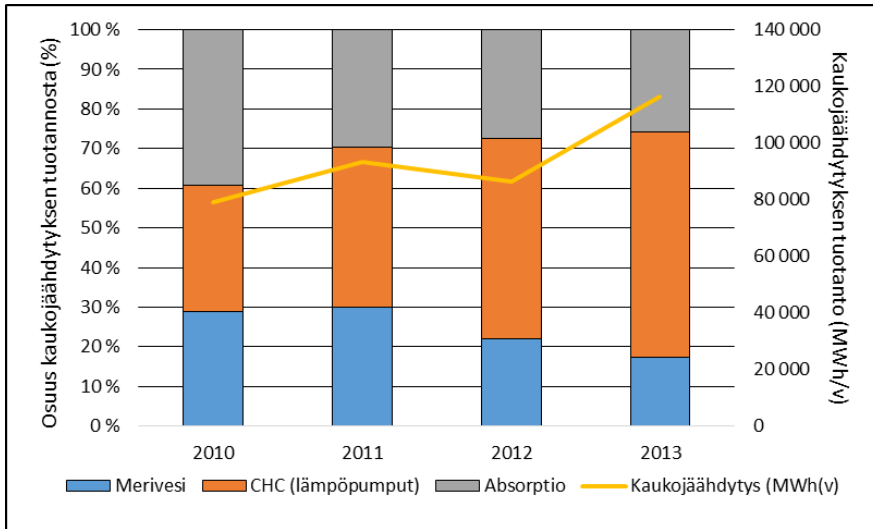
Kuva 42. Helen Oy:n kaukolämmön tuotanto vuosina 2010-2013 (Helen 2014a)



Kuva 43. Helen Oy:n CHP-tuotannon polttoainejakauma vuosina 2010-2013



Kuva 44. Helen Oy:n erillisten lämpökeskustelun polttoainejakauma vuosina 2010-2013



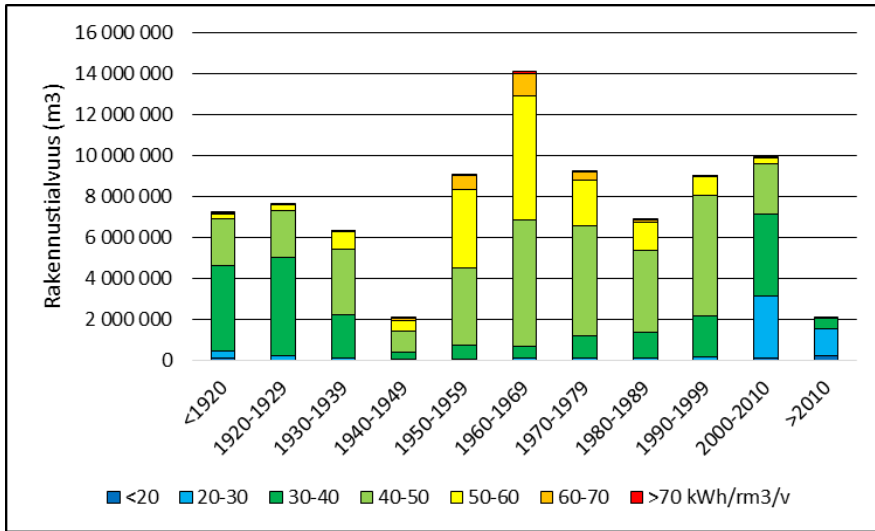
Kuva 45. Helen Oy:n kaukojäähdytyksen tuotanto vuosina 2010-2013

Kaukojäähdytyksen kysyntä on kasvanut huomattavasti viime vuosina (kuva 45). Vuosina 2010-2013 tuotettiin kaukojäähdytyksestä 17-30 % merivedellä, 32-57 % lämpöpumppulaitoksilla (CHC) ja 26-39 % absorptiokoneikoilla.

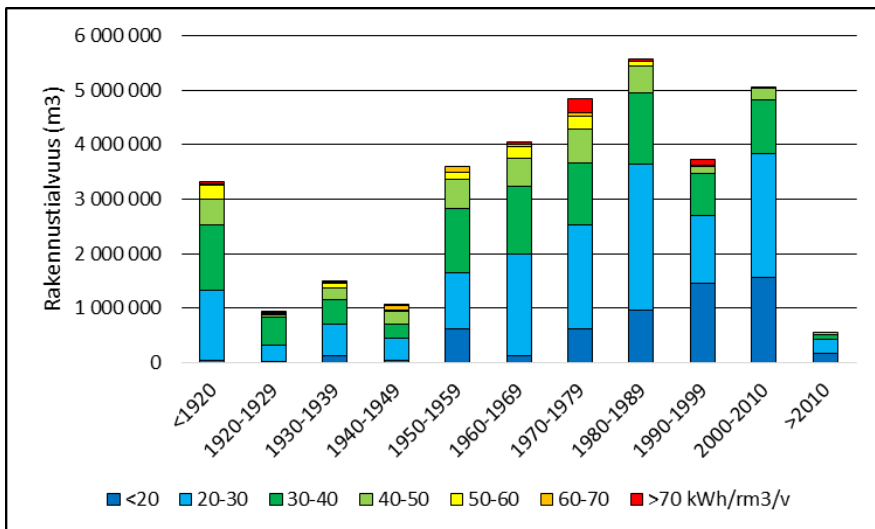
5.2 Helen Oy:n nykyisten asiakasryhmien tuntitason kulutusprofiilit

Kerrostalojen sääkorjattu kaukolämmön ominaiskulutusten aritmeettinen keskiarvo ja mediaani on ollut 45 kWh/rm³/v vuonna 2013. Jos tarkastellaan vain 1950-1980-luvuilla rakennettuja kerrostaloja, on keskiarvo ollut 50 kWh/rm³/v ja mediaani 49 kWh/rm³/v (kuva 46).

Toimistorakennuksilla sääkorjattu ominaiskulutuksen keskiarvo on ollut 35 kWh/rm³/v ja mediaani 32 kWh/rm³/v. 1950-1980-luvulla rakennetuilla toimistorakennuksilla keskiarvo on ollut 37 kWh/rm³/v ja mediaani 34 kWh/rm³/v (kuva 47).

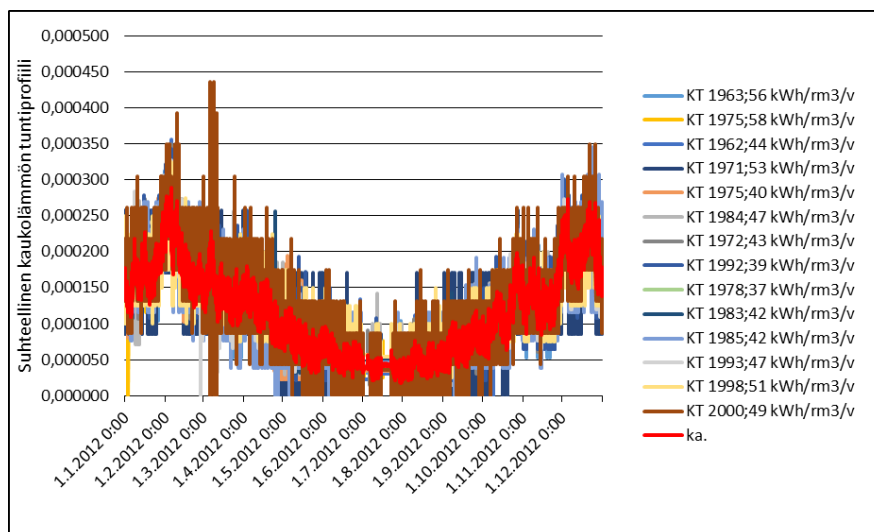


Kuva 46. Kaukolämmön ominaiskulutuksen jakauma eri ikäisissä helsinkiläisissä kerrostaloissa



Kuva 47. Kaukolämmön ominaiskulutuksen jakauma eri ikäisissä helsinkiläisissä toimistorakennuksissa

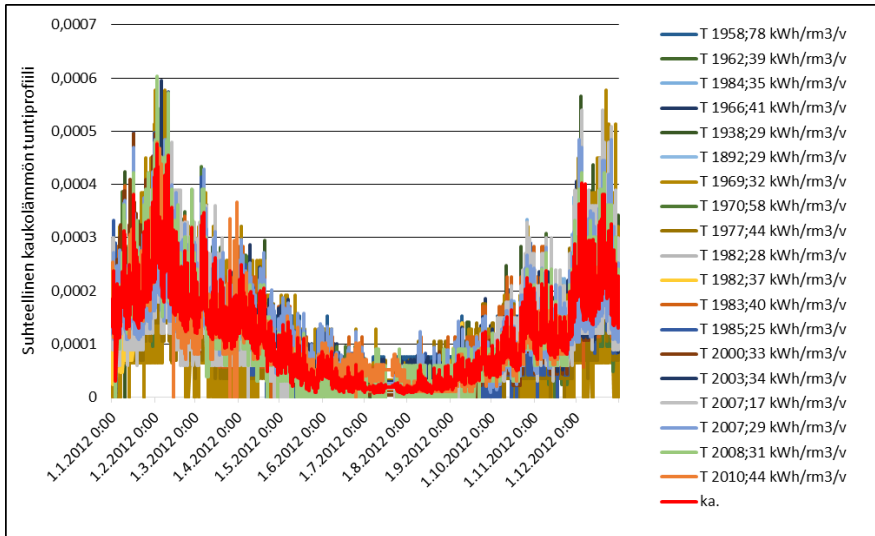
Kerrostalojen tuntitason kulutusprofiilit noudattavat melko hyvin toinen toisiaan. Kuvassa 48 on esitetty 14 kerrostalokohteen, jotka on rakennettu vuosien 1962-2000 välisenä aikana, tuntitason suhteelliset kulutusprofiilit vuonna 2012. Kuvassa on myös keskimääräinen kulutusprofiili laskettuna 76 kerrostalokohteen vuoden 2012 mittaustietoihin perustuen.



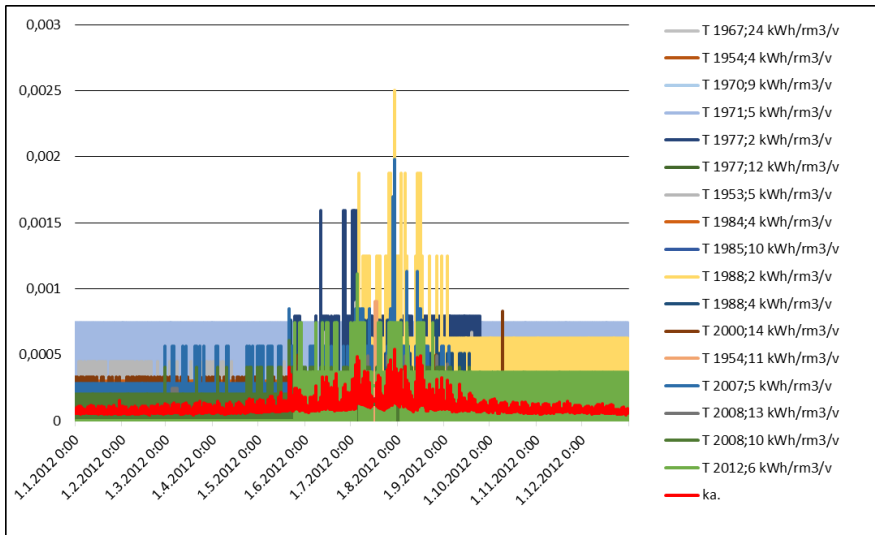
Kuva 48. Suhteellinen kaukolämmön tuntitason käyttöprofiili vuonna 2012 esimerkkikerrostaloissa

Kuvassa 49 on 19 toimistorakennukselle tuntitason suhteelliset kulutusprofiilit vuonna 2012. Toimistorakennukset on rakennettu vuosien 1892-2010 välisenä aikana. Samassa kuvassa on esitetty myös 112 toimistorakennuksen keskimääräinen tuntitason kulutusprofiili.

19 toimistokohteen, jotka on rakennettu vuosina 1954-2012, tuntitason kaukojäähdytyksen kulutusprofiilit on esitetty kuvassa 50. Kuvassa 50 on esitetty myös keskimääräinen kulutusprofiili 114 toimistorakennukselle. Näiden 114 kohteen kaukojäähdytysenergian kulutuksen keskiarvo on 6,7 kWh/rm³/v ja mediaani 5,5 kWh/rm³/v.



Kuva 49. Suhteellinen kaukolämmön tuntitason käyttöprofiili vuonna 2012 esimerkkitoimistaloissa



Kuva 50. Suhteellinen kaukojäähdytyksen tuntitason käyttöprofiili vuonna 2012 esimerkkitoimistaloissa

5.3 Tarkastellut skenaariot ja niiden kuvaukset

Alueellisia vaikutuksia on tarkasteltu skenaariotarkasteluin sekä SunZEB-konseptin mukaisille että tyypillisille kerrostaloille ja toimistorakennuksille Helsingissä Helen Oy:n tuotantoalueella. Skenaariotarkasteluja on tehty sekä uudis- että korjausrakentamiselle. Skenaarioilla on vertailtu SunZEB-konseptia tyypilliseen ratkaisuun. Erilaisia skenaarioita on valittu tarkasteluun yhteensä 21 kappaletta, joista 12 on uudisrakentamistapausta ja yhdeksän korjausrakentamisskenaarioita.

Skenaariotarkastelujen tuloksia ei voida yleistää jokaiselle suomalaiselle paikakunnalle tai tehdä suoria päätelmiä Suomen CO₂-päästötaseesta. Tarkastelut osoittavat valittujen vertailutapauksen suhdetta toisiinsa muun muassa CO₂-päästöjen näkökulmasta, kun skenaarioiden oletukset ovat voimassa.

Skenaariotarkasteluissa on tehty suuri askelmainen muutos, jotta nähdään sen aiheuttama vaikutus energiankäyttöön, energiantuotantoon ja CO₂-päästöihin. Muutokset on kohdistettu Helsingin kerrostalo- ja toimistotalokantaan. Skenaarioissa ei oteta kantaa siihen, missä ajassa tehty muutos on mahdollista käytännössä toteuttaa. Skenaarioiden lähtötilanteena sekä energiankäytön tä -tuotannon osalta on vuosi 2012, johon rakennustason toimenpiteiden aiheuttamat muutokset energiankäytössä lisätään tai vähennetään.

Skenaarioiden kaukolämmön ja kaukojäähdytyksen kokonaiskysyntä muodostuu referenssivuoden (vuosi 2012) toteutuneista tiedoista ja eri skenaarioiden uudis- ja korjausrakentamisen tuomista muutoksista referenssivuoden kysyntään. Muutoksia referenssivuoteen aiheuttavat vain skenaarioissa mallinnetut uudis- ja korjausrakentamisen vaihtoehdot ja muita muutoksia rakennuskannan energiankäytössä ei ole otettu huomioon. Tällä tavalla on mahdollista vertailla vain SunZEB-konseptia ja tyypillistä ratkaisua keskenään.

Vastaavasti on arvioitu eri skenaarioiden vaikutuksia sähkön kokonaiskysyntään ja tätä kautta sähkön tuotantoon Suomessa. Skenaarioissa ei ole arvioitu, kuinka paljon koko Suomen sähkön käyttö voisi muuttua, vaan on otettu huomioon vain ja ainoastaan eri skenaarioiden tuomat muutokset sähkön kokonaiskulutukseen referenssivuoteen verrattuna.

5.3.1 Uudisrakentaminen

Uusia kerrostaloja ja toimistorakennuksia on kuvattu liitteen A mukaisilla rakennuksilla, joiden energiankulutus vastaa luvun 3 energiaominaisuuksia (tuntitaso ominaiskulutusprofiilit, Liite C) niin SunZEB-konseptin kuin SunZEB verrokkiratkaisun (SunZEBv) tapauksessa. SunZEBv-ratkaisusta on lisäksi laskettu myös tapaukset, joissa ei ole rakennuskohtaista aurinkolämmön tuotantoa tai jäähdytys tuotetaan rakennuskohtaisen ratkaisun sijaan kaukojäähdytyksen avulla.

Yksittäisiä tyyppitalomalleja on skaalattu vastaamaan skenaarion oletusta uudisrakentamisen volyymin kertomalla ominaiskulutusprofiileja oletetulla uudisrakentamisen määrällä. Uusien rakennusten kerrosalan määrä on laskettu prosenttiosuutena nykyisestä koko Helsingin kerros- ja toimistotalokannasta. Käytetyt prosenttiosuudet

ovat 10 %, 20 % 30 %. Taulukossa 6 on esitetty eri prosenttisuuksia vastaavat uudisrakentamisen määrät kerrostaloille ja toimistorakennuksille.

Taulukko 6. Skenaarioissa käytetyt uudisrakentamisen määrät

Rakennustyyppi	Olemassa oleva kerrossala (m ²)	Kerrosalan lisäys (m ²)		
		10 %	20 %	30 %
Kerrostalot	22 288 898	2 228 890	4 457 780	6 686 669
Toimistot	5 830 746	583 075	1 166 149	1 749 224

Tyypillisesti viime vuosina uudisrakentamisen määrä on ollut vuosittain noin 1 % olemassa olevasta kerrosalasta, joten käytetyt uudisrakentamisen määrät vastaavat useiden vuosien ja vuosikymmenien aikajaksoa.

Uudisrakentamisen skenaariot on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Uudisrakentamisen skenaariot ja niiden ominaisuudet

Skenaario	SunZEB-konsepti (Liite A)	SunZEB verrokkii (Liite A)	Kaukolämpö (KL)	Kaukojäähdytys (KJ)	Vedenjäähdytyskoneikko (C)	Aurinkokeräimet (S)	Uudisrakentamisen määrä 10 % (U10%)	Uudisrakentamisen määrä 20 % (U20%)	Uudisrakentamisen määrä 30 % (U30%)	Korjausrakentamisen määrä 10 % (K10%)	Korjausrakentamisen määrä 20 % (K20%)	Korjausrakentamisen määrä 30 % (K30%)
SunZEBv U10%		x	x		x		x					
SunZEBv U20%		x	x		x			x				
SunZEBv U30%		x	x		x				x			
SunZEBv+KJ U10%		x	x	x			x					
SunZEBv+KJ U20%		x	x	x				x				
SunZEBv+KJ U30%		x	x	x					x			
SunZEBv+S U10%		x	x		x	x	x					
SunZEBv+S U20%		x	x		x	x	x	x				
SunZEBv+S U30%		x	x		x	x	x		x			
SunZEB U10%	x		x	x			x					
SunZEB U20%	x		x	x				x				
SunZEB U30%	x		x	x					x			

5.3.2 Korjausrakentaminen

Korjausrakentamisessa on valittu tarkasteluun 1950-1980-lukujen kerrostalot ja toimistorakennukset. Kerrostaloja on kuvattu yhdellä tyyppikerrostalolla ja toimistorakennuksia samoin yhdellä toimistorakennuksella. Näiden tyyppirakennusten on oletettu olevan geometrialtaan ja ikkunapinta-alaltaan vastaavanlaisia kuin liitteen A SunZEB verrokkitapaukset (SunZEBv) kerros- ja toimistotalot.

Ennen korjaustoimenpiteitä tyyppirakennusten kaukolämmön kulutusprofiilien on oletettu vastaavan luvun 5.2 kuvissa 48 ja 49 olevia tuntitason keskimääräisiä kulutusprofiileja. Tyyppikerrostalojen keskimääräiseksi kaukolämmön ominaiskulutukseksi on oletettu ennen korjausta 190 kWh/m²/v. Toimistorakennusten kohdalla keskimääräisenä kaukolämmön kulutuksena on käytetty 140 kWh/m²/v.

Toimistorakennusten kohdalla on oletettu, että puolessa tapauksista on jo ennen korjausta jäähdytys, joka on tuotettu perinteisillä ilmalauhdutteisella vedenjäähdytyskoneikoilla, joiden kylmäkerroin on 2,5. Tarkastelua on yksinkertaistettu siten, että toimistorakennuksissa, joissa on jäähdytys jo ennen korjaushanketta, jäähdytystarve ei muutu korjausten seurauksena.

Korjausten jälkeen skenaariotarkasteluissa on oletettu, että korjatut rakennukset vastaavat liitteen A tyypillisiä ratkaisuja ja niiden energiaominaisuuksia. Korjausrakentamisskenaarioissa SunZEB-konsepti ja SunZEB verrokki (SunZEBv) eroavat siinä, kuinka jäähdytys tuotetaan. SunZEB-konseptissa on käytössä kaukojäähdytys ja tyypillisessä ratkaisussa perinteinen kompressorikäyttöinen vedenjäähdytyskone, jonka kylmäkertoimeksi on oletettu 2,5. Lisäksi SunZEBv-tapausta on tarkasteltu rakennuskohtaisella aurinkolämpöjärjestelmällä, jonka tuotto vastaa korjausrakentamisen SunZEB-konseptin mukaista jäähdytysenergian määrää.

Laitesähkön kulutuksen oletetaan korjausrakentamismuutosten pysyvän vakiona. Sähkönkulutuksen muutokset ovat seurausta rakennuskohtaisen jäähdytysjärjestelmän energiankulutuksesta ja CHC-laitoksen muuttuvasta sähkökäytöstä.

Tyyppirakennukset skaalataan vastaamaan skenaarion korjausrakentamisen määrää vastaavasti kuin uudisrakentamisessa. Korjausrakentamisen määrän on oletettu olevan skenaariotarkasteluissa 10 %, 20 % tai 30 % valitun aikakauden kerrosalasta. Taulukossa 8 on esitetty korjausrakentamisen määrät eri prosenttisuksilla.

Taulukko 8. Skenaarioissa käytetyt korjausrakentamisen määrät

Rakennustyyppi	Olemassa oleva kerrosala (m ²)	Korjattavan kerrosalan määrä (m ²)		
		10 %	20 %	30 %
Kerrostalot 1950-1980	11 084 840	1 108 484	2 216 968	3 325 452
Toimistot 1950-1980	2 925 702	292 570	585 140	877 711

Muissa tutkimuksissa on arvioitu, että korjausrakentamisen yleisyys Suomen rakennuskannassa olisi vuodessa noin 0,5-1 prosenttia koko kerrosalasta ja korjaus-tarve lisääntyisi noin 10 prosenttia seuraavan 10 vuoden aikana (Airaksinen & Vainio 2012, Hietala et al. 2015). Näin ollen käytetyt korjausrakentamisen määrät vastaavat useiden vuosien ja vuosikymmenien aikajaksoa.

Taulukossa 9 on esitetty korjausrakentamistarkastelujen skenaariot.

Taulukko 9. Korjausrakentamisen skenaariot ja niiden ominaisuudet

Skenaario	SunZEB-konsepti (Liite A)	SunZEN verrokki (Liite A)	Kaukolämpö (KL)	Kaukojäähdytys (KJ)	Vedenjäähdytyskoneikko (C)	Aurinkokeräimet (S)	Uudisrakentamisen määrä 10 % (U10%)	Uudisrakentamisen määrä 20 % (U20%)	Uudisrakentamisen määrä 30 % (U30%)	Korjausrakentamisen määrä 10 % (K10%)	Korjausrakentamisen määrä 20 % (K20%)	Korjausrakentamisen määrä 30 % (K30%)
SunZEBv K10%		x	x		x					x		
SunZEBv K20%		x	x		x						x	
SunZEBv K30%		x	x		x							x
SunZEB+S K10%		x	x		x	x				x		
SunZEBv+S K20%		x	x		x	x					x	
SunZEBv+S K30%		x	x		x	x						x
SunZEB K10%		x	x	x						x		
SunZEB K20%		x	x	x							x	
SunZEB K30%		x	x	x								x

5.3.3 Energiantuotanto

Alueellinen energiantuotanto on kuvattu yksinkertaistetulla laskentamallilla, jossa hyödynnetään todellisia mittaus- ja tilastotietoja toteutuneesta tuotannosta. Malli on kuvattu tarkemmin ja validoitu mittaus- ja tilastotietoihin perustuen tieteellisen lehtiartikkelin käsikirjoituksessa (Pylsy et.al 2015).

Laskentamallissa on kuvattu eri Helen Oy:n tuotantomuodot sekä kaukolämmölle että kaukojäähdytykselle. Eri tuotantomuodoille on määritetty ajorjestykset ja laskentasäännöt, joiden perusteella allokoidaan kaukolämmön ja kaukojäähdytyk-

sen kysyntä eri tuotantomuodoille. Kaukolämmön tuotannossa ajojärjestys on seuraava

1. Lämpöpumppulaitoksella (CHC) tuotetun kaukojäähdytyksen lauhdelämpö
2. Yhdistetyn sähkön ja lämmöntuotannon (CHP-laitosten) tuottama kaukolämpö
3. Lämpöpumppujen tuottama pelkkä kaukolämpö
4. Erilliset lämpökeskukset

Voimalaitosten polttoaineiden käyttö on laskettu keskimääräisten polttoainejakaumien perusteella ja jakaumat oletetaan vakioiksi tarkasteluissa (Liite C). CHP-laitosten tuottama sähköenergia lasketaan luvussa 5.1 esitettyjen nimellisten rakennusasteiden avulla. Lämpöpumppulaitoksen energiantuotantoon tarvitsema sähköenergia on laskettu ulkolämpötilan funktiona olevan lämpökertoimen perusteella, joka on keskimäärin 2,7. Tarkasteluissa ei ole muutettu CHP-laitosten tai erillisten lämpökeskusten keskimääräisiä tunnittaisia maksimitehoja.

Kaukojäähdytyksen osalta on skenaarioissa oletettu, että SunZEB-konseptin seurauksena tuleva kaukojäähdytyksen kysynnän kasvu kohdistuu lämpöpumppulaitokseen. Meriveden ja absorptio tuotantoprofiiliin oletetaan pysyvän referenssivuotta 2012 vastaavalla tasolla. Merivettä käytetään kaukokylmän tuotantoon mallissa 1.1.-15.5. ja 15.10.-31.12. välisinä aikoina. Kesäaikana hyödynnetään absorptiojäähdytystä lämpöpumppulaitoksen rinnalla.

Skenaarioiden sähkönkulutuksen muutosten aiheuttamia vaikutuksia on arvioitu laskentamallin sisältämän yksinkertaisen Suomen sähköntuotannon tarkastelumallin avulla. Vastaavasti kuin alueellisen kaukolämmön ja kaukojäähdytyksen kohdalla tarkastelussa otetaan huomioon vain skenaarioiden aiheuttamat muutokset referenssivuoden valtakunnalliseen sähkönkulutukseen.

Sähköntuotannon yksinkertaistetussa laskentamallissa on määritelty eri tuotantomuodoille ajojärjestykset, jotka ovat

1. Ydinvoima
2. Vesivoima
3. Tuulivoima
4. CHP-laitokset
5. Erilliset lämpövoimalaitokset

Eri tuotantomuotojen keskitehot, tuotantoprofiilit ja voimalaitosten polttoainejakaumat perustuvat referenssivuoden mukaisiin tietoihin (Liite C). Tarkasteluissa oletetaan nettotuonnin vastaavan referenssivuotta (Liite C). Tarkasteluissa pidetään vakiona niin eri tuotantomuotojen tuotantoprofiilit, voimalaitosten polttoainejakaumat kuin nettotuonnin määrä. Malli ottaa kuitenkin huomioon skenaarioissa tapahtuvat muutokset Helen Oy:n CHP-laitosten sähkön tuotannossa. Edellä mainittujen reunaehtojen vallitessa lähtökohtaisesti skenaarioiden aiheuttama sähkönkulutuksen kasvu kohdistuu sähköntuotannossa erillisiin lämpövoimalaituksiin.

5.4 Aluetason vaikutukset eri skenaarioilla

Luvuissa 5.4.1 ja 5.4.2 on esitetty skenaariotarkastelujen vuositason tulokset uudisrakentamiselle ja korjausrakentamiselle. Tuloksissa on esitetty vaikutukset kaukolämmön ja –jäähdytyksen tuotantoon, sähkönkulutukseen ja tarkastelualueen CHP-laitoksen sähköntuotantoon. Lisäksi on esitetty skenaarioiden päästövaikutukset alueellisesti ja valtakunnallisen sähköntuotannon osalta.

Tulokset on esitetty suhteessa skenaarioissa tarkastelussa oleviin uudis- tai korjausrakentamisen määriin, eli lisääntyneen tai korjatun kerrosalan suhteen. Näin on havainnollistettu tehtyjen toimenpiteiden vaikutusten merkitystä ja konseptien suhteellista eroa toisiinsa.

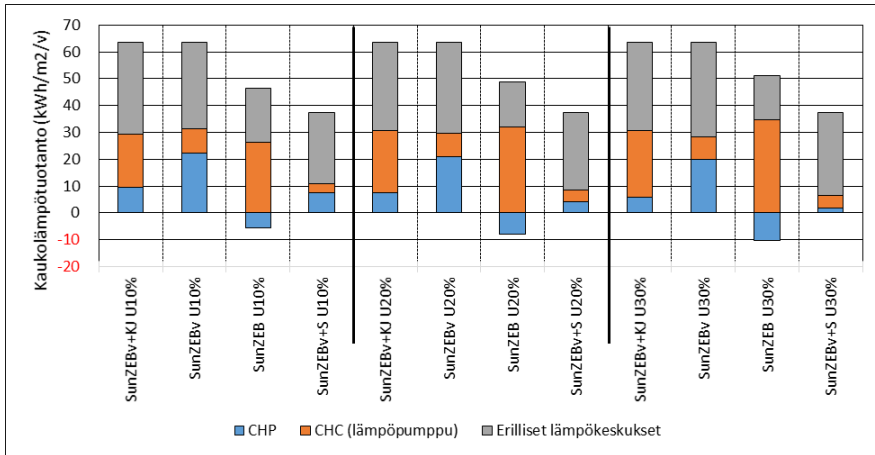
5.4.1 Uudisrakentaminen

Kuvissa 51-56 on esitetty eri uudisrakentamisen skenaarioiden vaikutukset kaukolämmön ja kaukojäähdytyksen tuotantoon, sähkönkulutukseen, alueen sähköntuotantoon CHP-laitoksissa, primäärienergian kulutukseen ja CO₂-päästöihin. Uudisrakentamisen seurauksena kaukolämmön kysyntä ja jäähdytystarve lisääntyvät. SunZEB-konsepteissa CHC-lämpöpumpputjärjestelmä tuottaa kokonaisuudessaan enemmän kaukolämpöä, joka korvaa CHP-tuotantoa, lisääntyneen kaukojäähdytyksen seurauksena. CHP-laitosten vähentynyt kaukolämmön tuotanto pienentää myös CHP-laitosten sähköntuotantoa, joka on tuotettava jollain vaihtoehtoisella tavalla. Näissä skenaariossa muutos on kohdistunut pääasiassa erilliseen lämpövoimaan.

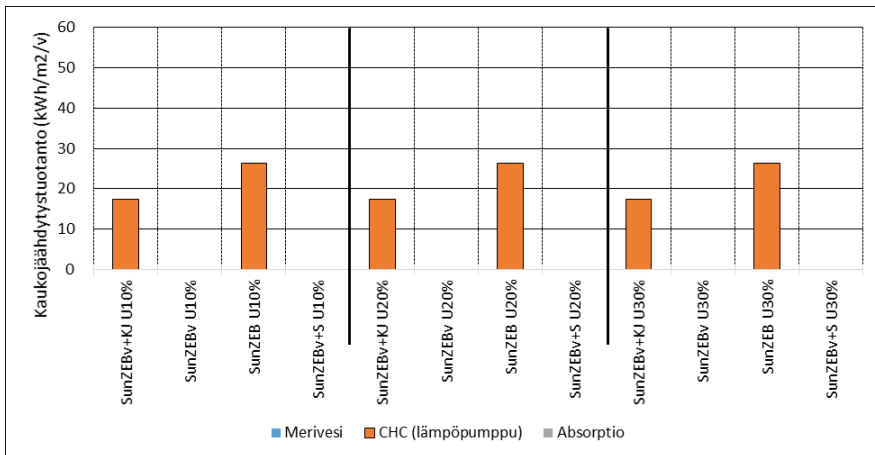
SunZEB verrokki SunZEBv-skenaarioissa, joissa on rakennuskohtainen jäähdytysenergian tuotanto, mutta ei aurinkokeräimiä, kasvavasta kaukolämmön kysynnästä enemmän kohdistuu CHP-laitoksille ja näin ollen myös yhteistuotantosähkön määrä markkinoilla kasvaa.

Skenaarioiden sähkönkulutuksen vaikutuksissa on otettu huomioon rakennusten laitteiden ja teknisten järjestelmien sähkönkäyttö ja CHC-laitoksen kaukolämmön ja –jäähdytyksen tuotantoon käytetty sähkö. Kaksin- tai kolminkertaistettaessa uudisrakentamisen määrä sähkönkulutus ei kuitenkaan muutu samassa suhteessa, koska CHC:n sähkönkäyttö ei kaksin- tai kolminkertaistu.

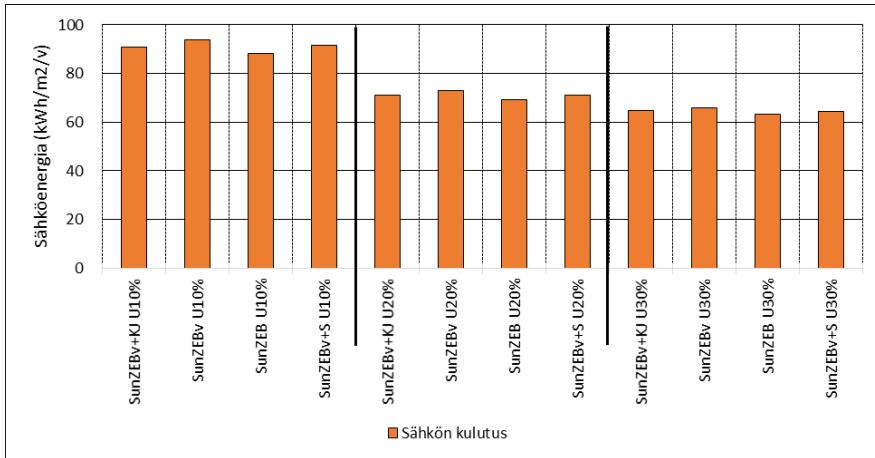
SunZEBv-tapauksissa, joissa jäähdytys on toteutettu rakennuskohtaisesti kompressorikäyttöisillä vedenjäähdytyskoneikoilla, lisääntyy sähkönkulutus hie-man SunZEB-konseptia enemmän. Tähän vaikuttaa myös osaltaan muun muassa SunZEB- ja SunZEBv-konseptin eroavaisuudet ilmanvaihdon ominaissähkötehossa (ks. Liite A). Jos SunZEBv-tapauksissa jäähdytysenergia tuotetaan kaukojäähdytyksellä, on CHC-tuotannon kasvu maltillista, eikä se vähennä CHP-tuotantoa.



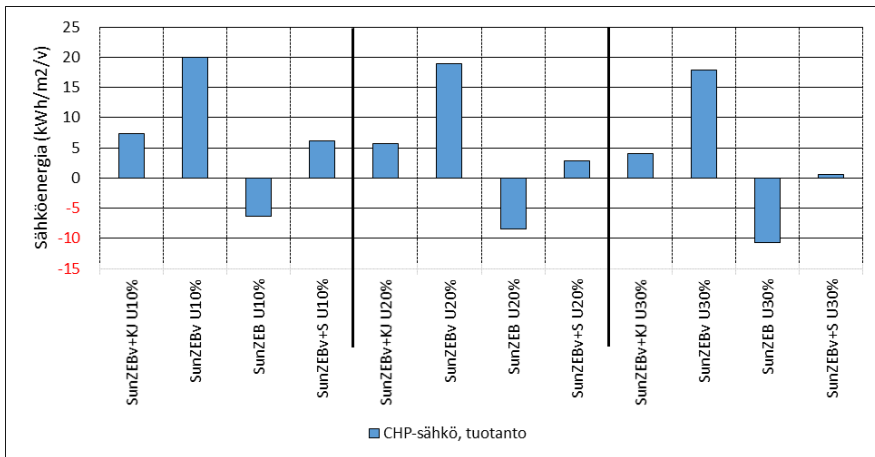
Kuva 51. Uudisrakentamisen skenaarioiden vaikutukset kaukolämmön tuotantoon tuotantomuodoittain



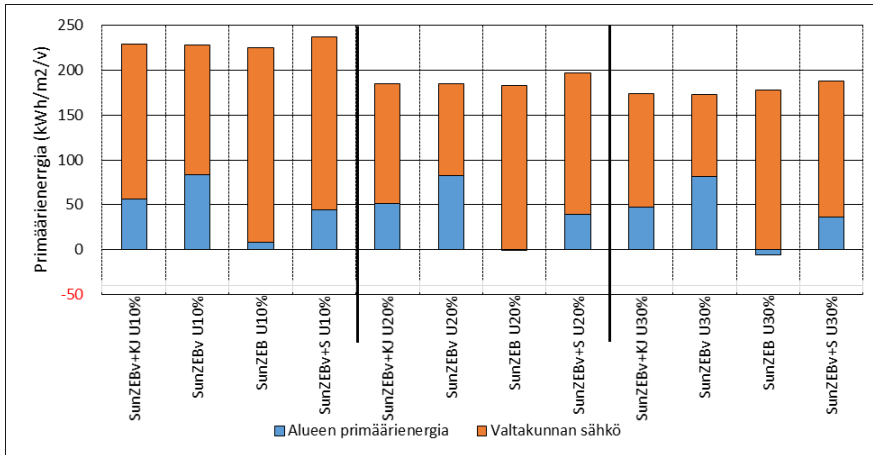
Kuva 52. Uudisrakentamisen skenaarioiden vaikutukset kaukojäähdytystuotantoon tuotantomuodoittain



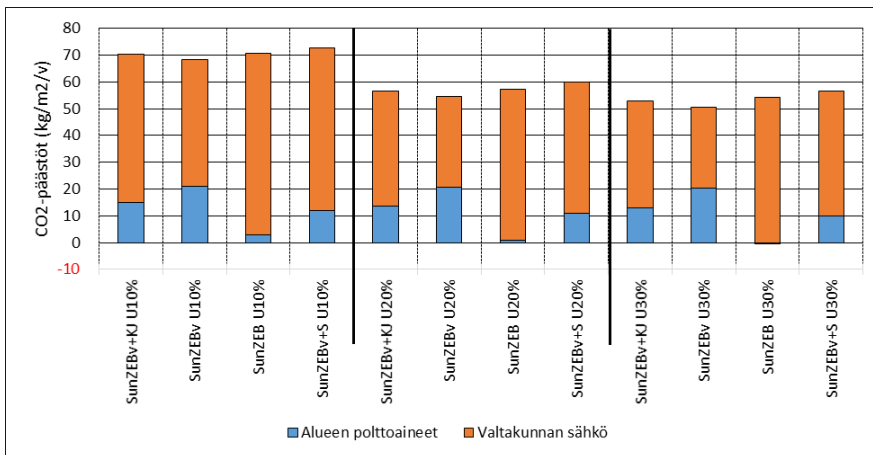
Kuva 53. Uudisrakentamisen skenaarioiden vaikutukset sähkön kulutukseen



Kuva 54. Uudisrakentamisen skenaarioiden vaikutukset alueen CHP-laitosten sähkön tuotantoon



Kuva 55. Uudisrakentamisen skenaarioiden vaikutukset primäärienergiaan



Kuva 56. Uudisrakentamisen skenaarioiden vaikutukset CO₂-päästöihin

Tarkasteltaessa uudisrakentamisen skenaarioiden vaikutuksia primäärienergiaan ja CO₂-päästöihin huomataan, että SunZEB-konsepteissa alueellisen energiantuotannon päästöt lisääntyvät hyvin vähän. SunZEB-konseptissa vaikutukset kohdistuvat erityisesti valtakunnalliseen sähköntuotantoon ja siellä tapahtuviin muutoksiin.

SunZEB-konsepti tuottaa huomattavasti alhaisemmat primäärienergia- ja CO₂-päästövaikutukset verrattuna SunZEB verrokkiin, kun tarkastellaan vain muutoksia **alueen sisällä** tapahtuvassa polttoaineiden käytössä. SunZEB-konseptin vaiku-

tukset primäärienergiaan ja CO₂-päästöihin ovat 76-117 % alhaisemmat. Jos vertaillaan vain jäähdytyksen tuotantotavan (SunZEBv+KJ vs. SunZEBv) vaikutuksia, nähdään, että kaukojäähdytys on 29-42 % edullisempi primäärienergian käytöltään ja CO₂-päästöiltään.

On kuitenkin huomioitava, etteivät rakennuksen tekniset ratkaisut SunZEB- ja SunZEBv-konsepteissa ole täysin vertailukelpoiset (ks. liite A).

Kun tarkastelua laajennetaan siten, että otetaan huomioon myös vaikutukset koko **Suomen sähköntuotantoon** mukaan lukien alueella tapahtuva sähkönkulutuksen muutos, muuttuvat vaikutukset primäärienergian käyttöön ja CO₂-päästöihin merkittävästi. SunZEB-konseptin tapauksessa tarkastelualueella tuotettu yhteistuotantosähkön määrä vähenee ja samaan aikaan alueen sähkönkulutus kasvaa muun muassa CHC-järjestelmän lämpöpumppujen käyttämän sähkön seurauksena. SunZEBv-tapauksissa lisääntyy alueen sähkönkulutus, mutta CHP-tuotanto ei vähene, koska markkinoille ei tule merkittävässä määrin CHC-järjestelmän tuottamaa kaukolämpöä.

Kun vertailussa otetaan huomioon myös skenaarioiden vaikutukset valtakunnalliseen sähköntuotantoon, ovat SunZEB-konsepti ja SunZEBv-ratkaisu käytännössä samanarvoisia sekä primäärienergian että CO₂-päästöjen näkökulmasta. SunZEB-konsepti on noin 4-8 % edullisempi primäärienergian käytöltään ja CO₂-päästöiltään 2-5 % kuin SunZEBv-ratkaisu, joka on varustettu rakennuskohtaisella jäähdytys- ja aurinkolämpöjärjestelmällä. Jos rakennus pidetään vakiona ja tarkastellaan vain jäähdytyksen tuotantotavan vaikutusta (SunZEBv+KJ vs. SunZEBv), nähdään että vaikutukset primäärienergiaan ovat molemmissa vaihtoehtoissa käytännössä yhtä suuret, mutta rakennuskohtainen jäähdytysenergian tuotanto on skenaarioissa 2-5 % edullisempi CO₂-päästöjen näkökulmasta.

Koska erot ovat pieniä eri skenaarioiden välillä, ei niitä voi suoranaisesti asettaa paremmuusjärjestykseen otettaessa huomioon laskentamalliin sisältyvät pienet epävarmuustekijät. Tulokset saattavat kuitenkin indikoida sitä, ettei primäärienergian ja päästöjen näkökulmasta ole tarkoituksen mukaista yrittää maksimoida jäähdytysenergian kulutusta ja CHC-järjestelmän tuottoa. Tämän asian tarkastelu vaatii lisätarkastelua.

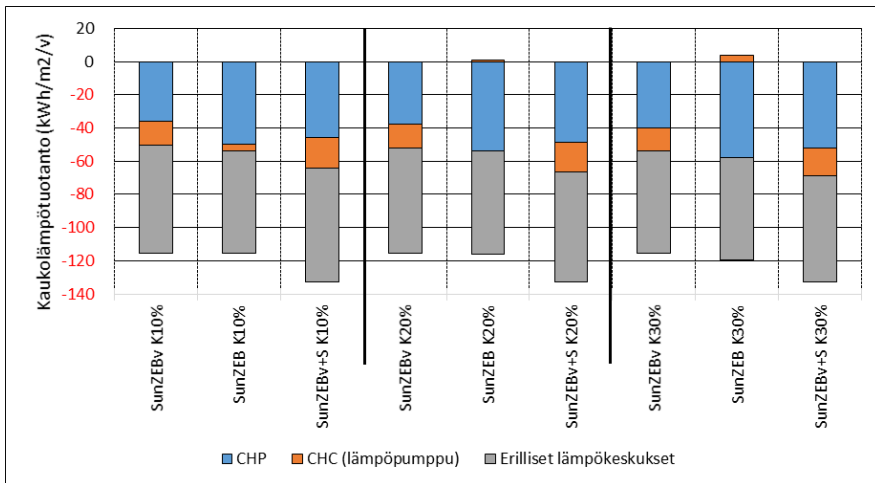
Joka tapauksessa primäärienergian ja CO₂-päästöjen muutoksen kannalta on tärkeää, kuinka vähentynyt sähkön CHP-tuotanto korvataan ja millä tavoin samaan aikaan lisääntyvä sähkönkulutus pystytään tuottamaan. Laskentamallissa ei ole otettu huomioon näitä tulevaisuuden muutoksia koko Suomen energiajärjestelmässä, jotka voivat vaikuttaa myös edellä vertailtujen skenaarioiden vaikutuksiin. Olennaista on myös se, pystytäänkö alueella vaikuttamaan CHP-kaukolämmön kapasiteettiin erityisesti kesäaikaan, jolloin esimerkiksi kaukojäähdytys ja tätä kautta CHC-tuotanto lisääntyy.

5.4.2 Korjausrakentaminen

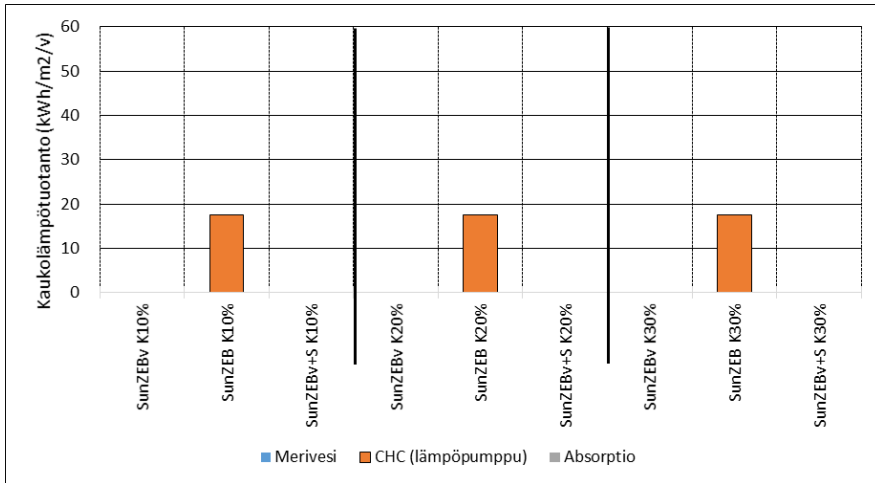
Kuvissa 57-62 on esitetty eri korjausrakentamisen skenaarioiden vaikutukset kaukolämmön ja kaukojäähdytyksen tuotantoon, sähkönkulutukseen, alueen sähköntuotantoon CHP-laitoksissa, primäärienergiaan ja CO₂-päästöihin. Kaukolämmön

tuotannon osalta kaikissa skenaarioissa sekä CHP-tuotanto että erillisten lämpökeskusten tuottama kaukolämpöenergia vähenee lämmitysenergiankulutuksen pientyessä rakennustasolla. Erot skenaarioissa SunZEBv- ja SunZEB-tapausten välillä muodostuvat muutoksista CHC:n kaukolämmön tuotannossa: SunZEB-konseptissa (K20% ja K30%) lämpöpumppujen tuottama kaukolämmön määrä kasvaa ja SunZEBv-tapauksissa vähenee. Kaikissa tapauksissa CHP-laitosten tuottama sähköenergia vähenee.

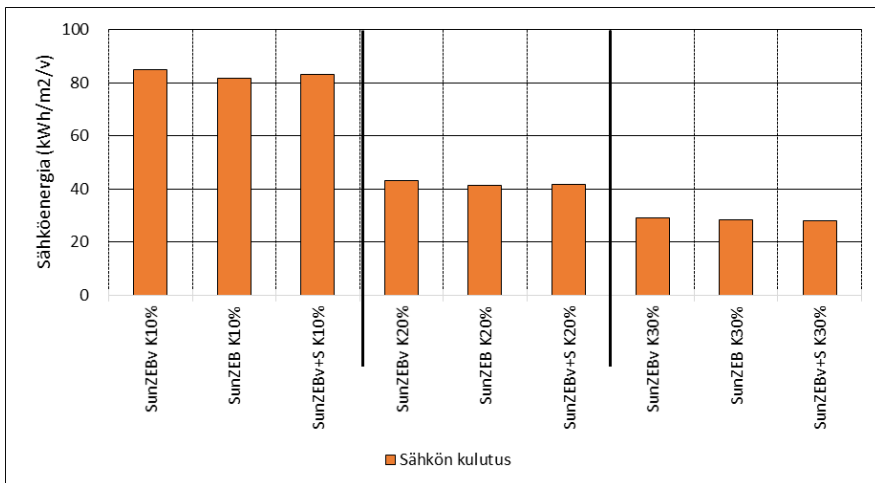
Korjausrakentamisen skenaarioissa sähköenergiankulutus, joka koostuu rakennuskohtaisen jäähdytysjärjestelmän sähkönkulutuksesta ja CHC-tuotannon käytämästä sähköstä, lisääntyy. Muutos ei kuitenkaan ole lineaarinen suhteessa korjausrakentamisen määrään, jolloin korjausrakentamisen määrään suhteutettu na muutos ei ole yhtä suuri kaikissa skenaarioissa.



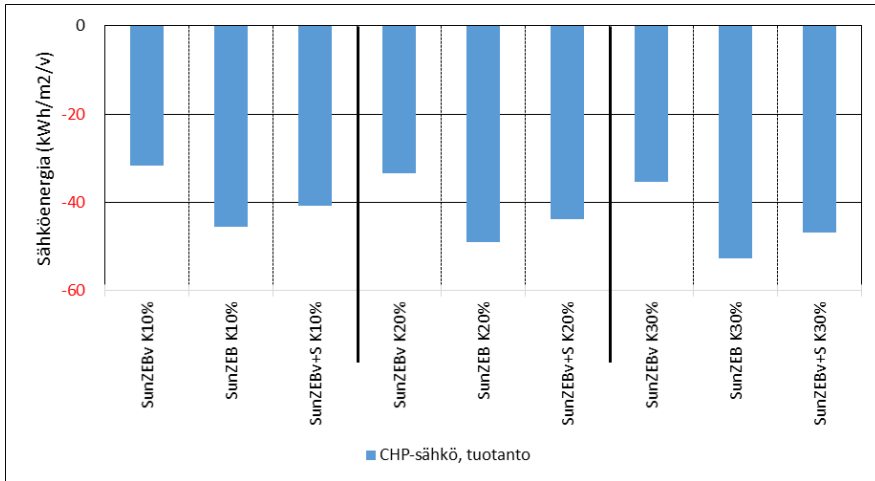
Kuva 57. Korjausrakentamisen skenaarioiden vaikutukset kaukolämmön tuotantoon tuotantomuodittain



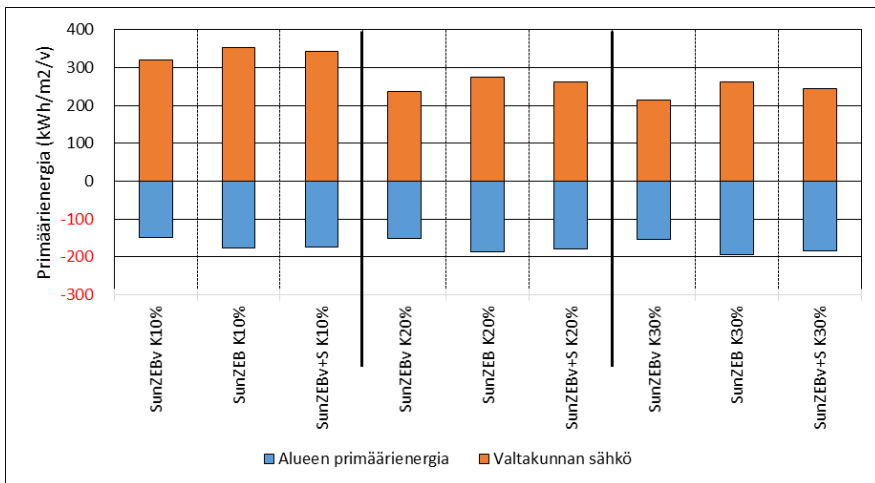
Kuva 58. Korjausrakentamisen skenaarioiden vaikutukset kaukojäähdytyksen tuotantoon tuotantumuodittain



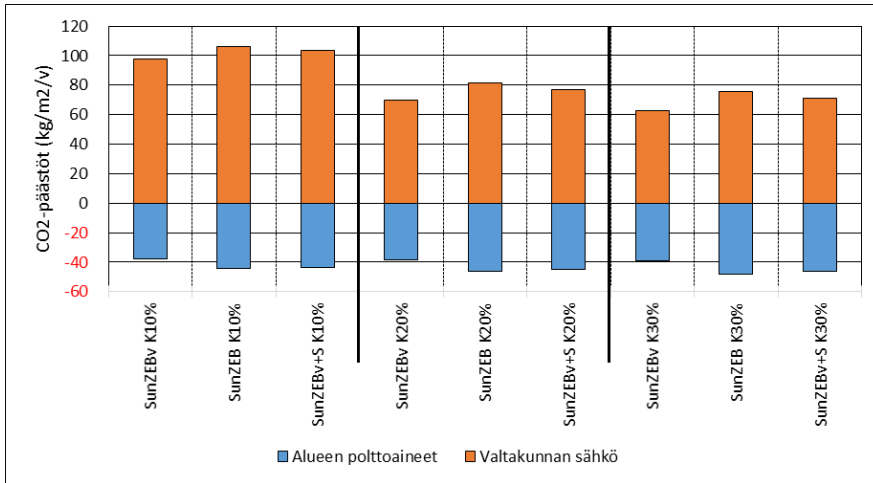
Kuva 59. Korjausrakentamisen skenaarioiden vaikutukset sähkön kulutukseen



Kuva 60. Korjausrakentamisen skenaarioiden vaikutukset alueen CHP-laitosten sähkön tuotantoon



Kuva 61. Korjausrakentamisen skenaarioiden vaikutukset primäärienergiaan



Kuva 62. Korjausrakentamisen skenaarioiden vaikutukset CO₂-päästöihin

Kaikissa skenaarioissa alueella käytettävien polttoaineiden primäärienergian kulutus ja CO₂-päästöt vähenevät. Tarkasteltaessa vain alueen polttoaineiden käytössä tapahtuvia muutoksia, on SunZEB-konsepti 1-6 % edullisempi primäärienergian käytön ja CO₂-päästöjen osalta verrattuna SunZEBv-ratkaisuun, jossa on aurinkokeräimet. Jos vertaillaan vain jäähdytyksen tuotantotapoja, on kaukojäähdytys 17-26 % edullisempi alueellisilta vaikutuksiltaan.

Sähkön kulutuksen lisääntymisen ja alueen yhteistuotantosähkön vähenemisen seurauksena CO₂-päästöt kuitenkin lisääntyvät koko Suomen sähköntuotannon osalta. Näin ollen koko Suomen päästötaseen kannalta merkityksellistä on, millä tavoin CHP-laitosten vähentyvä sähköntuotanto korvataan ja kuinka lisääntyvä sähkönkulutus katetaan koko Suomen sähköntuotannon näkökulmasta katsoen.

Otettaessa huomioon myös muutokset koko Suomen sähköntuotannossa, on erot SunZEB-konseptin ja SunZEBv-ratkaisun ja eri jäähdytysenergiatuotantomuotojen välillä hyvin marginaaliset. Kun huomioidaan laskentamalliin sisältyvät pienet epävarmuustekijät, ei eri skenaarioita voida asettaa suoranaisesti paremmuusjärjestykseen primäärienergian käytön tai CO₂-päästöjen osalta. Primäärienergiankäytön ja CO₂-päästövaikutusten osalta SunZEBv-ratkaisu on SunZEB-konseptiin verrattuna 4-11 % edullisempi, kun SunZEBv-ratkaisussa on mukana rakennuskohtaisen jäähdytysratkaisun lisäksi myös aurinkolämpöjärjestelmä.

Kuten uudisrakentamisen skenaarioissa, ratkaisevassa roolissa primäärienergian käytön ja CO₂-päästöjen osalta on, millä tavalla vähenevä yhteistuotantosähkö korvataan, kuinka lisääntyvä sähkönkulutus ajallisesti suhtautuu koko Suomen sähköntuotantoon ja kuinka koko energiasjärjestelmä valtakunnan tasolla kehittyy tulevaisuudessa. Vastaavasti aluetasolla on merkityksellistä se, kuinka joustavasti CHP-tuotantokapasiteetti saadaan sopeutettua muuttuvaan kaukolämmön kysyntään ja tuottamaan maksimaalisen määrän CHP-kaukolämpöä myös kesäaikaan.

6. Yhteenveto ja johtopäätökset

Kehitetyn SunZEB-konseptin tavoitteena oli hyödyntää auringon energia mahdollisimman tehokkaasti sekä lisätä uusiutuvan energian käyttöä kaukolämpöaloissa, joissa se muuten on haasteellista. Jos tarkastelut tehdään ainoastaan yhden rakennuksen tasolla, auringon lämpökuormista on yleensä hyötyä vain lämmityskauden aikana. Järjestelmätason tarkastelut osoittivat, että sisätiloista jäähdyttämällä poistettu lämpö voidaan käyttää hyödyksi toisaalla.

Avaintuloksena kehitetyssä ratkaisussa on kokonaisuuden suunnittelu, koska rakennusta ei tule suunnitella pelkästään mahdollisimman tehokkaaksi aurinkokeräimeksi. Rakennukset tehdään ensisijaisesti ihmisille. Ratkaisussa onnistuttiin yhdistämään laajat ikkunapinnat tuomaan tiloihin valoisuutta ja samanaikaisesti varmistettiin, että sisäolosuhteet ovat miellyttävät kaikissa käyttötilanteissa. SunZEB -konseptissa arkkitehtisuunnittelun pääperiaatteena oli auringon lämpösäteilyn ohjaaminen hallitusti sisätiloihin, ei hallitsemattomasti. Tästä johtuen SunZEB-konseptin mukainen rakennus suunniteltiin pääsääntöisesti arkkitehtuurisin keinoin.

Ratkaisu asettaa kuitenkin tiettyjä tarkkuusvaatimuksia talotekniikan ohjaukseen ja integraatioon. Simuloituissa kohteissa, joissa ilmanvaihto säädettiin toimivaan omassa tehtävässä eikä varsinaisesti viilentämään tai lämmittämään tiloja, on varsinaisen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmän kyettävä mukautumaan nopeasti vaihteleviin olosuhteisiin, jotka asettavat uusia vaatimuksia automaation integraatiolle ja säädön nopeudelle, jotta päällekkäinen lämmitys ja jäähdytys voidaan välttää.

Auringon aiheuttama yllämpeneminen sekä häikäisy ovat myös asioita, joita tulevaisuudessa on pyrittävä hoitamaan talotekniikan avulla. Tähän SunZEB-konseptin mukainen jäähdytysratkaisu tuokin hyvät mahdollisuudet. Simuloinneissa oletettiin, että ikkunoiden kaihtimet toimivat optimaalisesti, eli sulkeutuvat kun auringon säteily aiheuttaa käyttäjälle häikäisyä. Käyttäjät eivät kuitenkaan ohjaa kaihtimia optimaalisesti ja etenkin toimistorakennuksessa ne usein suljetaan kun aurinko alkaa häikäistä eikä niitä muisteta avata loppupäivästä.

Kolmas talotekninen kysymys on ilmanvaihdon ohjaus. Simuloinneissa käytettiin muuttuvalla ilmavirralla ja CO₂-ohjauksella varustettua ilmanvaihtoa. Tällä järjestelyllä ilma pysyy aina raikkaana ja sekä ilmanvaihtokoneen sähköä että poistoilman mukana karkaavaa lämpöä säästyy. Tällaisen järjestelmän käyttö

esimerkiksi kotiolosuhteissa olisi hyvinkin perusteltua. Ongelmaksi muodostuvat järjestelmän hinta, sen käytön opettaminen käyttäjille sekä mahdollisten vikatilanteiden yleistyminen. Periaatteellisesti ratkaisuun tehdyt talotekniikkavalinnat osoittivat toimivuutensa.

Simuloinneissa käytetyt talotekniset ratkaisut ovat olemassa olevaa tekniikkaa, mutta niiden käyttö varsinkin asuinrakentamisessa on vielä vähäistä. Kun uusia tekniikoita otetaan asteittain käyttöön, ne tuovat kuitenkin lisäulottuvuuksia rakentamiseen ja hyvään sisäilmastoon.

Kehitetyn ratkaisun soveltuvuutta kaupunkirakenteeseen tarkasteltiin simuloinnein esimerkkikaavarakenteessa, jotta ratkaisun soveltuvuus varmistettaisiin yleisesti mahdollisimman moneen rakennuspaikkaan. Esimerkkeinä tarkastellut Kalasataman ja Jätkäsaaren asemakaavat osoittavat, että kantakaupunkiin rakennettavilla uusilla alueilla korttelirakenne on tyypillisesti urbaani ja umpikorttelimainen. Katu- ja sisätilojen valoisuuden tavoite lienee kuitenkin keskeinen syy siihen, että kantakaupungin uusien asemakaavojen korttelit eivät historiallisen ruutukaavan tapaan enää muodosta laajoja, mattomaisia umpikorttelialueita, jossa rakennukset varjostavat toistensa julkisivuja merkittävästi. Kalasataman ja Jätkäsaaren korttelit näyttävät muodostavan nauhamaista, enintään kaksi korttelia käsittävää kaupunkirakennetta, jonka kortteleista avautuu tyypillisesti avarampia näkymiä vähintään yhteen suuntaan. Tämä luo mahdollisuuksia aurinkoenergian hyödyntämiseen muutenkin kuin kattopinnoilta.

Simulaatiotuloksen mukaan ympäröivät yksittäiset naapurirakennukset eivät oleellisesti vaikuta toimistorakennuksen jäähditysenergiankulutukseen. Asuinrakennuksessa tilojen jäähditysenergiankulutus pienenee hieman. Ympäröivän rakennuskannan vaikutus aiheuttaa lämmitysenergiankulutuksessa hienoista kasvua, mikä johtuu siitä että talvikaudella matalassa kulmassa sisätiloihin lankeava auringonsäteily vähenee. Saatu tulos vaikuttaa johdonmukaiselta sen vuoksi, että ympäröivät rakennukset estävät ensisijaisesti talvikuukausien matalalta tulevaa auringonsäteilyä.

Kehitetyn SunZEB-ratkaisun vaikutus kaukolämpöenergian vuositaseseen oli merkittävä, verrattuna ratkaisuun ilman uusiutuvan tuotantoa. Kun takaisinkierätetyn energian tehokkuusvaikutus otettiin huomioon, kaukolämpöenergian tarve lämmityksessä pieneni toimistossa vuositasolla -157 % eli toimisto tuotti vuositasolla lämpöä enemmän kuin kulutti. Vastaavasti kerrostalossa kaukolämmön tarve pieneni -55 %. Tulokset pätevät niin kauan kuin kaukolämpöjärjestelmässä on tilaa takaisinkierätetylle energialle.

Kehitetyn ratkaisun sopeutumista ilmastonmuutoksen tuomiin säävaihteluihin tarkasteltiin simuloimalla suunnitteluratkaisut vuoden 2030 tilastollisesti tyypillisellä säätiedolla. Säämalli ei huomioi kylmien jaksojen mitoitustilannetta eikä pitkäkestöisten hellejaksojen vaikutusta. Jäähditysenergian tarve toimiston tapauksessa kasvaa 6,3 % ja asuinkestoalossa 5,0 %. Kaukolämmön tarve pienenee toimistossa -10,5 % ja kerrostalossa -3,0 %. Muutokseen vaikuttaa pääasiassa ilmastonmuutoksen tuoma vuosittainen keskilämpötilan nousu. Auringonsäteilyssä ei tapahdu merkittäviä muutoksia vuoteen 2030 tullessa. Kehitetyn ratkaisun palve-

lukyky sisäolosuhteiden osalta säilyy myös tulevaisuuden lämpimämmässä ilmassa.

Tehdyissä 20 vuoden tarkastelujakson elinkaarikustannuslaskennassa havaittiin, että asuinkeuhkotalo tulee hieman kalliimmaksi ja toimisto taas hieman edullisemmaksi kuin nykyinen rakentamistapa samalla sisäolosuhteiden palvelutasolla. Kerrostalon elinkaarikustannukset ovat SunZEB – ratkaisun osalta noin 0,2 €/n-m²/v eli 0,017 €/n-m²,kk korkeammat. SunZEB – ratkaisun hankintakustannuslisä kerrostalossa on noin 130...150 €/as-m²/v. Toimistorakennuksen osalta SunZEB – ratkaisun hankintakustannus ja sen pohjalta määritetty pääomakustannus samoin kuin elinkaarikustannukset ovat hieman alhaisemmat kuin verrokkiratkaisun. Vuosikustannukset alenevat noin 2 €/n-m²/v. Erityisesti uusiutuvaan omavaraisenergiaan ja jäähdytysvaatimukseen liittyvällä toteutusratkaisuilla samoin kuin ikkunalalla voidaan huomattavasti vaikuttaa kokonaistaloudellisuuteen. Aurinkolämpöenergiajärjestelmä erillisenä omavaraisenergiaratkaisuna muodostui tarkastelluissa verrokkiratkaisuissa epätaloudelliseksi. Lisäksi aktiivisen aurinkolämmön sijoittelu rakennuksen pinnoille on haasteellista tilan loppuessa kesken, mikäli aurinkolämmön tuotto-osuus haluttaisiin yhtä suureksi kuin SunZEB-ratkaisussa. Laskentajakson pituuden lisääminen heikentää hieman SunZEB – ratkaisun kannattavuutta, koska vuotuiset energiakustannukset ovat korkeammat.

SunZEB-konseptin alueellisia vaikutuksia verrattuna verrokkitaapaukseen tarkasteltiin skenaariotarkastelujen avulla uudis- ja korjausrakentamiselle. Skenaariotarkasteluissa käytettiin yksinkertaistettua mallia alueellisesta energiajärjestelmästä, joka ottaa huomioon myös muutosten vaikutukset Suomen sähköntuotantoon. Skenaariotarkasteluissa tarkasteltiin muutoksia suhteessa valittuun referenssivuoteen, joka on 2012. Tuloksena saatiin, että otettaessa huomioon skenaarioiden vaikutukset valtakunnalliseen sähköntuotantoon, ei uusiutuvan tuotannon eri ratkaisuvaihtoehtoja – esim. SunZEB tai aktiivinen aurinkolämpö - voida laittaa suoraan varsinaiseen paremmuusjärjestykseen primäärienergian tai CO₂-päästöjen näkökulmasta. SunZEB-konseptin ja verrokkiratkaisun vaikutukset ovat likipitään yhtä suuret. Sama tilanne on vertailtaessa vain jäähdytyksen tuotantotapoja keskenään. SunZEB-konseptin vaikutus rakennuksen E-lukuun vaatii vielä jatkotutkimuksia. Lisäksi tulisi tarkastella onko mahdollista antaa aluetason hyvitystä integroiduille energiajärjestelmille.

Tulokset osoittavat, että primäärienergian ja CO₂-päästöjen näkökulmasta on hyvin olennaista, kuinka poistuva CHP-alueiden yhteistuotantosähkö korvataan ja lisääntyvä sähkönkäyttö tuotetaan koko Suomen sähkön tuotannossa. Näin ollen on mahdollista, ettei SunZEB -konseptissa kannata yrittää maksimoida jäähdytysenergian tarvetta ja tätä kautta CHC:n (lämpöpumppu, joka tuottaa kaukolämpöä ja kaukojäähdytystä samanaikaisesti) tuotantoa. Tämä vaatii vielä jatkotutkimuksia, koska tarkennettujen analyysien esittämiseksi valtakunnallinen voimajärjestelmä tulisi mallintaa yksityiskohtaisemmin ja ottaa huomioon tuotantokapasiteetin muutokset tulevaisuudessa. Lisäksi SunZEB -ratkaisua tulee kehittää jatkossa siten, että se sisältäisi uusiutuvan lämmön tuotannon lisäksi myös uusiutuvan sähkön tuotantoa, mikä kompensoi CHP -sähköntuotannon pienenemisen ja mahdollisen epäedullisen CO₂-päästövaikutuksen.

Johtopäätökset

Johtopäätöksinä voidaan sanoa, että kierrättämällä kaukojäähdytyksen avulla rakennuksista saadaan kierrätettyä merkittävä määrä lämpöä takaisin kaukolämpöverkkoon ja tämä on hyödynnettävillä niin kauan kuin kaukolämpöjärjestelmässä on tilaa takaisinkierrätetylle energialle. Tästä lämmöstä osa auringosta peräisin olevaa uusiutuvaa energiaa.

Kahden tarkastellun uuden asuinalueen kaavoitus oli sellaista, että aurinkoenergian hyödyntämiseen muutenkin kuin rakennusten kattopinnoilta on mahdollista. Kaupunkien vanhoilla ja tiiviillä asemakaava-alueilla se voi vastaavasti olla haastavaa rakennusten aiheuttaman varjostuksen vuoksi.

Päästöjen osalta energiantuotantoa on kuitenkin katsottava kokonaisuutena ja huolehdittava siitä, että lisääntyvä uusiutuvan energian käyttö ei aiheuta esimerkiksi sähkön tuotannossa CHP-laitosta epäedullisenpa CO₂ ympäristövaikutusta.

Kun huomioidaan rakennuksen elinkaarikustannukset, eroaa SunZEB-konseptin mukainen rakennus verokkirakennuksesta hinnaltaan vain vähän. Kaukolämmön ja -jäähdytyksen hinnoittelumalli voi vaatia tuotekehitystä, mikäli SunZEB-konseptin halutaan yleistyvän erityisesti asuinkerrostaloissa.

SunZEB konseptia jatkokehitettäessä on lämpöviihtyvyyteen ja päivänvalon aiheuttamaan häikäisyyn kiinnitettävä edelleen erityistä huomiota.

Lähdeluettelo

- Airaksinen, M & Vainio, T. 2012. Rakennuskannan korjaamisen ja kunnossapidon energiantehokkuustoimenpiteiden vaikuttavuuden arviointi energiansäästön, CO₂ekv päästöjen, kustannuksien ja kannattavuuden näkökulmista. Asiakasraportti. 25 s.
- Beck W. (toim.), Dolmans, D., Dutoo, G., Hall, A. & Seppänen, O. 2011. Aurinkosuojaus. Aurinkosuojauksen suunnittelu kestävän kehityksen mukaisesti rakennuksiin. Rehva ohjekirja no 12, Belgia: REHVA ja ES-SO. 70 s. + liitteet 3 s.
- EN 15459:2007. Energy performance of buildings. Economic evaluation procedure for energy systems in buildings.
- FINVAC 2014. Ehdotus lähes nollaenergiarakentamisen lähtötiedoiksi. Saatavilla http://files.kotisivukone.com/en.finvac.kotisivukone.com/tiedostot/raportti_tilojen_kayttoprofiilit_20140207.pdf (viitattu 2.12.2014)
- FInZeb. Kustannusten muodostuminen_asuinkerrostalo ja toimisto (2014).
- FInZEB 2015 Lähes nollaenergiarakennuksen käsitteet, tavoitteet ja suuntaviivat kansallisella tasolla. Loppuraportti. Hankkeen sisältö ja tulokset. (http://finzeb.fi/wp-content/uploads/2015/04/FInZEB_loppuraportti.pdf)
- Helsingin kaupunki. Kaupunkisuunnitteluvirasto. Liikennesuunnitteluosasto 2.11.2001. Katupoikkileikkausten suunnitteluohjeet. 18 s. (<http://www.hel.fi/hel2/ksv/Aineistot/Liikennesuunnittelu/Autoilu/katu1.pdf>)
- Helen Oy. 2014a. Kaukolämmön tuotanto tunneittain vuosina 2010-2013. Julkaisematon tilasto.
- Helen Oy. 2014b. Kaukojäähdytyksen tuotanto tunneittain vuosina 2010-2013. Julkaisematon tilasto.
- Helen Oy. 2014c. Kaukolämmön ominaiskulutukset asuinkerrostaloissa ja toimistorakennuksissa vuonna 2013. Julkaisematon tilasto.
- Helen Oy. 2014d. Kaukolämmön ja -jäähdytyksen tuntitason käyttöprofiilit asuinkerrostaloissa ja toimistorakennuksissa vuonna 2012. Julkaisematon tilasto.
- Hilliaho, K. 2010. Parvekelasituksen energiataloudelliset vaikutukset, Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetun ympäristön tiedekunta. 147 s. + liitteet 8 s.

- Ilmatieteenlaitos 2015. <http://ilmatieteenlaitos.fi/energiälaskennan-testivuodet-tulevaisuuden-ilmastossa> (viitattu 2.12.2014).
- Jylhä, K., Kalamees, T., Tietäväinen, H., Ruosteenoja, K., Jokisalo, J., Hyvönen, R., Ilomets, S., Saku, S., Hutila, A. Rakennusten energialaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastonmuutoksen vaikutuksista. Raportti. Ilmatieteenlaitos 2011.
- LVI 01-10424. Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitajaksot (2008).
- Lylykangas, K., Jodat, T., Juntunen, M., Kiuru, J., Karjalainen, E., Pääatalo, J. & Vuolle, M. 2014. Aktiivisen ja passiivisen aurinkoenergian huomioon ottaminen asemakaavoitus- ja rakennussuunnitteluvaiheissa Oulun kaupungin alueella. Selvitys. 87 s.
- NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center
- New, M., Lister, D., Hulme, M. and Makin, I., 2002: A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate Research* 21.
- Rakennustieto. KH-tiedosto (viitattu 10.1.2015)
- RakMk D3 2012. 2011. Rakennusten energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet. Suomen rakentamismääräyskokoelman osa D3 2012. Helsinki: Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto..
- Sisäilmastoluokitus 2008. Sisäilmaston tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Rakennustietokortti RT 07-10946. Rakennusteitosäätiö RTS 2012.
- Thalfeldt, M., Pikas, E., Kurnitski, J. & Voll, H. 2013. Facade design principles for nearly zero energy buildings in a cold climate. *Energy and Buildings*, vol. 67, ss. 309–321.
- Tuomaala, P. Holopainen, R., Piira, K., Airaksinen, M. Impact of individual characteristics - such as age, gender, BMI, and fitness - on human thermal sensation. *Building Simulation 2013*. France, Chambéry, 25-28 Aug. 2013
- Tuomaala, P. Holopainen, R. Ihmisen yksilöllisten ominaisuuksien vaikutus lämpöaistimukseen. Sisäilmastoseminaari 13.3.2014. Helsinki, Finland.
- Ympäristöministeriö. Energiatehokkuutta koskevien vähimmäisvaatimusten kustannusoptimaalisten tasojen laskenta (2012).

Liite A: Simuloitujen rakennusten tekniset yksityiskohdat

Pinta-alat ja tilavuus	SunZEB kerrostalo	SunZEB _v kerrostalo	SunZEB toimisto	SunZEB _v toimisto
Lattia-ala (m2)	2 724	2 724	20 894	20 894
Tilavuus (m3)	6 771	6 771	61 044	61 044
Ala-pohjan ala (m2)	279	279	2 318	2 318
Vaipan ala (m2)	2 363	2 363	11 937	11 937
Ulkoseinien ala (m2)	1 108	1 402	2 305	4 174
Katon ala (m2)	279	279	2 318	2 318
Kerroskorkeus	3.0	3.0	3.3	3.3
Ikkunapinta-ala (m2)	698	404	4 996	3 127

Suhteelliset ikkuna-alat	SunZEB kerrostalo	SunZEB _v kerrostalo	SunZEB toimisto	SunZEB _v toimisto
Ulkoseinä + ikkuna-ala (%)	1 806	1 806	7301	7301
Ikkuna/vaipan ala (%)	30	17	42	26
Ikkuna/ulkoseinien ala (%)	39	22	68	43
Ikkuna/lattia-ala (%)	26	15	24	15

U- ja g-arvot	SunZEB kerrostalo	SunZEB _v kerrostalo	SunZEB toimisto	SunZEB _v toimisto
Ulkoseinät (W/Km2)	0.14	0.17	0.14	0.17
Katto (W/Km2)	0.08	0.09	0.08	0.09
Alapohja (W/Km2)	0.10	0.10	0.10	0.10
Ikkunat (W/Km2)	0.40	1.00	0.40	1.00
Karmit (W/Km2)	1.00	1.00	1.00	1.00
Ikkunan g-arvo	0.50	0.55	0.50	0.55

Ikkunoiden suuntaus	SunZEB kerrostalo	SunZEB _v kerrostalo	SunZEB toimisto	SunZEB _v toimisto
N (m2)	1 136	703	11 077	5 969
E (m2)	2 126	1 188	12 622	8 018
S (m2)	1 572	913	8 717	5 988
W (m2)	1 444	836	12 550	8 171

Pinta-alat ja tilavuus	SunZEB kerrostalo	SunZEB _v kerrostalo	SunZEB toimisto	SunZEB _v toimisto
Lämmöntalteenoton hyötysuhde (%)	85	65	85	65
Ilmanvaihdon SFP (kW/m ³ /s)	1.2	2.5	1.2	2.5
Ilmanvaihdon ilmamäärä	Keskim. 0.6 l/s, m ²	Keskim. 0.6 l/s, m ²	Keskim. 2.0 l/s, m ²	Keskim. 2.0 l/s, m ²
Lämmitys/jäähdytys-rajat (°C)	21/23	21/23	21/23	21/23
Tuloilman lämpötila (°C)	18...22	18...22	18...22	18...22
Lämmityksen menoveden lämpötila (°C)	20...35	20...35	20...35	20...35
Jäähdytyksen menoveden lämpötila (°C)	18	18	18	18
Kaihtimet	Sisä-puoliset	Ikkunan välissä	Sisä-puoliset	Ikkunan välissä
Lämmitys/jäähdytys-järjestelmä	Uponor Renovis-paneeli, kattoasennus		Uponor comfort -paneeli, kattoasennus	
Aurinkolämpökeräimien määrä (m ²)	0	200 m ²	0	1490 m ²
Aurinkolämpö per lattia-ala (keräin m ² /lattia-ala m ² m ²)	-	0,073	-	0,071
Aurinkolämpökeräin		SavoSolar		SavoSolar

Liite B: Kustannuslaskennan yksityiskohdat

Tässä liitteessä on esitetty verrannollisten SunZEB_v - ja SunZEB –ratkaisujen taloudellisuusvertailun edellyttämät kustannustekijät sekä yksityiskohtaiset laskentatulokset.

Käytetyt kustannustekijät olivat seuraavat

- Hankintakustannukset (investointikustannukset)
- Jäännösarvo
- Reaaliset rahoituskustannukset (perustuen hankinnan rahoitukseen)
- Pääomakustannukset (= hankintakustannus + rahoituskustannus - jäännösarvo)
- Huolto- ja kunnossapitokustannukset
- Energiakustannukset
- Elinkaarikustannusten (pääomakustannukset + huolto- ja kunnossapitokustannukset + energiakustannukset) kokoaminen

Hankintakustannukset (investointikustannukset) muodostuvat seuraavasti

- Rakennusosakustannukset kattaa rakennusosien tai järjestelmän hankinnan paikoilleen asennettuna.
- Yleiskustannukset +29 % suhteessa rakennusosakustannuksiin kattaa rakennuttamisen ja suunnittelun sekä rakennusyhtiön katteen, työmaajohdon sekä muut yhteiset työmaakulut.
- Arvonlisävero +24 % suhteessa rakennusosakustannusten ja yleiskustannusten summaan.

Jäännösarvo on laskettu suhteessa laskennalliseen 50 vuoden käyttöikään rakenneteknisten rakennusosakustannusten osalta sekä 30 vuoden käyttöikään taloteknisten rakennusosakustannusten osalta.

Rahoituskustannukset on määritetty käyttäen 1 %:n reaalikorkoa.

Pääomakustannusten laskenta (= hankintakustannus + rahoituskustannus - jäännösarvo).

Seuraavassa on esitetty vertailussa käytetyt tekniset ratkaisut ja niitä vastaavat rakennusosakustannukset (kokonaishankintoina paikoilleen asennettuna). SunZEB_v – toteutusratkaisu perustuu vuoden 2012 rakentamismääräyksiin ja tekniikkaan, millä saavutetaan S2 sisäilmaluokka ja uusiutuvan energian tuottoon 55 %:lla (asuinkerrostalo) tai 157 %:lla (toimistorakennus). Talotekniikan osalta on optimaaliset ratkaisut määritetty SunZEB -ratkaisun osalta tutkimusryhmän yhteistyönä laitetoimittajien toimittamia tietoja hyödyntäen.

Vertailussa käytetyt rakennusosakustannukset taulukossa B1 (ALV 0%) laskettiin paikoilleen asennettuna (FinZeb 2014, Ympäristöministeriö 2012).

Taulukko B1. Asuinkerrostalon ja toimistorakennuksen yksikkökustannukset paikoilleen asennettuna laskennassa (ALV = 0).

	Yksikkö	SunZEB _v	SunZEB
Alapohjat (betonilaatta, EPS)			
U -arvo	W/m ² K	0,10	0,10
Rakennusosakustannus	€/ap-m ²	60	60
Ulkoseinät (suojauksineen)			
U -arvo	W/m ² K	0,17	0,14
Rakennusosakustannus (asuinrakennus)	€/us-m ²	240	247
Rakennusosakustannus (toimistorakennus)	€/us-m ²	260	266
Yläpohja (Ontelolaatta, kevytsora, betonilaatta)			
U -arvo	W/m ² K	0,09	0,08
Rakennusosakustannus	€/yp-m ²	210	213
Ikkunat (sis. tilkkeet, listat, vesipellit, maalauksen)			
Koko ikkunan U -arvo	W/m ² K	1,00	0,58
Auringonsäteilyn kokonaisläpäisykerroin	g-arvo	0,47	0,24
Rakennusosakustannus (asuinrakennus)	€/ikk-m ²	370	440
Rakennusosakustannus (toimistorakennus)	€/ikk-m ²	350	410
Illmanvaihtojärjestelmä (hajautettu tulo- ja poistoilmanvaihto)			
Järjestelmäkustannus (asuinrakennus)	€/m ²	56	68
Järjestelmäkustannus (toimistorakennus)	€/m ²	66	78
LTO:n hyötysuhde (toimisto)	%	70	85
LTO:n hyötysuhde (asuintalo)	%	70	85
Ominaisähkätehokkuus SFP	kW/(m ³ /s)	2,0	1,2
Kaukolämpö- ja jäähdytysjärjestelmä			
Liittymismaksut	€/m ²	11	15
Alajakokeskus ml. siirtimet ja automaatio			
Asuintalo	€/m ²	14	13
Toimistotalo	€/m ²	11	10
Kaukojäähdytyslaitteet	€/m ²		8
Jäähdytysjärjestelmä (jäähdytyskoneet, johtotiet)	€/m ²	15	
Energianjakelu			
Asuintalo (lämmitys- ja jäähdytyspaneelit molemmissa; esim. Uponor Renovis)	€/m ²	55	55
Toimistotalo (lämmitys- ja jäähdytyspaneelit molemmissa, esim. Uponor Comfort)	€/m ²	90	90
Aurinkolämpöjärjestelmä (keräimet, kiinnikkeet, varaaja ja lämmönsiirrin, automaatio, muut putkitukset)	€/keräin-m ²	630	

Huolto- ja kunnossapitokustannusten nykyarvo on laskettu kertomalla laskentajakson pituus suhteellisilla vuosikustannuksilla, mitkä esitetty taulukossa B2 (EN 15459:2007, Rakennustieto KH-tiedosto, LVI 01-10424).

Taulukko B2. Asuinkerrostalon ja toimistorakennuksen huolto- ja kunnossapitokustannusten määrittäminen.

	Laskennallinen käyttöikä [v]	Huolto- ja kunnossapitokustannus [%/hankintakustannus 20 vuodessa]
Ala- ja yläpohjat	50	1
Ulkoseinät	50	1,5
Ikkunat	50	2
Lämmityskattilat, kattilahuoneet	35	1
Ilmanvaihtokoneet ja LTO	25	2
Lämmitys- ja jäähdytyspaneelit	30	2
Kaukolämpö	25	0,5
Aurinkolämpöjärjestelmä	25	2
Koko rakennus keskimäärin		1,5

Ns. kiinteitä pääomakustannuksia (riippumattomia energiatehokkuudesta) vastaavana huolto- ja kunnossapitokustannusten suhteena hankintakustannuksiin on käytetty 1,5 %/v.

Energiakustannusten (sisältäen perusmaksut, energiamaksut ja arvonalisäveron kustannustasossa 1/2005) laskenta perustuu energialaskentaan sekä keskimääräisiin vuositasoihin sopimushintoihin seuraavien perusteiden

- Perusmaksut perustuvat liityntätehoihin; kaukojäähdytykselle käytetty Helenin ilmoittamaa 1,2 €/n-m² (ALV0)
- Energimaksut määritetty vuonna 2014 toteutuneiden yksikköhintojen ja SunZEBv –ratkaisun kulutusprofiilien perusteella
- Omavaraisesti tuotetun aurinkoenergian kesäaikainen ylituotanto myydään energiaverkkoon Helenin osoittamalla keskimääräisellä kesäajan ostohinnalla

Nykyarvo on laskettu kertomalla vuotuiset sopimushintoihin perustuvat energiakustannukset laskentajakson pituudella.

Elinkaarikustannukset on koottu nykyarvoksi siten, että kustannuslaskennan tuloksena määritetään vuosikustannuserot.

Herkkyystarkasteluna on otettu huomioon energiakustannusten mahdollinen reaalihintojen nousu (3 %/v koko laskentajakson ajan) sekä kaukojäähdytyskustannusten reaalihintojen asettuminen hyvin alhaisiksi.

- Vaihtoehto, missä pääomakustannukset 25 % korkeammat (johtuen korkeammista hankintakustannuksista tai 3 %:n vuotuisesta reaaliakorosta)
- Energiakustannusten vuotuinen reaalinousu on 3 %

Seuraavassa on esitetty elinkaarikustannuslaskennan tulokset eriteltyinä SunZEBv - ja SunZEB –ratkaisujen osalta asuinkerrostalon ja toimistorakennuksen tapauksissa (taulukot B3 ja B4).

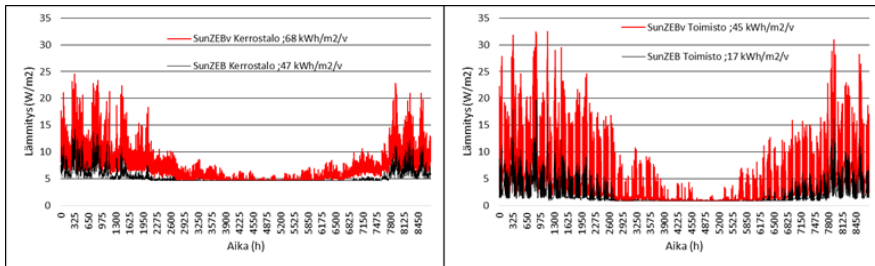
Taulukko B3. Asuinkerrostalon kustannuslaskennan tulokset (€/m²) vaihtoehdoille SunZEBv ja SunZEB sekä ns. minimitasolle, mikä ei sisällä aurinkolämpöä eikä jäähdytystä.

Asuinkerrostalo: Helsinki	Laskentajakso: 20 v	Kustannustaso: 1/2015		
		Yksikkö	Minimitaso	SunZEBv
LAAJUUS JA RAKENNEOSAMÄÄRÄT				
Lämmitetty nettoala	m ²	2724	2724	2724
Ala- ja yläpohja-ala	ap-m ²	279	279	279
Ulkoseinäala	us-m ²	1403	1402	1108
Ikkuna-ala	ikk-m ²	400	400	698
ENERGIATEHOKKUUS				
Omavaraisesti tuotettu lämpöenergia omaan käyttöön	kWh/m ² ,a		24	
Omavaraisesti tuotettu lämpöenergia; myynti kaukolämpöverkkoon	kWh/m ² ,a		2	
Ostoenergian kulutus, kaukolämpö	kWh/m ² ,a	68	46	47
Ostoenergian kulutus, jäähdytys	kWh/m ² ,a		6	26
Ostoenergian kulutus, sähkö	kWh/m ² ,a	42	42	38
Kaukolämmön keskim. vuotuinen ostohinta sis. ALV	€/kWh	0.047	0.047	0.047
Omavaraisesti tuotetun lämpöenergian myyntihinta sis. ALV	€/kWh		0.012	
Jäähdytyksen keskim. vuotuinen ostohinta sis. ALV	€/kWh		0.095	0.031
Sähköenergian keskim. vuotuinen ostohinta sis. ALV	€/kWh	0.095	0.095	0.095
Energiatohokkuusluku	kWh/m ²	119	113	107
Energiatohokkuusluokka		C	C	C
Sisäilmaluokka		S3	S2	S2
TALOUDELLISET VAIKUTUKSET				
Rakennusosakustannus				
Alapohja	€/m ²	6	6	6
Ulkoseinät	€/m ²	123	123	100
Ikkunat	€/m ²	54	54	113
Yläpohja	€/m ²	22	22	23
Kaukolämpö ja jäähdytys				
Liittymismaksut	€/m ²	11	11	15
Alajakokeskus	€/m ²	10	10	9
Kaukojäähdytyslaitteet				8
SunZEBv -Jäähdytysjärjestelmä	€/m ²		15	
Energianjakelu	€/m ²	40	55	55
Aurinkolämpöjärjestelmä	€/m ²		47	
Ilmanvaihtojärjestelmä	€/m ²	56	56	68
Rakennusosakustannus yhteensä	€/m ²	322	399	397
Liittyvät kustannukset (suunnittelu, yleiskulut)	€/m ²	93	116	115
Arvonlisävero	€/m ²	100	124	123
Hankintakustannus (investointikustannus)	€/m ²	515	638	635
Rahoituskustannus	€/m ²	52	65	64
Laskennallinen jäännösarvo	€/m ²	126	157	166
Pääomakustannus (hankinta+rahoitus-jäännösarvo)	€/m ²	441	546	533
Energiakustannus				
Perusmaksut	€/m ² /20v	22	19	49
Kaukolämpö (lämpöenergian osto-myynti)	€/m ² /20v	64	43	44
Jäähdytys	€/m ² /20v		11	16
Kiinteistö- ja käyttäjänsähkö	€/m ² /20v	80	80	72
Energiakustannus yhteensä	€/m ² /20v	166	153	182
Huolto- ja kunnossapitokustannus yhteensä	€/m ² /20v	162	184	173
Elinkaarikustannus yhteensä	€/m ² /20v	769	883	888
Elinkaarikustannusero	€/m ² /20v			4
Vuosikustannusero	€/m ² /v			0.2

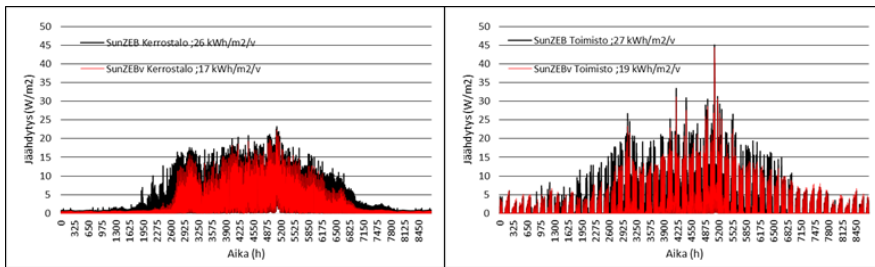
Taulukko B4. Toimistorakennuksen rakennuksen kustannuslaskennan tulokset (€/m²) vaihtoehdoille SunZEBv ja SunZEB sekä ns. Minimitasolle, mikä ei sisällä aurinkolämpöä eikä jäähdytystä.

Toimistorakennus Helsinki	Laskentajakso: 20 v	Kustannustaso: 1/2015		
		Yksikkö	Minimitaso	SunZEBv
LAAJUUS JA RAKENNEOSAMÄÄRÄT				
Lämmitetty nettoala	m ²	20824	20824	20824
Ala- ja yläpohja-ala	ap-m ²	2318	2318	2318
Ulkoseinäala	us-m ²	4174	4174	2305
Ikkuna-ala	ikk-m ²	3127	3127	4996
ENERGIATEHOKKUUS				
Omavaraisesti tuotettu lämpöenergia omaan käyttöön	kWh/m ² /v		11	
Omavaraisesti tuotettu lämpöenergia; myynti kaukolämpöverkkoon	kWh/m ² /v		16	
Ostoenergian kulutus, kaukolämpö	kWh/m ² /v	45	34	17
Ostoenergian kulutus, jäähdytys	kWh/m ² /v		6	27
Ostoenergian kulutus, sähkö	kWh/m ² /v	43	43	34
Kaukolämmön keskim. vuotuinen ostohinta sis. ALV	€/kWh	0.047	0.047	0.047
Omavaraisesti tuotetun lämpöenergian myyntihinta sis. ALV	€/kWh		0.012	
Jäähdytyksen keskim. vuotuinen ostohinta sis. ALV	€/kWh		0.09	0.031
Sähköenergian keskim. vuotuinen ostohinta sis. ALV	€/kWh	0.09	0.09	0.09
Energiatehokkuusluku	kWh/m ² /v	105	107	78
Energiatehokkuusluokka	Luokka	C	C	B
Sisäilmaluokka	Luokka	S3	S2	S2
TALOUDELLISET VAIKUTUKSET				
Rakennusosakustannus				
Alapohja	€/m ²	6	6	7
Ulkoseinät	€/m ²	52	52	29
Ikkunat	€/m ²	52	52	98
Yläpohja	€/m ²	23	23	24
Kaukolämpö ja jäähdytys				
Liittymismaksut	€/m ²	12	11	15
Alajakokeskus	€/m ²	10	10	9
Kaukojäähdytyslaitteet	€/m ²			8
SunZEBv -Jäähdytysjärjestelmä	€/m ²		15	
Energianjakelu	€/m ²	70	95	95
Aurinkolämpöjärjestelmä	€/m ²		49	
Ilmanvaihtojärjestelmä	€/m ²	66	66	78
Rakennusosakustannus yhteensä	€/m ²	291	379	363
Liittyvät kustannukset (suunnittelu, yleiskulut)	€/m ²	84	110	105
Arvonlisävero	€/m ²	90	117	112
Hankintakustannus (investointikustannus)	€/m ²	465	606	581
Rahoituskustannus	€/m ²	47	61	58
Laskennallinen jäännösarvo	€/m ²	117	153	157
Pääomakustannus (hankinta+rahoitus-jäännösarvo)	€/m ²	395	514	482
Energiakustannus				
Perusmaksut	€/m ² /20v	13	12	40
Kaukolämpö (lämpöenergian osto-myynti)	€/m ² /20v	42	28	16
Jäähdytys	€/m ² /20v	0	11	17
Kiinteistö- ja käyttäjäsähkö	€/m ² /20v	77	77	61
Energiakustannus yhteensä	€/m ² /20v	133	128	134
Huolto- ja kunnossapitokustannus yhteensä	€/m ² /20v	109	142	131
Elinkaarikustannus yhteensä	€/m ² /20v	637	785	747
Elinkaarikustannusero	€/m ² /20v			-38
Vuosikustannusero	€/m ² /v	0		-1.9

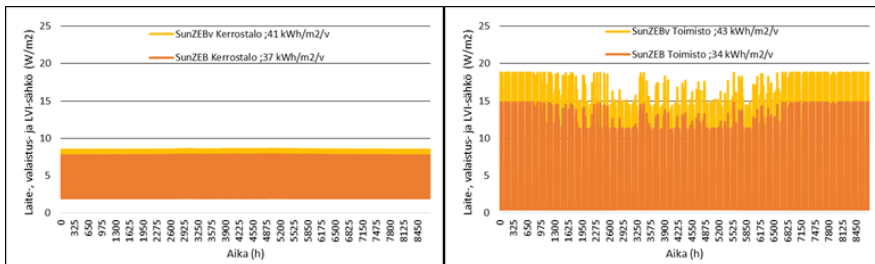
Liite C: Skenaariotarkasteluiden lähtötietoja



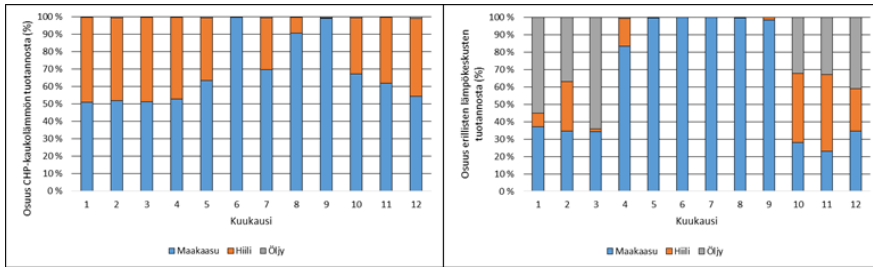
Kuva B1. Lämmitysenergian tuntitason kulutusprofiili SunZEB- ja SunZEB_v -toimistorakennuksissa



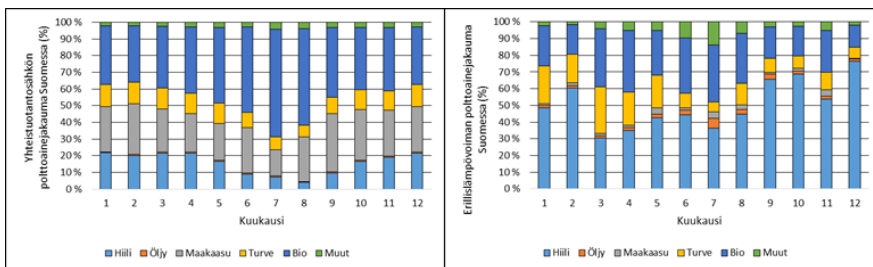
Kuva B2. Jäähdytysenergian tuntitason kulutusprofiili SunZEB- ja SunZEB_v -toimistorakennuksissa



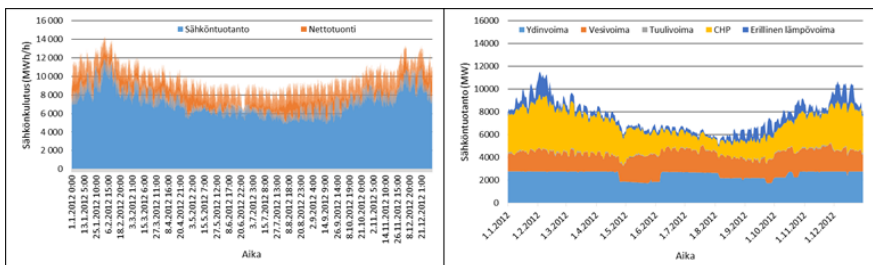
Kuva B3. Laite-, valaistus- ja LVI-sähkön (ei jäähdytyksen kompressorien sähkönkulutusta) tuntitason kulutusprofiili SunZEB- ja SunZEB_v -toimistorakennuksissa



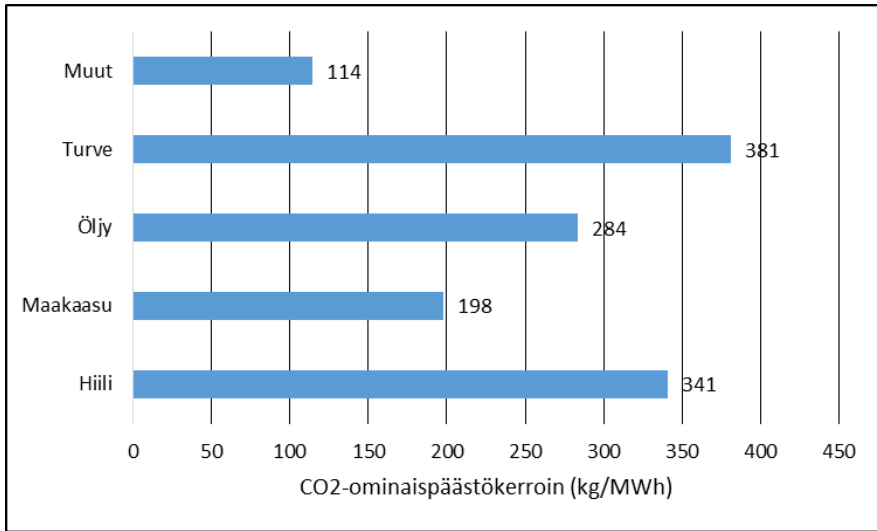
Kuva B4 Skenaarioissa käytetyt kuukausittaiset polttoainejakaumat Helen Oy:n kaukolämmön tuotannossa referenssivuonna (Lähde: Helen Oy)



Kuva B5. Skenaarioissa käytetyt kuukausittaiset polttoainejakaumat Suomen yhteistuotantosähkölle ja erilliselle lämpövoimalle referenssivuonna (Lähde: Energia-teollisuus)



Kuva B6. Sähkönkulutus jaoteltuna kotimaiseen sähköntuotantoon ja nettotuontiin (Lähde: Fingrid) ja sähköntuotanto tuotantomuodoittain Suomessa (Lähde: Energia-teollisuus) referenssivuonna



Kuva B7. Skenaarioissa käytetyt CO₂-ominaispäästökertoimet (Lähde: Tilastokeskus)

Nimeke	SunZEB – Plusenergiaa kaupungissa Uusiutuvaa energiaa asumiseen ja toimistoon
Tekijä(t)	Jari Shemeikka, Kimmo Lylykangas, Jaakko Ketomäki, Ismo Heimonen, Sakari Pulakka & Petri Pylsy
Tiivistelmä	<p>EU:n asettamana tavoitteena on siirtyä kustannusoptimaaliseen "lähes nollaenergia" -rakentamiseen viimeistään 2020-luvulle tullessa. Tämä hanke esitti erään ratkaisun kaukolämmitylle ja -jäähdytylle "lähes nollaenergia" -rakennukselle ottamalla huomioon tiiviin kaupunkirakenteen tuomia uusia mahdollisuuksia uusiutuvien energioiden hyödyntämiseen. Kehitetystä energiatehokkaan rakennuksen suunnitteluratkaisusta käytetään nimeä SunZEB. Ratkaisun perustana on aluetason kaukolämmitys ja -jäähdytys, joka mahdollistaa jäähdytysenergian kierrättämisen uusiutuvana energiana takaisin kaukolämpöverkkoon aluetasolla, sekä integroitu lämmön ja kylmän jakelujärjestelmä rakennustasolla, missä sama huonelaite tuottaa sekä lämpö- että jäähdytyspalvelut. Uusiutuvan aurinkoenergian saanto kierrätettäväksi mahdollistetaan rakennuksen laajoilla lasipinnoilla. Tasokas aurinkoarkkitehtuuri yhdessä talotekniikan kanssa mahdollistaa käyttäjille laadukkaat sisäolosuhteet.</p> <p>Tuloksena saatiin kerrostalolle ja toimistolle energiatehokkaat suunnitteluratkaisut, jotka tuottavat käyttäjille valoisat ja viihtyisät sisätilat laadukkailla sisäolosuhteilla (sisäilmaluokka S2).</p> <p>Kerrostalon elinkaarikustannukset ovat SunZEB-ratkaisun osalta noin 0,2 €/n-m²/v eli 0,017 €/n-m²,kk korkeammat. SunZEB-ratkaisun hankintakustannuslisä kerrostalossa on noin 130...150 €/as-m²/v).</p> <p>Toimistorakennuksen osalta SunZEB-ratkaisun hankintakustannus ja sen pohjalta määritetty pääomakustannus samoin kuin elinkaarikustannukset ovat hieman alhaisemmat kuin verrokkiratkaisun. Vuosikustannukset alenevat noin 2 €/n-m²/v.</p> <p>Kaukolämpöenergian tarve lämmityksessä pieni vuositasolla samanaikaisesti 157 % toimistossa ja 55 % kerrostalossa verrattuna ratkaisuun ilman uusiutuvan tuotantoa, kun takaisinkierätetyn energian tehokkuusvaikutus otettiin huomioon. Tämä pätee niin kauan kuin kaukolämpöjärjestelmässä on tilaa takaisinkierätetylle energialle.</p> <p>SunZEB-ratkaisua verrattiin päästötarkasteluin energijärjestelmätasolla nykymääräyksillä toteutettuihin rakennuksiin, joissa oli asennettu aktiivista aurinkolämpöä tuottamaan vastaava määrä uusiutuvaa energiaa kuin SunZEB-ratkaisuissa. Erot päästöissä SunZEB-konseptin ja verrokin välillä olivat hyvin marginaaliset, jolloin eri vaihtoehtoja ei voida asettaa suoraan parempaan järjestykseen primäärienergian käytön tai CO₂-päästöjen osalta. Case-alueena käytettiin Helsinkiä, mutta tulokset ovat yleistettävissä myös muille vastaaville yhdistettyä sähkön ja lämmön tuotantoa hyödyntäville kaupungeille.</p>
ISBN, ISSN	ISBN 978-951-38-8296-9 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp) ISSN-L 2242-1211 ISSN 2242-122X (Verkkojulkaisu)
Julkaisuaika	Huhtikuu 2015
Kieli	Suomi, englanninkielinen tiivistelmä
Sivumäärä	86 s. + liitt. 10 s.
Projektin nimi	
Rahoittajat	
Avainsanat	lähes nollaenergia, plusenergia, uusiutuva energia, kaukolämpö, kaukojäähdytys, CO ₂ -päästö
Julkaisija	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy PL 1000, 02044 VTT, puh. 020 722 111

Title	SunZEB – Plus energy in the city Renewable energy for residential and office buildings
Author(s)	Jari Shemeikka, Kimmo Lylykangas, Jaakko Ketomäki, Ismo Heimonen, Sakari Pulakka & Petri Pylsy
Abstract	<p>All new buildings must be built according to nearly zero-energy regulation in cost optimal ways at latest at 2020s according to Energy Performance of Buildings Directive set by EU. This project presented a solution for district heating and -chilled "nearly zero energy" building by taking into account the dense urban structure which gives the new possibilities for utilization of renewable energies. The energy-efficient building design solution developed within this project is named as SunZEB. The solution is based on the regional district heating and cooling. It allows cooling energy recycling back to the district heating network at the regional level as a renewable energy. It also makes integrated heat and cold distribution system possible on building level, as the same device produces both heat and cooling services. Renewable solar energy yield for recycling allows large glass surfaces in building. High-quality solar architecture together with the building services produces high-quality indoor conditions to users of building. The developed energy-efficient design solutions for block of flats and office that provide bright and comfortable interiors with high-quality indoor conditions for users (indoor air class S2).</p> <p>Life cycle costs of SunZEB - solution in the block house are around 0.2 € /n-m²/a, which are 0.017 € /n-m²,month higher than in corresponding reference building. Corresponding additional investment costs of SunZEB - the solution are about 130-150 € /m² in case of additional apartment building.</p> <p>In Office building the investment costs and life cycle costs of SunZEB - solution are slightly lower than in reference building. Then the annual cost are reduced by about 2 € /m² n /a.</p> <p>Need for district heating energy decrease about 157% in office building and 55% in apartment building compared to the solution when taking the recirculated energy in account. This is true as long as the district heating system has need for recirculated energy.</p> <p>The emissions of SunZEB solutions were compared at energy system level to the emissions of buildings which are built according today's building requirements. Active solar thermal energy installed in these buildings produced an equivalent amount of renewable energy as in SunZEB solutions. The differences in emissions between SunZEB concept and reference building were very marginal, and it is not possible to set them in order according with primary energy use and CO₂ emissions. In this study Helsinki was used as a case-area, but the results can be generalized to the rest of the respective combined heat and power production utilizing cities.</p>
ISBN, ISSN	ISBN 978-951-38-8296-9 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp) ISSN-L 2242-1211 ISSN 2242-122X (Online)
Date	April 2015
Language	Finnish, English abstract
Pages	86 p. + app. 10 p.
Name of the project	
Commissioned by	
Keywords	nearly zero energy building, plus energy building, renewable energy, district heating, district cooling, CO ₂ -emission
Publisher	VTT Technical Research Centre of Finland Ltd P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland, Tel. 020 722 111

SunZEB – Plusenergiaa kaupungissa

Uusiutuvaa energiaa asumiseen ja toimistoon

EU:n asettamana tavoitteena on siirtyä lähes nollaenergiatalon kaltaiseen uudisrakentamiseen viimeistään 2020-luvun lopulla. Tällä tulee olemaan merkittäviä vaikutuksia kaukolämmitettyyn rakennuskantaan Suomessa. Tällä hetkellä Suomen kansallinen määritelmä "lähes nollaenergialle" on tekemättä.

Tässä julkaisussa esitetään yksi vaihtoehtoinen ratkaisu sille, millainen lähes nollaenergiaratkaisu olisi, jos rakennus-suunnittelussa otetaan huomioon tiiviin kaupunkirakenteen tuomat mahdollisuudet uusiutuvien energioiden hyödyntämiseen, energiovirtojen innovatiiviseen kierrättämiseen. Ratkaisu sopii erityisesti sellaisiin kaupunkeihin, joissa uusiutuvan energian paikallinen saanto on rajoitettua kaupunkitilan rajoitteista johtuen. Ratkaisun perustana on aurinkoarkkitehtuurilla suunniteltu energiatehokas ja sisäolosuhteiltaan laadukas rakennus, joka kytketään aluetason kaukolämmitys- ja jäähdytysverkkoon, mikä mahdollistaa rakennuksesta kerätyn jäähdytysenergian kierrättämisen aluelämpöpumpulla uusiutuvana energiana takaisin kaukolämpöverkkoon.

Kaukolämpöenergian tarve pienenee toimistossa vuositasolla laskettuna jopa 157 %, eli toimisto tuottaa enemmän lämpöä kuin kuluttaa. Kerrostalossa vastaavasti lämmöntarve pienenee 55 %.

ISBN 978-951-38-8296-9 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)
ISSN-L 2242-1211
ISSN 2242-122X (Verkojulkaisu)