

Lähes nollaenergiarakentamisen ympäristövaikutusten arviointi

Suomen ympäristökeskus
15.12.2015

Savolahti Mikko, Mattinen Maija, Juhani Heljo, Maria Kopsakangas-Savolainen

Sisältö

1. Tausta.....	3
2. Uudisrakennuskanta Suomessa.....	4
2.1 Uudistuotannon määrä.....	4
2.2 Lämmitystavat.....	6
2.3 Kantaennuste.....	7
3. Nykylainsäädäntö.....	9
4. Ehdotetut uudet E-lukutasot.....	9
5. Uusien E-lukuvaatimusten vaikutustarkastelu.....	10
5.1 Laskuissa käytetyt kertoimet ja oletukset.....	10
5.2 Uusien E-lukuvaatimusten vaikutus energiankäyttöön.....	12
5.2.1 Muutokset rakennusten lämmitysenergian tarpeessa.....	12
5.2.2 Muutokset primäärienergian kulutuksessa.....	12
5.3 Vuosittaiset päästövähennykset uudella lainsäädännöllä.....	13
5.4 Ympäristövaikutukset.....	16
6. Ympäristövaikutukset tilanteessa, jossa omavaraisenergian ulosvienti voitaisiin lukea hyväksi E-luvun laskennassa.....	18
6.1 Muita näkökulmia.....	21
7. Yhteenveto ja päätelmät.....	22
Liite 1: Rakennusten ostoenergia.....	23
Kirjallisuus.....	26

1. Tausta

Rakennusten energiatehokkuusdirektiivin (EPBD) mukaan EU:n jäsenvaltioiden on varmistettava, että:

- a) 31 päivään joulukuuta 2020 mennessä kaikki uudet rakennukset ovat lähes nollaenergiarakennuksia.
- b) 31 päivän joulukuuta 2018 jälkeen uudet rakennukset, jotka ovat viranomaisten käytössä ja omistuksessa, ovat lähes nollaenergiarakennuksia.

Ympäristöministeriö vastaa lähes nollaenergiarakentamista käsittelevästä säädösvalmistelusta v. 2015. Määräykset julkaistaan vuoden 2017 alussa ja ne tulevat voimaan 1.1.2018, jolloin ne koskevat kaikkia uudisrakentamiseen liittyviä rakennuslupia. Keskeiset muutokset lainsäädännössä koskevat uudisrakentamisen energiatehokkuusvaatimuksia:

- vaatimustasot E-luvulle
- energialaskennan taseraja (uusiutuvaan omavaraisenergiaan luettavan energian laajentaminen ja verkkoon syötetyn uusiutuvan energian hyväksilukumahdollisuus E-luvussa)

Ympäristöministeriön toimeksiannosta Suomen ympäristökeskus (SYKE) arvioi lähes nollaenergiarakentamiseen liittyvän ehdotuksen ympäristövaikutuksia. Työn tavoitteena oli:

- 1) Selvittää lähes nollaenergiarakentamiseen siirtymisen keskeisimmät ympäristövaikutukset. Ympäristövaikutusten arvioinnin pääpaino on energiankulutuksesta aiheutuissa kasvihuonekaasu- ja pienhiukkaspäästöissä aikavälillä 2020-2030 ja jopa 2050 asti.
- 2) Tarkastella ja vertailla eri vaatimustaso- ja taserajavaihtoehtojen vaikutuksia päästöihin.

Selvityksessä hyödynnettiin kansallisen lähes nollaenergiarakentamista käsitelleen FInZEB-hankkeen aineistoja ja arvioitiin ne rakennustyyppit, joille hankkeessa tuotettiin ehdotukset. Päästölaskennassa hyödynnettiin kansallisen energiastrategian (2013) skenaarioita. Työ toteutettiin 10/2015-12/2015 välisenä aikana.

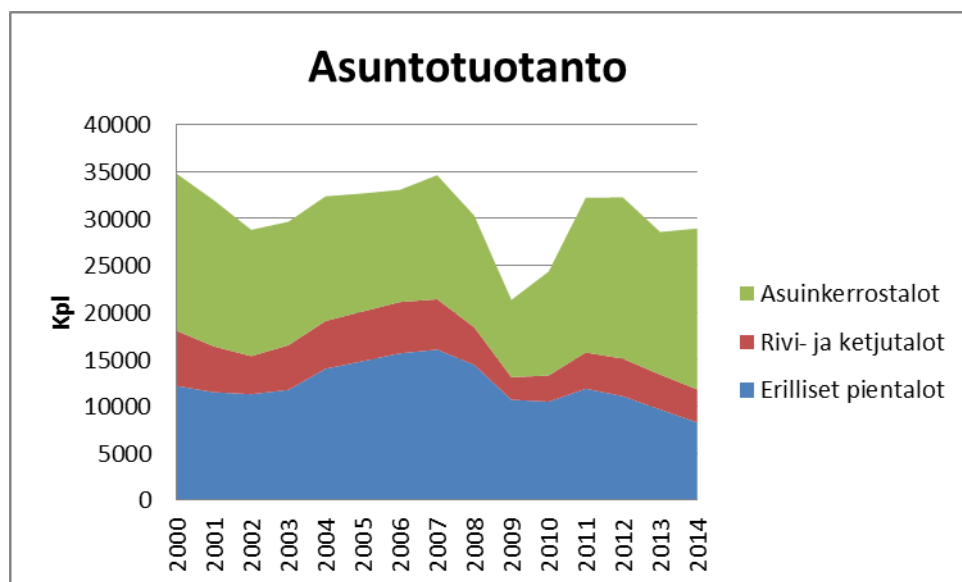
SYKEN työryhmään kuuluivat Ari Nissinen (hankkeen vastuullinen johtaja), erikoistutkija Maija Mattinen (hankkeen projektipäällikkö), tutkimusinsinööri Mikko Savolahti, prof. Maria Kopsakangas-Savolainen ja prof. Jyri Seppälä. Selvityksen toteuttamiseen osallistui myös projektipäällikkö Juhani Heljo Tampereen teknillisestä yliopistosta.

2. Uudisrakennuskanta Suomessa

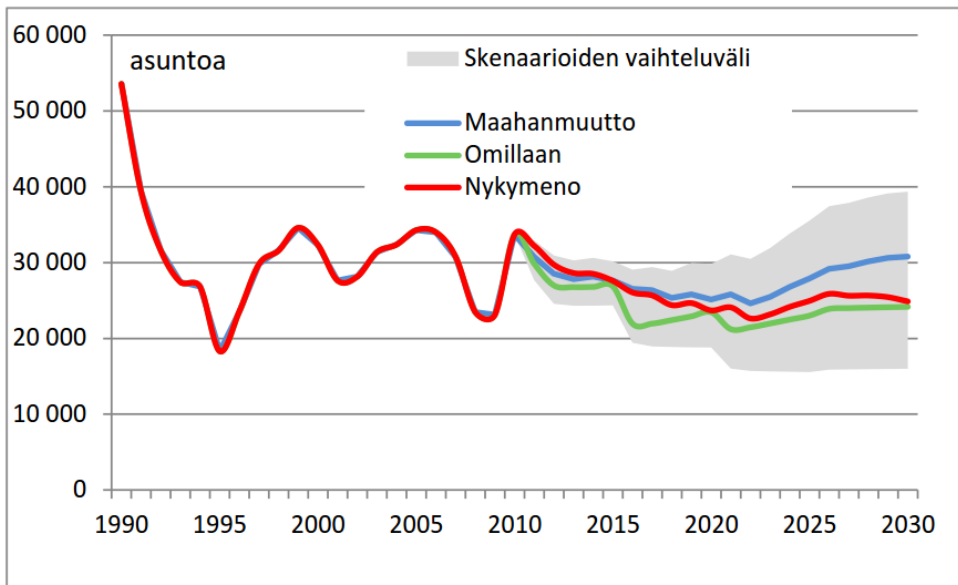
2.1 Uudistuotannon määrä

Uudistuotannon määrään vaikuttavat väestön määrä, maan sisäinen muutto, tilojen käytön tehokkuus (mm. asumisväljyys) ja vanhojen rakennusten poistuma. Kovin tarkkaa tuotantoennustetta ei nykyisessä monin tavoin muuttuvassa tilanteessa pysty tekemään.

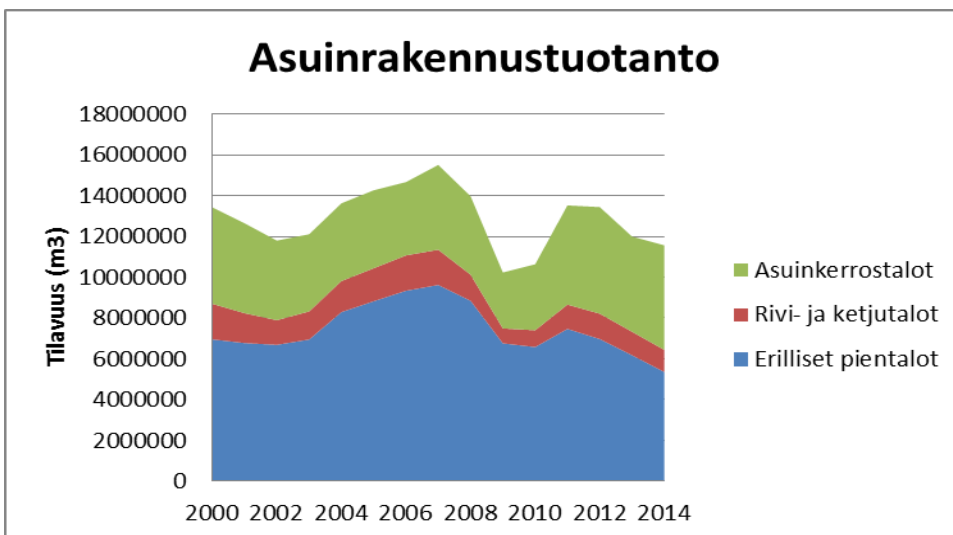
Parhaiten pystyy ennustamaan asuntorakentamisen tarvetta. Vuonna 2012 tehdyn ennusteen mukaan asuntotuotanto voi 2030 –luvulla vaihdella tehtyjen ennusteiden mukaan 20 000 – 30 000 vuosittaisen asunnon välillä (Vainio, 2012, ks. kuva 2). Maahanmuuton lisääntymisen takia todennäköinen vuosittainen asuntotuotannon tarve olisi lähempänä 30 000 asuntoa. Kymmenen viimevuoden keskimääräinen asuntotuotanto on ollut lähes 30 000 asuntoa. Viime vuosina mm. huonon taloudellisen tilanteen takia tuotanto on ollut kuitenkin vähäisempää (kuva 1). Kymmenen vuoden tuotannon lineaarinen regressio antaa nykytuotannoksi noin 27500 asunnon vuosituotannon valmistuneiden asuntojen mukaan. Kuvan 1 asuntotuotantomäärää vastaava asuinrakennusten tuotannon kehittyminen on esitetty kuvassa 3.



Kuva 1. Asuntotuotannon kehittyminen rakennus- ja asuntotuotantotilaston valmistuneiden asuntojen mukaan. Asunnoista noin 2,5 % sijaitsee muissa kuin asuinrakennuksissa. Lähde: Tilastokeskus



Kuva 2. Toteutunut asuntotuotanto 1990–2010 Tilastokeskuksen mukaan ja poistumaennusteiden avulla muodostetut asuntotuotantotarveskenaariot vuosille 2011–2030. Harmaa rasteri rajaa ääri vaihtoehtoja, todennäköiset skenaariot on esitetty käyrinä. Lähde: Vainio, 2012.

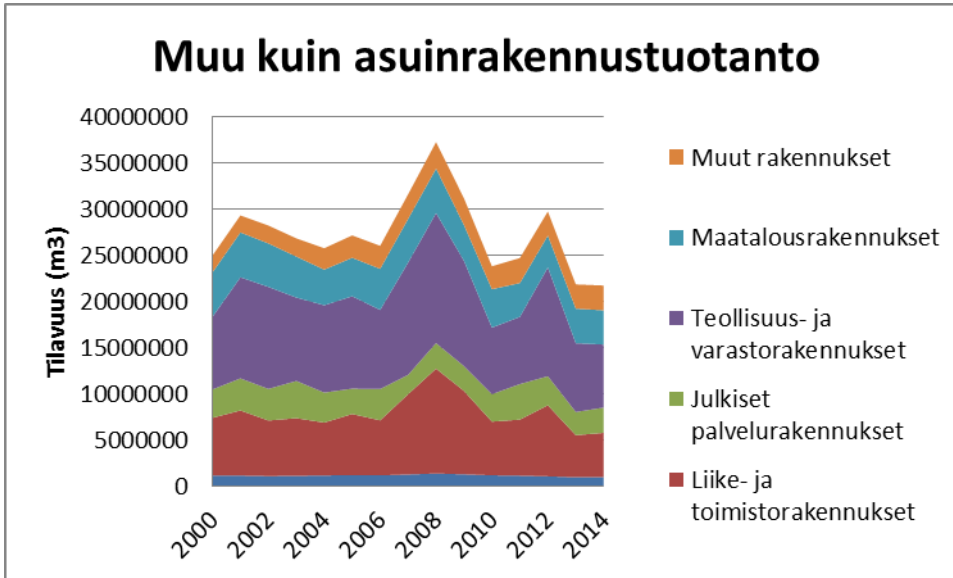


Kuva 3. Asuinrakennustuotannon kehittyminen rakennus- ja asuntotuotantotilaston valmistuneiden rakennusten mukaan. Lähde: Tilastokeskus

Asuntotuotantoennusteissa ei ole tehty ennusteita asuntotyypin jakauman osalta. Pientalojen osuus asuntorakentamisesta on viime vuosina pienentynyt. Tilavuuden perusteella erillisten pientalojen osuus on tällä hetkellä noin puolet asuntotuotannosta ja asuntokappaleiden mukaan noin 30 % asuntotuotannosta.

Palvelurakennusten tuotannon ennustaminen on huomattavasti vaikeampaa kuin asuntotuotannon. Julkisten palvelurakennusten määrä näyttäisi kuitenkin olevan kytköksissä asuinrakennustuotannon määrään. Se on ollut kymmenen vuoden aikana 20 – 30 % asuinrakennustuotannon määrästä. Hoitoalan rakennuksia, opetusrakennuksia ja kokoontumisrakennuksia on tehty viime vuosina 6-10 % asuntotuotannon määrästä vuosittain.

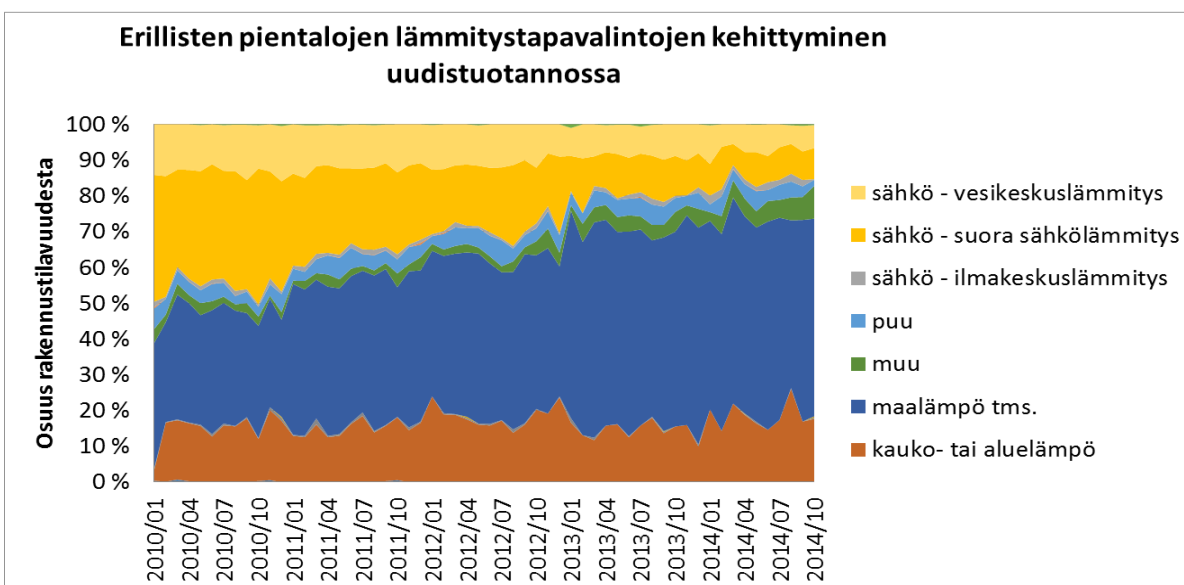
Liike- ja toimistorakennusten tuotanto on vaihdellut voimakkaammin varsinkin liikerakennusten osalta. Kaikkien muiden kuin asuinrakennusten tuotantomäärät on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Muiden kuin asuinrakennusten tuotannon määrän kehittyminen rakennus- ja asuntotuotantotilaston valmistuneiden rakennusten mukaan. Lähde: Tilastokeskus

2.2 Lämmitystavat

Lämmitystapojen valintaan vaikuttavat voimakkaimmin rakennuksen koko ja sijainti. Suuret talot taajamissa liittyvät lähes kaikki kaukolämpöön. Jonkin verran näissäkin on yleistynyt maalämpö (noin 5 %). Suurin vaihtelu lämmitystavoissa on pientaloissa ja muissakin pienissä rakennuksissa. Maalämmön suosio on kasvanut ja suoran sähkölämmityksen suosio on vähentynyt pientaloissa (kuva 5). Muutostrendi on jatkunut jo pitkään. Pientaloissa lämmitysjärjestelmien investointikustannukset ovat merkittävässä roolissa, koska energiankulutus on suhteellisen pientä. Vuonna 2012 tuli käyttöön uudisrakentamisen energiamääräyksissä (D3) E-luvun käyttö, joka vaikeutti sähkölämmitystalojen rakentamista. Pieni vaikutus näkyy kehityksessä, mutta ei kovin radikaalia muutosta. Kovin tarkkaa tietoa ei lämmitystavoista saada, koska rakennusluvan yhteydessä täytettävässä RH1 lomakkeessa ei ole mahdollista ilmoittaa kaikkia erilaisia nykyisiä lämmitystapoja.



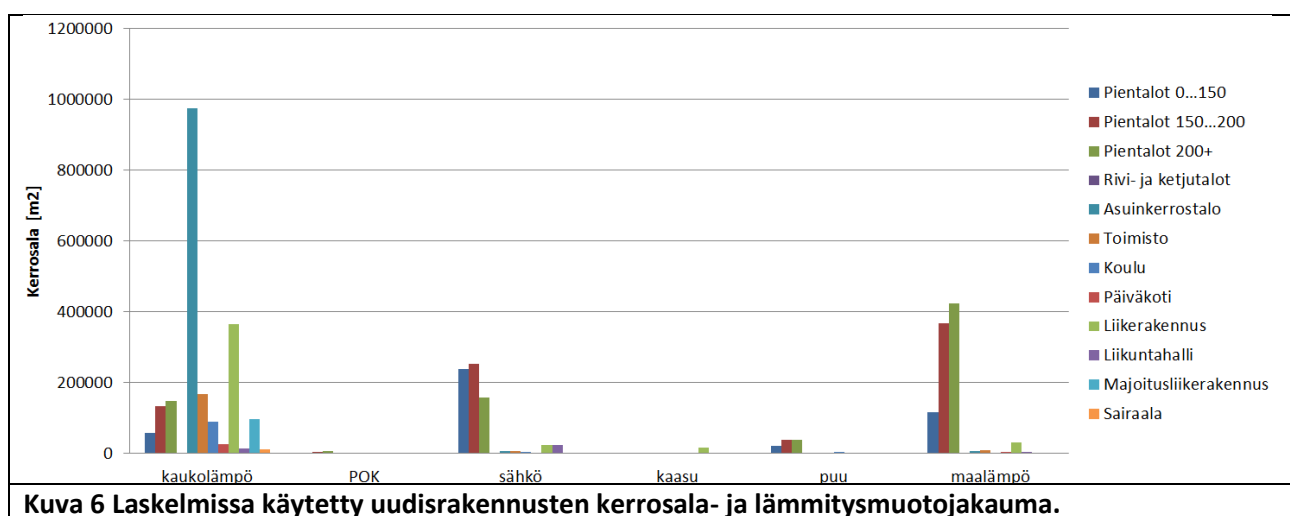
Kuva 5. Erillisten pientalojen lämmitystapavalintojen kehittyminen uudistuotannossa neljännesvuosittain. Laajennukset eivät ole mukana. Lähde: Tilastokeskus.

2.3 Kantaennuste

Kantaennusteen tuottamiseen käytettiin Väestörekisterikeskuksen ylläpitämän rakennus- ja huoneistorekisterin (RHR) tietoja. Taulukossa 1 on esitetty työssä tarkastellut uudisrakennukset ja niiden luokittelu. Tarkasteltujen uudisrakennusten kerrosala perustuu viimeisen kymmenen vuoden keskiarvoon (RHR 2004-2013). Ennusteen uudisrakennusten lämmitystapajakaumaksi oletettiin viimeisin tieto (RHR2013). Työssä pientaloja tarkasteltiin kolmessa kokoluokassa kerrosalan perusteella (0-150 m², 150-200 m², 200+ m²), ennusteessa huomioitiin pientalojen jakautuminen näihin ryhmiin viimeisimmän saatavilla olevan tiedon mukaan (RHR 2013). Kuvassa 6 on esitetty työssä käytetty kantaennuste (kerrosala, m²) lämmönlähteittäin ja rakennustyypeittäin.

RHR aineistossa on esitetty rakennuksen tärkein polttoaine tai lämmönlähde. Osassa rakennuksista päälämmönlähde on rekisteritietojen mukaan ”muu”, mikä tarkoittaa, että rakennuksella ei ole yhtä selkeää lämmönlähdettä. Rakennukset voivat käyttää lämmitykseen ns. hybridijärjestelmiä (esim. yhdistelmä lämpöpumpuista, puu- ja/tai aurinkoenergiajärjestelmistä), jotka ovat hankalasti yleistettävissä. Koska tällaisten rakennusten lämmitysjärjestelmän seikkaperäiset tiedot eivät ole selvillä, on todellisen ostoenergian kulutuksen arviointi vaikeaa. Tässä työssä tällaiset uudisrakennukset käsiteltiin siten, että niiden kerrosalat jaettiin muiden tunnettujen lämmönlähteiden suhteessa kyseisiin ryhmiin. Tämä laskennallinen käsittely koski seuraavia rakennusryhmiä: pientalot, päiväkodit, liikuntahalli, majoitusliikerakennukset. Tarkastellusta kerrosalasta tällaisia tapauksia oli n. 2 %.

Tässä tarkastelussa ei oletettu tulevaisuudessa tapahtuvan muutoksia lämmitystapajakaumassa. FinZEB-hankkeen laskelmien mukaan muissa kuin asuinrakennuksissa määräysmuutos ei näyttäisi vaikuttavan lämmitysvalintoihin. Muutokset näissä rakennuksissa kohdistuvat pääasiassa ilmanvaihdon lämmöntalteenoton, valaistuksen sekä ilmanvaihdon ja valaistuksen tarpeenmukaisen ohjauksen tehostamiseen. FinZEB-hankkeen laskelmien perusteella ehdotetut E-lukuvaatimukset ovat vaikeimmin saavutettavissa isoissa (nettoalaltaan yli 140 m² kokoisissa) öljy- ja sähkölämmitteisissä pientaloissa. Lisäksi sähkölämmitteisissä kerrostaloissa uuden E-lukurajan saavuttaminen on haastavaa. Toisaalta maalämpötalot pääsevät ehdotettuihin rajoihin helposti. Tämän perusteella on mahdollista, että tulevaisuudessa pientaloissa öljy- ja sähkölämmityksen osuus vähenee verrattuna nykytasoon, ja niitä korvataan todennäköisesti erilaisilla lämpöpumppu- ja hybridiratkaisuilla. E-luvun laskennassa puun käyttö on kannattavaa, mikä saattaa lisätä takkojen ja kattiloiden käyttöä tulevaisuudessa.



Kuva 6 Laskelmissa käytetty uudisrakennusten kerrosala- ja lämmitysmuotojakauma.

Taulukko 1. Työssä tarkastellut uudisrakennukset ja luokittelu. Käyttötarkoitukset kuten Tilastokeskuksen rakennusluokituksessa (Tilastokeskus, 1994).

Käyttötarkoitus	Käyttötarkoitus koodi	E-lukuehdotusten mukainen luokka
Yhden asunnon talot	011	Pientalo
Kahden asunnon talot	012	Pientalo
Muut erilliset pientalot	013	Pientalo
Rivitalot	021	Rivi- ja ketjutalo
Ketjutalot	022	Rivi- ja ketjutalo
Luhtitalot	032	Asuinkerrostalo
Muut asuinkerrostalot	039	Asuinkerrostalo
Myymlähallit	111	Liikerakennus
Liike- ja tavaratalot, kauppakeskukset	112	Liikerakennus
Muut myymälärakennukset	119	Liikerakennus
Hotellit yms.	121	Majoitusliikerakennus
Loma-, lepo- ja virkistyskodit	123	Pientalo
Vuokrattavat lomamökit ja -osakkeet	124	Pientalo
Muut majoitusliikerakennukset	129	Pientalo
Asuntolat yms.	131	Majoitusliikerakennus
Muut asuntolarakennukset	139	Majoitusliikerakennus
Toimistorakennukset	151	Toimisto
Keskussairaalat	211	Sairaala
Muut sairaalat	213	Sairaala
Terveyskeskukset	214	Toimisto
Muut terveydenhuoltorakennukset	219	Toimisto
Vanhainkodit	221	Majoitusliikerakennus
Lasten- ja koulukodit	222	Majoitusliikerakennus
Kehitysvammaisten hoitolaitokset	223	Majoitusliikerakennus
Lasten päiväkodit	231	Päiväkoti
Teatterit, ooppera- , konsertti- ja kongressitalot	311	Liikerakennus
Elokuvateatterit	312	Liikerakennus
Kirjastot ja arkistot	322	Liikerakennus
Museot ja taidegalleriat	323	Liikerakennus
Näyttelyhallit	324	Liikerakennus
Tennis- squash- ja sulkapallohallit	353	Liikuntahalli
Monitoimihallit ja muut urheiluhallit	354	Liikuntahalli
Muut urheilu- ja kuntoilurakennukset	359	Liikuntahalli
Yleissivistävien oppilaitosten rakennukset	511	Koulu
Ammatillisten oppilaitosten rakennukset	521	Koulu
Korkeakoulurakennukset	531	Koulu
Tutkimuslaitosrakennukset	532	Koulu

3. Nykylainsäädäntö

Nykylainsäädännöllä tarkoitetaan tässä rakennusmääräyksiä, jotka tulivat voimaan vuonna 2012. Rakennusmääräyskokoelman osa D3 käsittelee rakennusten energiatehokkuutta, jota täydentää osa D5, joka käsittää ohjeita rakennusten energiankulutuksen laskennasta. Tuolloin siirryttiin kokonaisenergiatarkasteluun, jossa rakennuksen kokonaisenergiankulutukselle määrätään rakennustyyppiin kohdainen yläraja, joka ilmaistaan ns. E-luvulla ($\text{kWh/netto-m}^2,\text{a}$). Kokonaisenergiankulutuksessa huomioidaan lämmityksen lisäksi mm. ilmanvaihto, lämmin käyttövesi, valaistus ja laitesähkö (ks. tarkemmin D3 Ympäristöministeriö, 2012). E-luvun laskennassa huomioidaan rakennuksen käyttämän energian tuotantomuoto nk. energiamuotokertoimien avulla (Taulukko 2). E-luku on siis energiamuotojen kertoimilla painotettu rakennuksen vuotuinen ostoenergiankulutus, josta on vähennetty uusiutuvasta omavaraisenergiasta tuotettu energia (esim. aurinkolämpö, -sähkö).

Nykylainsäädännön mukaan E-luvun laskennassa huomioidaan vähennykset uusiutuvasta omavaraisenergiasta. Tällä tarkoitetaan kiinteistöön kuuluvalla laitteistolla paikallisista energialähteistä tuotettua uusiutuvaa energiaa, lukuun ottamatta uusiutuvia polttoaineita. Käytännössä näihin lukeutuvat esimerkiksi aurinkosähkö ja -lämpö.

Taulukko 2. Energiamuotojen kertoimet (Ympäristöministeriö, 2012)

Sähkö	1,7
Kaukolämpö	0,7
Kaukojäähdytys	0,4
Fossiiliset polttoaineet	1,0
Rakennuksessa käytettävät uusiutuvat polttoaineet	0,5

4. Ehdotetut uudet E-lukutasot

Kansallisen FinZEB-hankkeen laskentatarkastelujen perusteella tehtiin ehdotukset uusista E-lukutasoista. Rakennusten lähes nollaenergia –direktiivin mukaan lähes nollaenergiataojen määrittämisessä noudatetaan kustannusoptimaalisuuden periaatetta, joka huomioitiin FinZEB-hankkeen laskelmissa esimerkkirakennuksissa ja standardikäytön mukaisilla käytön ja kuormituksen arvoilla. Tässä työssä tarkasteltiin hankkeen ehdotusten vaikutuksia. Tarkastellut E-lukutasot on koottu taulukkoon 3.

Taulukko 3. Uudisrakennusten E-lukurajat nykytasossa ja FinZEB-hankkeessa ehdotetut.

Rakennustyyppi	Nykyvaatimustaso E-luvuille (D3/2012) [$\text{kWh/m}^2,\text{a}$]	FinZEB-hankkeen ehdotus (tässä työssä tarkasteltavat) [$\text{kWh/m}^2,\text{a}$]	Muutos nykytasosta [%]
Pientalot	160...204	120...204	-
Asuinkerrostalo	130	116	-11
Toimisto	170	90	-47
Koulu	170	104	-39
Päiväkoti	170	107	-37
Liikerakennus	240	143	-40
Liikuntahalli	170	115	-32
Majoitusliikerakennus	240	182	-24
Sairaala	450	418	-7

5. Uusien E-lukuvaatimusten vaikutustarkastelu

FInZEB -hankkeessa ehdotetut E-lukuvaatimukset alentavat uudisrakennusten energiantarvetta, aiheuttaen muutoksia sähkön- ja lämmöntuotannossa käytettyihin primäärienergiämääriin ja sitä kautta energiantuotannon ilmapäästöihin. Kasvihuonekaasupäästöistä tarkasteltiin hiilidioksidia (CO₂) sekä ilmansaasteista rikkidioksidia (SO₂), typenoksideja (NO_x) ja hiukkasia (PM).

Hiilidioksidi vastaa yli 99 %:a energiantuotantosektorin ilmastovaikutuksesta. Epätäydellisen palamisen seurauksena syntyy lisäksi pieniä määriä metaania ja leijupetikattiloissa myös typpioksiduulia.

5.1 Laskuissa käytetyt kertoimet ja oletukset

Vaikutusarviointia varten laskettiin sähkön- ja lämmöntuotannolle primäärienergiakertoimet sekä tuotannon keskimääräiset päästökertoimet eri päästökomponenteille. Tämä tehtiin erikseen vuosille 2020 ja 2030, koska energiantuotantosektorilla odotetaan tapahtuvan merkittäviä rakennemuutoksia, jotka vaikuttavat kertoimiin. Laskut perustuvat kansallisen Energiastrategian päivityksen tarkennettuun perusskenaarioon (TEM 2013) ja siinä oletettuihin primäärienergiankäyttöihin kaukolämpösektorin ja erillisen sähköntuotannon osalta.

Taulukossa 4 on esitetty oletuksia, joiden avulla kertoimet on laskettu Energiastrategian primäärienergialuvuista. Yhteistuotannon osalta päästöt sähkölle ja kaukolämmölle on jaettu hyödynjakomenetelmällä. Energiantuotantosektorin käsittelyssä ei ole huomioitu teollisuuden energiantuotantoa. Erillisestä sähköntuotannosta (lauhde-/ydin-/aurinko- ja tuulivoima) on oletettu tietty osuus teollisuudelle ja loput julkiseen käyttöön. Tämä oletus perustuu Energiastrategian sektorikohtaisiin sähkön hankinta- ja käyttölukuihin vuosina 2020 ja 2030.

Taulukko 4. Primäärienergia- ja päästökertoimien laskemisessa käytetyt parametrit.

Yhteistuotannon hyötysuhde	0,85
Erillisen lämmöntuotannon hyötysuhde	0,9
Lauhdetuotannon hyötysuhde	0,4
Rakennusaste	0,55 (Energiatilasto 2013)
Ydinvoiman primäärienergiahyötysuhde	0,33
Tuuli- ja aurinkovoiman primäärienergiahyötysuhde	1
Siirtohäviö sähkölle	3 % (Vehviläinen ym. 2010)
Siirtohäviö lämmölle	10 % (Vehviläinen ym. 2010)
Erillisestä sähköntuotannosta muuhun kuin teollisuudelle	45 % (TEM 2013)
Vastapaine- ja lauhdevoimalaitosten osuus muuhun kuin teollisuudelle tuotetusta sähköstä	44 % vuonna 2020 25 % vuonna 2030
Keskuslämmityskattilan hyötysuhde	0,9
Varaavan takan hyötysuhde	0,85

Primäärienergiakertoimien (taulukko 5) avulla rakennusten ostama lämmitysenergia ja sähkö voidaan muuttaa kaukolämmön ja sähkön tuotannossa käytetyiksi primäärienergioiksi. Energiastrategian mukaiset kaukolämpösektorin ja lauhdesähkön tuotannon polttoainemäärät vuosille 2020 ja 2030 on jyvitetty SYKEN FRES-mallin (Karvosenoja 2008) kattilatietokantaan, jossa kullekin kattilalle on määritetty primäärienergian käytön päästökertoimet rikkidioksidille, typenoksideille ja hiukkasille. Päästökertoimien määrittämisessä on otettu huomioon teollisuuspäästödirektiivin vaatimukset. Tietokannan avulla, ja ottaen huomioon muiden sähköntuotantomuotojen osuus, on laskettu ilmansaasteiden keskimääräiset päästökertoimet sähkön ja kaukolämmön tuotannolle (taulukko 6). Polttoainekohtaiset päästökertoimet, joita käytetään kiinteistökokoluokan pienkattiloille, ovat myös FRES-mallista. Ne perustuvat kirjallisuuteen tai tietoihin polttoaineen lämpöarvosta ja vaaditusta rikkipitoisuudesta.

Taulukko 5. Primäärienergiakertoimet sähkölle ja kaukolämmölle (hyödynjakomenetelmä).

	2020	2030
Sähkö	2.2	2.3
Kaukolämpö	0.9	0.9

Sähkön primäärienergiakertoimen nousu vuoteen 2030 johtuu ydinvoiman osuuden kasvamisesta. Toisaalta ydinvoima ei aiheuta suoria ilmansaastepäästöjä, jolloin sen lisääntyminen kuitenkin alentaa päästökertoimia.

Taulukko 6. Päästökertoimet ilmansaasteille [mg/kWh].

	CO ₂ [g/kWh]	SO ₂ [mg/kWh]	No _x [mg/kWh]	PM [mg/kWh]
Sähkö (2020)	212	151	302	14
Sähkö (2030)	66	36	137	6
Kaukolämpö (2020)	178	115	252	12
Kaukolämpö (2030)	145	47	176	8
puukattila (pelletti)	0	0	436	76
Puutakka	0	0	266	187
Kaasu	198	0	252	1
kevyt polttoöljy	263	83	252	11

Polttoaineiden hiilidioksidipäästökertoimet (taulukko 7) ovat Tilastokeskuksen ilmoittamat oletuspäästökertoimet (polttoaineluokitus, Tilastokeskus, 2014). Sähkön ja kaukolämmön päästökerrointen laskemiseen on lisäksi käytetty tässä luvussa esitettyjä oletuksia. Elinkaaripäästöjä ei ole sisällytetty laskelmiin, ja puupohjaisten polttoaineiden päästökertoimeksi on oletettu 0. Sähkölle ja kaukolämmölle on käytetty keskimääräistä päästökerrointa.

Sähkön päästökertoimen kannalta merkittäviä tekijöitä ovat lauhdetuotannon ja ydinvoiman määrä sekä biopolttoaineiden osuus kaukolämpösektorilla. Energiastrategiassa on oletettu sähkön nettotuonnin korvaantuvan kotimaisella tuotannolla vuonna 2020, jolloin päästökerroin pysyy lähellä nykyistä tasoa, huolimatta kasvavasta ydinvoiman ja biopolttoaineiden määrästä. Vuoteen 2030 ydinvoiman määrä ja biopolttoaineiden osuus kasvavat entisestään, ja lauhdesähkön tuotannoksi on oletettu 0, jolloin päästökerroin putoaa huomattavasti. Kaukolämmön osalta muutos johtuu vain biopolttoaineiden osuuden kasvusta, jolloin päästökerroin laskee vähemmän.

Taulukko 7. Päästökertoimet hiilidioksidille [g/kWh] (hyödynjakomenetelmä).

	CO ₂ päästökerroin
Sähkö (2020)	212
Sähkö (2030)	66
Kaukolämpö (2020)	178
Kaukolämpö (2030)	145
puukattila (pelletti)	0
Puutakka	0
Kaasu	198
kevyt polttoöljy	263

Tarkasteltaessa päästövaikutuksia vähennettyä energiayksikkö kohti käytetään tyypillisesti sähköntuotannon marginaalipäästökertoimia. Eri tuotantomuotojen ominaispäästökertoimet vaihtelevat suuresti, jolloin olisi oleellista tietää, millä tekniikalla tuotettua sähköä säästöt energiankäytössä vähentävät. Käytännössä tämän arvioiminen on hyvin hankalaa, johtuen mm. kansainvälisistä sähkömarkkinoista. VTT on arvioinut vuoden 2020 marginaalipäästökertoimeksi 100-300 gCO₂/kWh

(Lindroos ym. 2012), johon haarukkaan tässä selvityksessä käytetty keskimääräinen päästökerroin (212) osuu hyvin. Tämän pidemmälle tulevaisuuteen kirjallisuudesta ei löydy käyttökelpoisia marginaalipäästökertoimia. Epävarmuuksista huolimatta tässä luvussa esitetyt tulokset antavat kuvan päästövaikutusten suuruusluokasta.

5.2 Uusien E-lukuvaatimusten vaikutus energiankäyttöön

5.2.1 Muutokset rakennusten lämmitysenergian tarpeessa

E-lukujen tiukentumisen vaikutukset energiankulutukseen arvioitiin tarkastelemalla rakennustyyppiä lämmönlähteittäin. Lähtötietoina käytettiin FInZEB-hankkeessa energiamallinnuksia tehneiltä konsulttiyrityksiltä (Granlund Consulting Oy ja Insinööritoimisto Vesitaito) saatuja aineistoja. Pientalojen laskelmat perustuivat Vesitaito Oy:n mallintamiin ostoenergioihin, muiden rakennusten osalta tukeuduttiin Granlund Oy:n laskelmiin.

Nykylainsäädäntöä kuvattiin FInZEB-hankkeen perustapausten avulla. Pientalojen kohdalla mahdollisia lämmönlähteitä on useampia kuin muissa rakennustyypeissä. Harvinaisempien lämmönlähteiden (esim. kaasu) ostoenergiankulutukset estimoitiin käyttämällä saatuja ostoenergialukuja ja lämmityskattiloille oletettuja hyötysuhteita. Pientalojen E-lukuraja on riippuvainen lämmitetyn nettoalan suuruudesta, joten pientaloja tarkasteltiin kolmessa ryhmässä kerrosalan mukaan. Liitteessä 1 on esitetty kaikki tässä työssä käytetyt ostoenergiat (kWh/m²) rakennustyypeittäin ja lämmönlähteittäin.

FInZEB-hankkeen ehdotuksissa muiden kuin pientalojen E-lukuraja asetettiin kaukolämpötilon toimenpidepakettien keskiarvon mukaan. Näin ollen uuden lainsäädännön tarkastelussa kaukolämpörakennusten ostoenergiankulutus mallitettiin FInZEB-toimenpidepakettien mukaisesti. Muiden lämmönlähteiden osalta tarkistettiin ensin riittääkö perustapaus uuden E-lukurajan alittamiseen, kuten maalämmitteissä rakennuksissa usein on. Jos näin ei ollut, sähkön ja lämmön ostoenergian kulutus asetettiin siten, että uuteen E-lukurajaan juuri ja juuri päästiin. Laskelmassa oletettiin, että lämmön ja sähkön ostoenergiankulutus vähenee samassa suhteessa kuin alun perin FInZEB-hankkeessa mallinnetuissa toimenpidepakettien keskiarvossa. Tätä suhdetta käyttämällä asetettiin ostoenergiankulutus, joka toteuttaa uuden lainsäädännön ja alemman E-lukurajan.

Taulukossa 8 on esitetty vuosittainen energiantarpeen vähenemä uudisrakennuskannassa, kun uudet E-lukuvaatimukset tulevat voimaan. Talokohtaiset luvut on esitetty liitteessä 1.

Taulukko 8. Vuosittainen energiantarpeen vähenemä uudisrakennuskannassa.

	GWh/a
Sähkö	45
Kaukolämpö	37
Pelletit	0,2
Kaasu	1,1
Kevyt polttoöljy	0,2

4.2.2 Muutokset primäärienergian kulutuksessa

Kiinteistökohtaisten pienkattiloiden osalta ostoenergia vastaa suoraan polttoaineiden primäärienergiaa. Sähkön ja kaukolämmön osalta primäärienergian muutokset tulevat voimalaitoksissa käytetyn polttoaineen kautta. Energiastrategian mukaisessa tuotantojärjestelmässä keskimääräiset vaikutukset primäärienergiaan voidaan karkeasti arvioida kaukolämpösektorin ja lauhdevoiman polttoainemäärien kautta, sekä huomioimalla muiden sähköntuotantomuotojen osuus. Taulukossa 9 on esitetty karkeasti vaikutus primäärienergiankäytössä yhtä yksikköä ostettua sähköä tai kaukolämpöä kohti.

Taulukko 9. Polttoainekohtaiset primäärienergiakertoimet [$\text{GWh}_{\text{polttoaine}}/\text{GWh}_{\text{ostoenergia}}$] (hyödynjakomenetelmä).

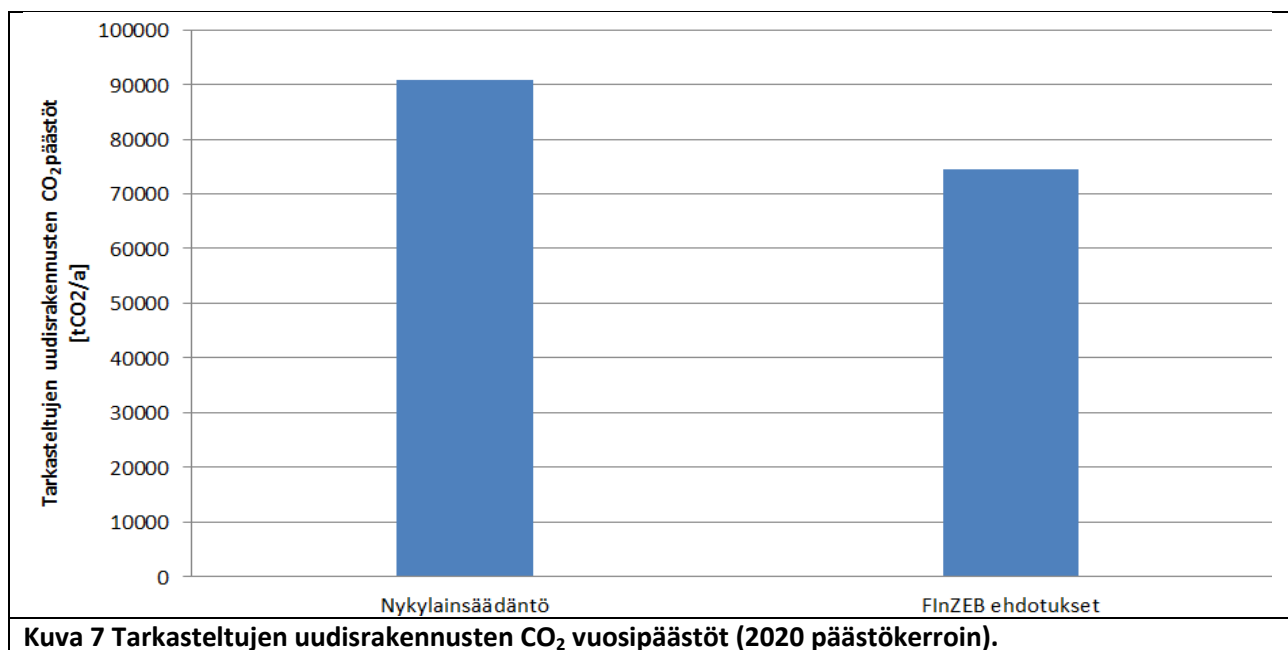
	Biomassa	Kaasu	Kivihiili	Turve	POR	Jäte
Sähkö, 2020	0.23	0.22	0.41	0.11	0	0.05
Sähkö, 2030	0.24	0.18	0.04	0.06	0	0.05
Kaukolämpö, 2020	0.31	0.32	0.17	0.11	0.03	0.07
Kaukolämpö, 2030	0.41	0.31	0.06	0.11	0.03	0.08

5.3 Vuosittaiset päästövähennemät uudella lainsäädännöllä

Tässä luvussa on esitetty FinZEB -raportin mukaisten E-lukuvaatimusten vaikutuksia uudisrakennusten päästöihin vuoden 2020 päästökertoimilla.

Vähennemät hiilidioksidipäästöissä

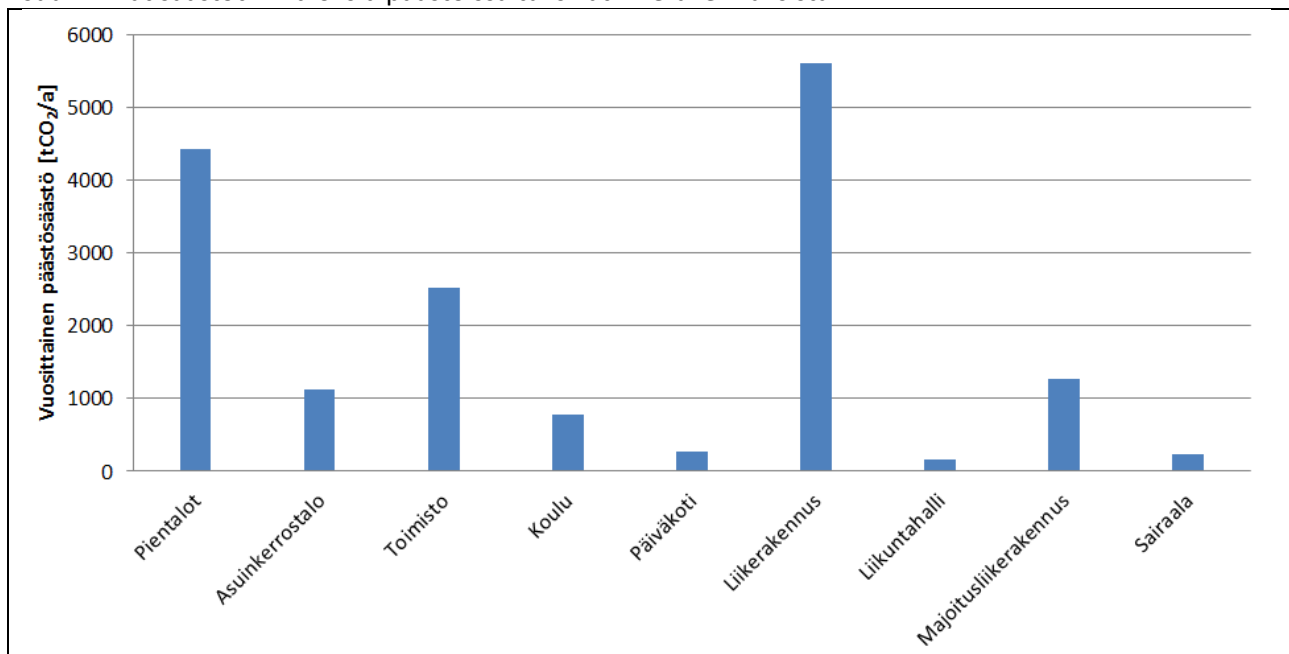
Päästökertoimet vaikuttavat merkittävästi absoluuttisiin päästömääriin, mutta uuden lainsäädännön tuomat suhteelliset päästövähennykset ovat niistä riippumattomia. Kuvassa 7 on esitetty vuosittain valmistuvien uudisrakennusten yhteenlasketut hiilidioksidipäästöt nykyisellä lainsäädännöllä ja ehdotetuilla uusilla E-lukurajoilla. Ehdotusten mukainen uusi lainsäädäntö vähentäisi vuosittaisia päästöjä noin 18%, joka olisi n. 16 kt/a vuoden 2020 päästökertoimilla.



Vuosittaiset päästösäästöt on jaettu rakennusluokkiin kuvassa 8. Pientalot ovat vuosittaisella energiantarpeella mitattuna uudisrakennusten merkittävin rakennustyyppi, vastaten noin 47 %:a lämmitysenergian ja sähkön käytöstä. Pientaloissa lämmitysmuoto vaihtelee muita rakennustyyppisiä enemmän, ja E-lukuvaatimusten kiristämisen vaikutus lämmitysmuodosta riippuen. Maalämpöä hyödyntävät rakennukset pääsevät jo nyt ehdotettuun rajaan, kun taas sähkölämmitteisille taloille saatetaan tarvita merkittäviä energiatehokkuuden parannuksia.

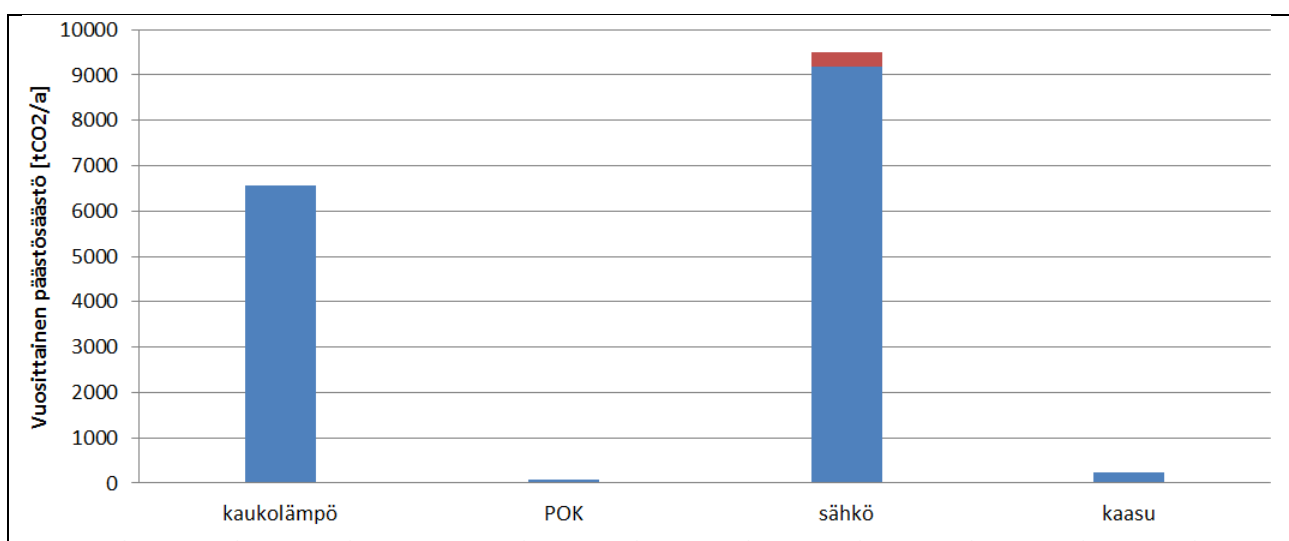
Toiseksi suurin ryhmä on asuinkerrostalot, joiden osuus uudisrakennusten energiantarpeesta on 28 %. Valtaosa uusista kerrostaloista käyttää kaukolämpöä, jolloin ne pääsevät jo nykyisellään lähelle ehdotettua E-lukurajaa. Tästä johtuen kerrostaloista syntyvät päästösäästöt ovat rakennusten määrään

nähdn maltilliset. Lopuista rakennustyypeistä energiaa käyttävät eniten liikerakennukset (12 %) ja toimistot (5 %). Niille on ehdotettu selvästi muita suurempia muutoksia energiatehokkuusvaatimuksiin (Taulukko 3), joka näkyy myös alenevissa päästömäärissä. FinZEB –raportin mukaisilla ehdotuksilla suurimmat säästöt hiilidioksidipäästöissä tulisivat liikerakennuksista.



Kuva 8 Vuosittainen päästösäästö rakennustyypeittäin (v. 2020 päästökertoimet).

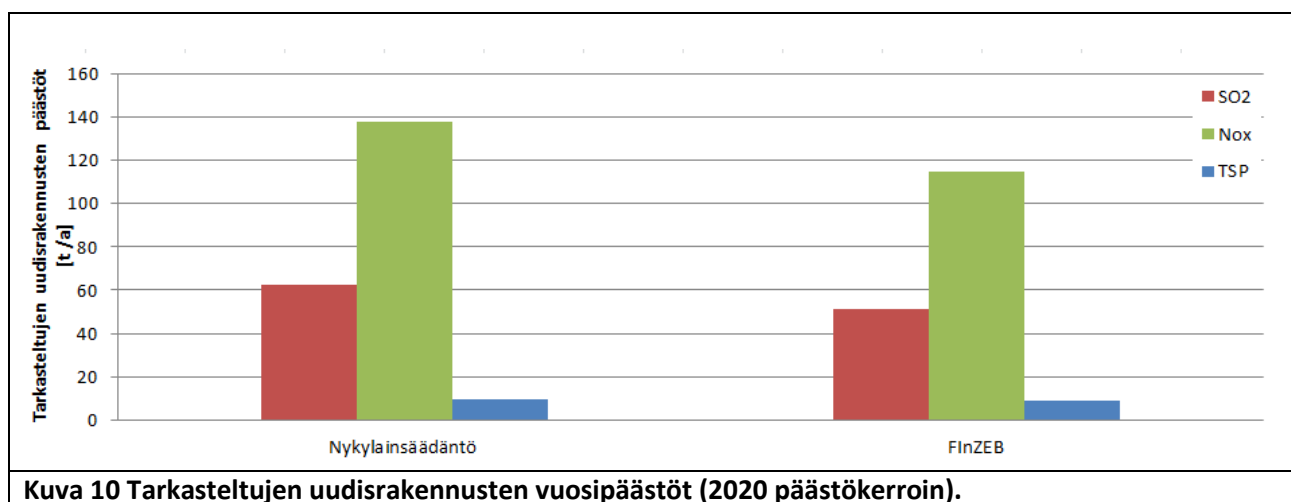
Kuvassa 9 vuosittaiset päästösäästöt on jaettu ostoenergiälähteittäin. Sähkön kohdalla on huomioitu lämmityksen lisäksi rakennusten muu sähkön käyttö. E-luvun laskennassa sähköllä on muita energiamuotoja suurempi kerroin, jolloin tiukentuvilla vaatimuksilla on oletettavasti suuri merkitys sähkön käytön tehokkuuteen. Vähennykset hiilidioksidipäästöissä johtuvat pääosin muutoksista sähkön ja kaukolämmön kulutuksessa. Niiden keskinäiseen suhteeseen vaikuttaa talojen energiatehokkuustoimenpiteiden oletusten lisäksi laskentamenetelmä, jolla yhteistuotannon päästöjä jaetaan. Hyödynjakomenetelmä antaa sähköntuotannolle kaukolämpöä suuremman primäärienergi- ja päästökertoimen.



Kuva 9 Vuosittainen CO₂ päästösäästö polttoaineittain (v. 2020 päästökertoimet), punaisella maalämpörakennusten sähkökäytössä tapahtuva säästö.

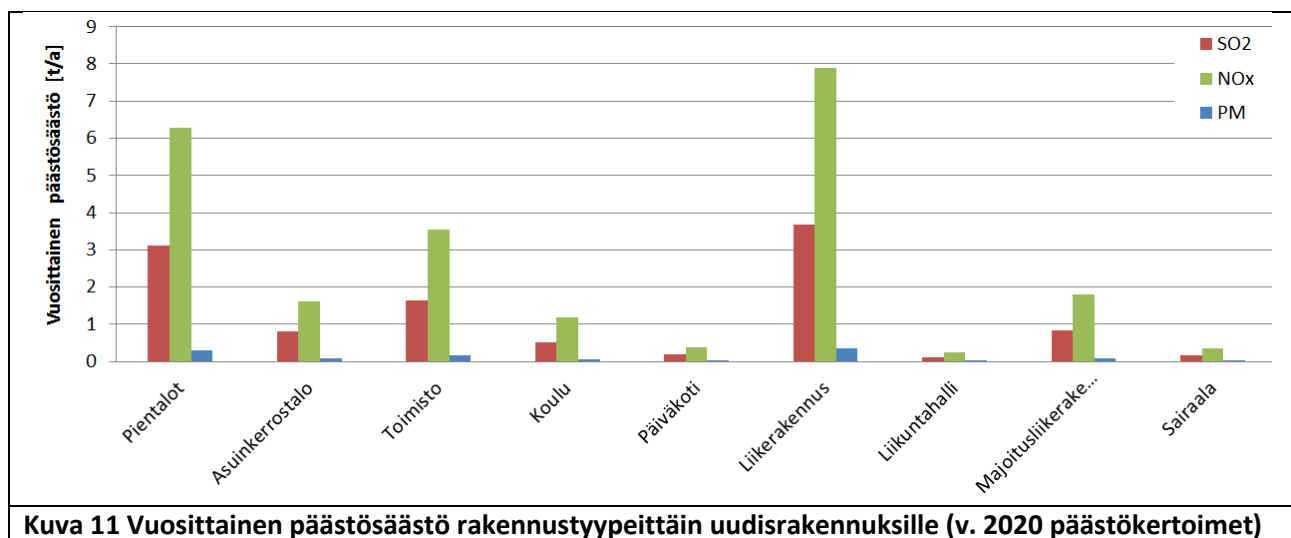
Vähennemät ilmansaastepäästöissä

Voimalaitokset ovat merkittävä rikkidioksidin, typenoksidien ja hiukkasten päästölähde. Typenoksidipäästöjä syntyy lisäksi kiinteistökokuuokan kaasu-, puu- ja öljykattiloissa. Hiukkaspäästöjen osalta huomionarvoisessa roolissa ovat myös puutakat ja –kattilat. Tässä selvityksessä takkojen käyttöön ei oletettu muutoksia uusien E-lukuvaatimusten myötä, joten niistä ei tule päästösäästöjä. Kuvassa 10 on esitetty vuosittain valmistuvien uudisrakennusten yhteenlasketut ilmansaastepäästöt nykyisellä lainsäädännöllä ja ehdotetuilla uusilla E-lukurajoilla. Suhteellinen päästövähennys olisi 16-18 %, riippuen päästökomponentista.

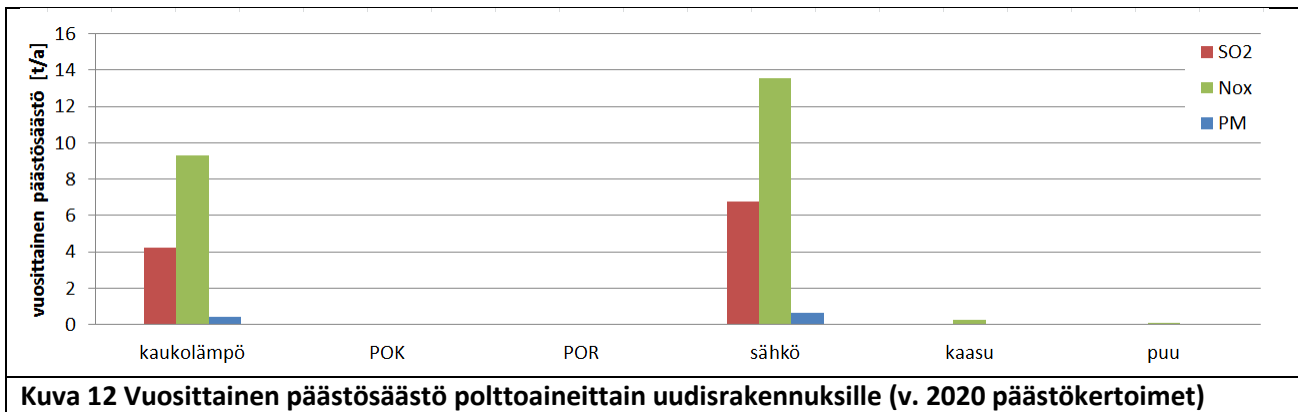


Kuva 10 Tarkasteltujen uudisrakennusten vuosipäästöt (2020 päästökerroin).

Kuvissa 11-12 on esitetty päästösäästöt jaettuna rakennusluokkiin ja ostoenergiälähteisiin. Kuten hiilidioksidipäästöjen kohdalla, myös ilmansaasteissa pientalot ovat merkittävä ryhmä suuren lukumääränsä vuoksi, ja liike- ja toimistorakennukset huomattavasti tiukentuvien E-lukuvaatimusten vuoksi. Sähkön ja kaukolämmön kulutuksen vähentyminen alentavat ilmansaastepäästöjä eniten.



Kuva 11 Vuosittainen päästösäästö rakennustyypeittäin uudisrakennuksille (v. 2020 päästökertoimet)



Kuva 12 Vuosittainen päästösäästö polttoaineittain uudisrakennuksille (v. 2020 päästökertoimet)

5.4 Ympäristövaikutukset

Tässä luvussa on tarkasteltu ympäristövaikutuksia, jotka seuraavat uusien E-lukuvaatimusten tuomista päästövähennyksistä. Tarkastelu on tehty vuodelle 2030, jolloin tiukentuneiden vaatimusten mukaisia taloja on rakennettu 10 vuotta, ja johon Energiastrategian skenaariot päättyvät. Päästökertoimien määrittäminen tämän pidemmälle tulevaisuuteen sisältää väistämättä niin suuria epävarmuuksia, että päästövaikutusten laskeminen ei olisi enää tarkoituksenmukaista.

Vuonna 2030 uudisrakennuskannan (vuoden 2020 jälkeen valmistuneet, uuden E-lukuvaatimuksen täyttävät rakennukset) energiankulutus on kymmenkertainen verrattuna edellisessä luvussa tarkasteltuun tilanteeseen. Toisaalta keskimääräiset päästökertoimet ovat alemmat, jolloin vuosittainen päästösäästö ei ole suoraan verrannollinen rakennusten määrään. Taulukossa 10 on esitetty FInZEB-ehdotusten mukaisilla energiankäytön säästöillä saavutettavat päästövähennykset yhden vuoden ajalta.

Herkkyystarkastelut E-lukutasojen vaikutuksissa

Suurimmaksi epävarmuudeksi kantaennusteen osalta koettiin pientalojen määrä, joka on viime vuodet ollut laskussa. Perustarkastelun lisäksi selvitettiin mitkä olisivat ympäristövaikutukset, jos pientalojen vuosittainen rakennusmäärä jäisi viiden miljoonan kuution tasolle. Muiden rakennustyyppien määrä pidettiin alkuperäisen oletuksen mukaisena.

FInZEB-hankkeessa toimisto- ja liikerakennuksille ehdotettiin suurinta muutosta nykytasosta (-47% ja -40 %, ks. Taulukko 3), minkä vaikutus näkyy myös ympäristövaikutusten arviointituloksissa (Kuvat 8 ja 11). Tulosten herkkyyttä tarkasteltiin laskelmalla tulokset tilanteelle, jossa toimistojen ja liikerakennusten E-lukuvaatimus olisi FInZEB-ehdotusta maltillisempi. Tämä maltillisempi taso määritettiin Ympäristöministeriön teettämän selvityksen mukaan kustannusoptimaaliselle tasolla (Ympäristöministeriö, 2014). Toimistoille tämä maltillisempi E-lukuraja on 145 kWh/m²,a ja liikerakennuksille 203 kWh/m²,a. Muiden rakennustyyppien osalta säilytettiin alkuperäinen, FInZEB-ehdotusten mukainen taso.

Päästövähennykset (Taulukko 10) ovat koko maan mittakaavassa alhaiset (n. promille Suomen kokonaispäästöistä), sillä tarkastelun uudisrakennukset kattavat rakennuskannasta vasta pienen osan vuonna 2030. Kuitenkin koko rakennuskannan osuus nykyisestä energian loppukäytöstä Suomessa on noin 40 % (Vehviläinen ym. 2010), joten pidemmällä aikavälillä muutokset rakennuskannan energiatehokkuudessa ovat merkittävässä roolissa päästöjen vähentämisessä.

Taulukko 10. Vuosittainen päästösäästö (ero nykyainsäädännön ja FInZEB ehdotusten välillä) v. 2030.

Päästökomponentti	Perustarkastelu	Herkkyystarkastelu 1: (Lievemät toimistojen ja liikerakennusten E- lukutasot)	Herkkyystarkastelu 2 (pientalojen kerrosalan modifiointi)
CO ₂	86 kt	49 kt	83 kt
SO ₂	34 t	20 t	32 t
NO _x	130 t	79 t	125 t
PM	6 t	3 t	5 t

Kuten kuvista 8 ja 11 nähdään, liikerakennusten ja toimistojen energiatehokkuustoimet tuovat suurimman osan päästösäästöistä. Jos vaatimuksia E-lukurajan suhteen lievennettäisiin, olisivat koko lainsäädännön päästövaikutukset päästökomponentista riippuen 40-50 % alhaisemmat. Pientalojen suhteen herkkyystarkastelussa asetettu matalin arvio rakennusmäärille ei eroa kantaennusteen lähtöoletuksesta niin merkittävästi, että se vaikuttaisi oleellisesti päästömääriin.

Vaikutukset ilmastoon

Keskimääräisen suomalaisen hiilidioksidipäästöt vuonna 2013 olivat 9,8 t/a (Seppälä ym. 2009), josta asumisen osuus oli 3,5 t/a. Taulukon 10 perustarkastelun mukaiset päästövähennykset vastaisivat nykytilanteessa siis noin 25 000 ihmisen asumisen päästöjä. Jos asumisen hiilidioksidipäästöjen oletetaan tulevaisuudessa laskevan luvussa 5 esitettyjen sähkön ja kaukolämmön päästökertoimien mukaisesti, vastaisi CO₂-vähennys noin 65 000 ihmisen asumisen päästöjä vuonna 2030.

Uudisrakennuksia koskevalla lainsäädännöllä on merkittävää potentiaalia hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä. Suomalaisten kulutuksesta aiheutuvien päästöjen vähennysmahdollisuuksia tutkivassa KUILU-hankkeessa (Nissinen ym. 2012) arvioitiin mm. liikenteen ja ruokailun ohjauskeinojen vaikutuksia. Liikenteen ja ruoankulutuksen ohjauskeinojen päästövähennyspotentiaaliksi arvioitiin 1,7 Mt CO₂-ekv ja 126 kt CO₂-ekv vuosien 2011-2020 aikana. Taulukon 10 päästösäästöt ovat samaa suuruusluokkaa kuin liikenteen säästöpotentiaali, ja selvästi suuremmat kuin ruoankulutuksen, jos näitä tarkastellaan vuositasolla.

Vaikutukset ihmisten terveyteen

Pienhiukkaspäästöt ovat suurin ihmisten terveyteen vaikuttava ympäristöhaitta Suomessa, aiheuttaen arviolta 1 800 ennen aikaista kuolemantapausta vuodessa (Hänninen ym. 2010). Suurin osa hengitysilman taustapitoisuudesta on seurausta kaukokulkeumasta. Kuitenkin erityisesti taajama-alueilla lähilähteet, kuten puun pienpoltto ja liikenne ovat merkittävässä roolissa. Puun pienpoltto on kotimaisista hiukkaslähteistä isoin yksittäinen sektori.

Tarkastelussa oletettiin, että E-lukumuutokset eivät vaikuta takkojen käyttöön, ja myös vaikutukset pellettikattiloihin olivat vähäisiä. Tällöin muutokset hiukkaspäästöissä syntyvät pääasiassa sähkön ja kaukolämmön tuotannon kautta. Tehokkaasta poltosta ja suodattimista johtuen voimalaitosten päästökertoimet ovat jo nyt alhaisia, ja ne laskevat vielä tulevaisuudessa. Koko Suomen arvioidut primäärihiukkaspäästöt vuonna 2030 ovat luokkaa 35 kt/a (Suoheimo ym. 2015). FInZEB – vaatimustasojen tuomat päästövähennykset hiukkasille ovat alhaiset, eikä niillä ole oleellisia vaikutuksia hengitysilman hiukkaspitoisuuksiin.

Työssä ei mallinnettu mahdollisia muutoksia lämmitystapavalintoihin. Biomassalla on kuitenkin alhainen kerroin E-luvun laskennassa, jolloin sen suosio voi kasvaa vaatimusten tiukentuessa. Jos rakennusmääräykset johtavat pienpolton lisäämiseen lämmityskäytössä, voi tämä johtaa merkittäviin

terveyshaittojen kasvuun energian tarpeen alenemisesta huolimatta (esim. Fuller ym. 2013, Ekholm ym. 2014). Lisäksi pienpoltto on Suomen suurin mustahiilen lähde, jolloin sen lisääminen voi myös vaikuttaa ilmaston lämpenemiseen (Savolahti ym. 2015).

Vaikutukset ekosysteemeihin

Rikkidioksidi- ja typenoksidipäästöjen happamoittavaa ja rehevöittävää vaikutusta ekosysteemeihin seurataan ns. kriittisen kuormituksen tasojen avulla. Taulukon 10 mukaiset SO₂- ja NO_x-vähennykset vastaavat noin promillea Suomen arvioiduista kokonaispäästöistä vuonna 2030 (Suoheimo ym. 2015). Lisäksi valtaosa Suomeen tulevasta laskeumasta on seurausta kaukokulkeumasta, jolloin arvioidut päästövähennykset eivät oleellisesti vaikuta kriittisten tasojen ylityksiin.

Huomioita tulevaisuuden päästöistä ja ympäristövaikutuksista

Tämän luvun tarkastelussa on huomioitu vain poltosta syntyvät suorat päästöt. Niiden lisäksi energiantuotannossa syntyy päästöjä myös polttoaineiden hankinnasta ja kuljetuksesta, sekä voimaloiden rakentamisesta ja purkamisesta. Fossiilisilla polttoaineilla tuotantoketjun CO₂-päästöt ovat tyypillisesti noin 10-15 % poltossa syntyvistä päästöistä (Ecoinvent, 2015). Ydinvoiman sekä tuuli- vesi- ja aurinkovoiman tuotannosta syntyy myös päästöjä. Niiden tuotantoketjun aiheuttamat CO₂-päästöt riippuvat useista tekijöistä, ollen karkeasti luokkaa 1-10 % kivihiilen päästöistä (Leskinen ym. 2014). Myös biomassan poltosta vapautuu ilmakehään hiilidioksidia, ja vaikka se on uusiutuvaa energiaa, biomassan käyttö vähentää maaperään sitoutuvan hiilen määrää. Täysin päästöttömiä tuotantomuotoja ei siis ole tällä hetkellä olemassa, vaikkakin siirtyminen pois polttoaineiden poltosta pudottaa kasvihuonekaasu- ja ilmansaastepäästöt usein murto-osaan.

Kansallisessa energiastrategiassa ns. päästöttömien tuotantomuotojen osuus kasvaa merkittävästi vuoteen 2030 mennessä. EU:n ilmastostrategian tavoitteena on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 80 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2050, mikä edellyttää näiden tuotantomuotojen osuuden kasvattamista entisestään. Tämän tavoitteen toteutustavasta ei ole kansallisella tasolla tehty päätöksiä, jolloin päästövaikutuksiakaan ei voi sinne asti laskea. Tuotantotavasta huolimatta rakennukset kuluttavat merkittävän osan energiasta, jolloin sitä koskevalla lainsäädännöllä on suuri vaikutus päästövähennystavoitteiden saavuttamisessa.

6. Ympäristövaikutukset tilanteessa, jossa omavaraisenergian ulosvienti voitaisiin lukea hyväksi E-luvun laskennassa

Ympäristövaikutusten arvioimiseksi tehtiin kaksi esimerkkitarkastelua, jossa vertaillaan sähkön kulutusta kahden esimerkkitalon välillä. Omavaraisenergian tarkastelussa keskityttiin aurinkosähköön, sillä uudistuotanto sijoittuu pääosin kaupunkialueille, mikä tarkoittaa että tuulivoiman hyödyntäminen omavaraisenergian tuotannossa on hyvin marginaalista. Esimerkkitalot ovat sähkölämmitteisiä pientaloja (lämmitetty nettoala 179 m²). Talo A vastaa energiatehokkuudeltaan nykyisiä vaatimuksia ja siihen kuuluu aurinkosähköjärjestelmä. Tätä verrataan taloon B, jonka energiatehokkuutta on parannettu niin, että se pääsee FlNZEB –ehdotuksen E-lukurajaan.

Talojen A ja B vuositason energiankulutus arvioitiin FlNZEB-hankkeen tietojen perusteella. Talon A oletettiin vastaavan kokoluokkansa sähkölämmitteistä perustapausta (energiankulutus 111 kWh/m²,a). Talon B kulutus oletettiin sellaiseksi, että se täyttää ehdotetun E-lukurajan (energiankulutus 65 kWh/m²,a). Esimerkkirakennusten koko vuoden kulutus (talo A 19 869 kWh ja talo B 11 635 kWh) allokoiitiin vuoden tunneille käyttämällä Helsingissä sijaitsevan esimerkkikohteen mitattua tuntidataa.

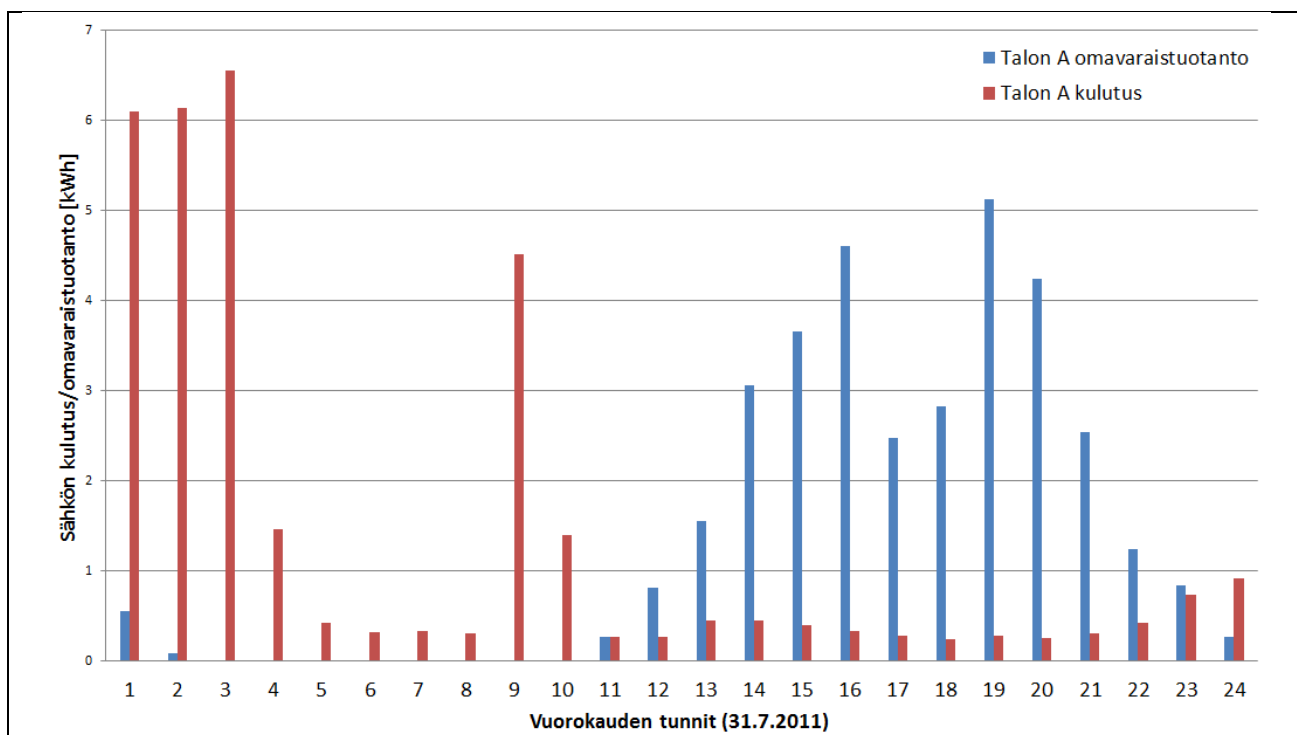
Talon A omavaraistuotannon maksimipotentialin laskennassa oletettiin, että rakennuksen katolle asennetaan tuotantopinta-alaltaan niin suuri aurinkosähköjärjestelmä kuin mahdollista. Käytettävissä oleva pinta-ala arvioitiin olettamalla, että rakennuksen katon etelän suuntainen lape hyödynnetään, ja tästä pinta-alasta 70 % oletettiin olevan mahdollista täyttää aurinkopaneeleilla. Katon kokonaispinta-ala arvioitiin lämmitetyn nettoalan perusteella hyödyntämällä EKOREM-mallin muuntokerrointa (Heljo ym. 2005) ja olettamalla rakennuksen huonekorkeudeksi kolme metriä. Aurinkopaneelin vuosituotanto laskettiin VTT:n laatiman aurinko-oppaan ohjeistusta käyttäen (Heimonen, 2011). Tämä laskennallinen vuosituotanto allokoitiin tuntitasolle käyttämällä mitattua, Helsingin Suvilahdessa tuotetun aurinkoenergian määriä.

Tarkastelu omavaraistuotannosta ja rakennusten kulutuksesta tehtiin tuntikohtaisesti, jotta nähdään mikä osuus tuotannosta voidaan hyödyntää itse, ja mikä osuus syötetään verkkoon. Taulukossa 11 on vertailtu talojen sähkökäyttöä esimerkissä 1.

Taulukko 11. Esimerkkitalojen A ja B vertailu.

	Talo A (omavaraistuotanto)	Talo B
Sähkön kulutus [kWh/a]	19 900	11 600
Ostosähkö [kWh/a]	18 300	11 600
Omavaraistuotannosta hyödynnetty [kWh/a]	1 500	-
Omavaraistuotannosta syötetty verkkoon [kWh/a]	5 900	-

Talo A tuotti aurinkosähköä 7 400 kWh/a, mutta tarvitsee vuoden aikana 8 300 kWh enemmän sähköä kuin talo B. Talon A omavaraisaurinkosähkön tuotanto ei siis riitä vastaamaan talon B energiatehokkuusparannuksen tuomaa sähkön säästöä. Tällöin talo A aiheuttaa enemmän päästöjä kuin talo B, koska se joutuu ostamaan enemmän sähköä riippumatta siitä miten omavaraissähköä hyödynnetään. Tämän lisäksi talo A saa käytettyä omavaraistuotannostaan hyödyksi vain 20 %, johtuen tuotannon ja kulutuksen eriaikaisuudesta. Tätä eriaikaisuutta (missmatch) on havainnollistettu kuvassa 13 yhden heinäkuun päivän osalta.



Kuva 13. Talon A kesäpäivän omavaraistuotannon ja kulutuksen missmatch.

Jos tarkasteltavien talojen energiatehokkuuden ero olisi pienempi, mutta omavaraistuotannon määrä sama, ympäristövaikutukset määräytyisivät sen mukaan miten hyvin tuotettu aurinkosähkö saadaan hyödynnettyä. Kuvan 13 mukaisessa esimerkkitalossa yölliset sähkökäyttöpiikit voivat johtua esim. käyttöveden lämmityksestä, joka olisi mahdollista ajoittaa myös tunneille, jolloin on aurinkosähköä on saatavilla. Tällaisella kuormanohjauksella voidaan vaikuttaa kulutusprofiileihin ja hyödyntää paremmin vaihtelevaa sähköntuotantoa (esim. aurinko- ja tuulivoima). Kesäpäivänä kaikkea tuotettua sähköä ei saada hyödynnettyä edes kuormanohjauksella, jolloin vaihtoehtoina on varastoida akkuun tai syöttää ylijäämä verkkoon.

Esimerkissä 2 on tarkasteltu tilannetta, jossa sähkökulutuksen ero talojen välillä on pienempi. Omavaraissähkön tuotantomäärä talossa A2 on sama kuin talossa A, mutta sähköstä saadaan kulutusjoustopuolella hyödynnettyä omaan käyttöön 40 % (taulukko 12). Sähkön käytön tuntikohtaiset hiilidioksidipäästöt laskettiin hyödyntäen menetelmää ja vuoden 2011 marginaalipäästökertoimia, jotka on kuvattu (Kopsakangas-Savolainen ym. 2015). Päästökertoimet sisältävät sekä tuotannon suorat päästöt (polttoaineiden polton päästöt) että epäsuorat, tuotantoketjujen aiheuttamat päästöt (esim. raaka-aineiden valmistuksen ja kuljetuksen päästöt). Riippuen oletuksesta ulosviennillä korvattavalle sähkön tuotantomuodolle, talon A2 ympäristövaikutukset voivat olla joko pienemmät tai suuremmat kuin talossa B.

Taulukko 12. Esimerkkitalojen A2 ja B vertailu.

	Talo A2 (omavaraistuotanto)	Talo B
Sähkön kulutus [kWh/a]	15 800	11 600
Ostosähkö [kWh/a]	12 800	11 600
Omavaraistuotannosta hyödynnetty [kWh/a]	3 000	-
Omavaraistuotannosta syötetty verkkoon [kWh/a]	4 400	-
Talon A2 korkeammasta ostosähkön määrästä syntyvät päästöt [kgCO ₂ /a]	840*	-
Ulosviedyn sähkön tuottama päästösäästö [kWh/a]	370-3 850**	

*käytetty marginaalipäästökertoimen keskiarvoa kaikilta vuoden tunneilta

**korvattavaksi tuotannoksi oletettu vesivoima-kivihiihilaahde

Systeemitason tarkastelussa keskeistä on se mitä tuotantoa verkkoon syötetty aurinkosähkö korvaa. Päästövaikutusten arviointi tulevaisuuden energiarakenteelle on monimutkaista, ja haastetta lisää mm. se, että Suomi on osa suurempaa sähkömarkkina-aluetta, jossa sähköä vaihdetaan. Kesällä muutoksiin reagoidaan tuotantopuolella tyypillisesti vesivoiman avulla, sillä sitä pystytään säätämään nopeasti. Toisaalta vesivoimankaan korvaamisen osalta päästövaikutus ei ole yksiselitteinen. Jos vesialtaissa on tilaa ja tuotantoa voidaan siirtää myöhemmäksi, niin on hyvä asia, jos kesällä on omavaraisenergiaa tarjolla. Toisaalta jos altaat ovat jo täynnä, niin omavaraisenergian tarjoaminen verkkoon voisi tarkoittaa sivujuoksutusta, mikä ei ole systeemin kannalta järkevää. Päästösäästöjä saavutetaan erityisesti tilanteessa, jossa omavaraisenergialla voidaan korvata lauhdetuotantoa.

Sähkön tuntikohtainen päästökerroin määräytyy tuotantomuodon mukaan, mikä edelleen riippuu mm. teknologioiden kustannuksista ja käytävissä olevista kapasiteeteista. Tuotantomuotojen yksikköpäästöissä on suuria vaihteluita. Tulevaisuudessa energiantuotantosysteemin kannalta olennaista on se, minkälaisia kulutus- ja tuotantopuolen joustoja tapahtuu. Tulevaisuuden sähkön päästökertoimen vaihteluun vaikuttavat kaksi tekijää yhdessä: kysyntäjousto ja vaihteleva tuotanto. Jos onnistutaan kuluttajajoustopuolella luomisessa, päästökertoimet tasoittuvat ja syntyy vähemmän kulutushuippuja. Toisaalta jos kysyntä ei jousta, mutta käytössä on enemmän vaihtelevaa tuotantoa, niin tuntien välillä päästökertoimissa on suurempia vaihteluita, vaikka keskimääräiset päästökertoimet laskevat. Tämä

vaihtelu on jo nykyisellään nähtävillä sähkön hinnoissa Tanskassa, jossa käytössä on paljon tuulivoimaa. Joustojen mahdollistamisessa myös akkuteknologian kehitys on merkityksellistä, sillä kaksisuuntaiseen toimintaan sähköverkon kanssa tarvittaisiin sähkön kustannustehokasta varastointia. Tulevaisuudessa aurinkoenergian ja akkuteknologian yhteys kasvaa, mikä parantaa mm. kotitalouksien kulutuksen ajoitusta, mutta toisaalta mahdollistaa myös akkuun varastoidun energian syötön verkkoon joustavammin, kun järjestelmä sitä vaatii. Tämä parantaa aurinkoenergiaan liittyvän pientuotannon arvoa systeeminäkökulmasta.

Verkkoon syötetyn omavaraissähkön päästövaikutukset systeemitasolla ovat hyvin tapauskohtaisia. Jos ulosvienti johtaa tilanteeseen, jossa kesällä verkkoon on tarjolla omavaraistuotantoa, mutta talvella huippukulutus kasvaa vastaavasti, se johtaa sähköntuotantojärjestelmän kannalta huonompaan tilanteeseen. Tämä tarkoittaisi myös suurempia ympäristövaikutuksia, sillä huippukuorman tuotannossa käytetään yleisimmin saastuttavimpia teknologioita. Talven huippukulutuksen kasvu johtaa myös kapasiteettiasteen pienenemiseen, mikä tarkoittaa, että järjestelmässä on enemmän sellaista teknologiaa, jota käytetään vain suhteellisen pienen määrän tunteja vuorokaudessa.

Systeemitasolla tulevaisuuden päästövaikutusten tarkasteluun tulisi käyttää tuntikohtaisia marginaalipäästökertoimia. Näillä kuvataan sen tuotantomuodon päästöjä, johon muutos ensimmäisenä vaikuttaa. Toisaalta pitäisi myös tietää myös kuinka suuri muutos kulutuksessa johtaa tuotantomuodon vaihtumiseen (ks. tarkemmin esim. Rinne ja Syri, 2013). Toistaiseksi tällaisia marginaalitarkasteluja tulevaisuudelle ei ole vaadittavalla tarkkuudella olemassa, joten ulosvietävän sähkön päästövaikutusten arviointi ei ole tässä työssä mahdollista kuin karkealla tasolla.

Kustannustehokkaat energiatehokkuustoimenpiteet vähentävät rakennusten energiankulutukseen liittyviä ympäristövaikutuksia. Vastaavia hyötyjä ei voida suoraan todentaa omavaraistuotannon lisäämisen osalta. Sähkön syötetyn omavaraissaurinkoenergian lukeminen hyväksi E-luvun laskennassa olisi järkevää, jos se pystyy tukemaan sähkömarkkinoiden joustavuutta ja parantamaan kysynnän ja tarjonnan tuntikohtaista kohtaamista.

Jos kaikkien tarkasteltujen uudisrakennusten katolle asennettaisiin esimerkkitalon A mukainen aurinkosähköjärjestelmä, olisi niiden yhteenlaskettu vuosituotanto noin 70 % rakennusten vuosittaisesta sähköntarpeesta (~250 GWh/a). Tätä tuotantopotentiaalia olisi mahdollista kasvattaa laajentamalla omavaraissenergian määrittelyssä käytettyä taserajaa kiinteistörajojen ulkopuolelle. Tämä mahdollistaisi mm. useamman rakennuksen yhteiset aurinkosähköjärjestelmät. Taserajan laajennuksen vaikutusta tuotantopotentiaaliin on kuitenkin hyvin vaikea arvioida määrällisesti. Teoriassa taserajan laajentaminen voisi myös lisätä kulutuksen joustavuutta ja nostaa omaan käyttöön saatavan sähkön määrää. Toisaalta, jos omavaraistuotannon ulosvientiä voisi kompensoida E-luvun laskemisessa, laajennettu taseraja monimutkaistaisi lainsäädäntöä entisestään.

6.1 Muita näkökulmia

Aurinkoenergian ympäristövaikutukset liittyvät pääosin keräimien ja paneelien valmistuksessa käytettävien raaka-aineiden tuotantoon ja hankintaan. Uusiutumattomien luonnonvarojen käyttö on merkittävää, sillä paneeleissa tarvitaan mm. telluuria, indiumia, tinaa, hopeaa ja galliumia, joiden saatavuus voi tulevaisuudessa aiheuttaa ongelmia. Toistaiseksi tällaisille raaka-aineille on vähän korvaavia materiaaleja, joten riskinä on, että jos tarvittavat materiaalit ehtyvät, myös paneeliteknologioiden tuotanto vaikeutuu tulevaisuudessa. (Leskinen ym. 2014)

Aurinko- ja tuulivoima ovat ns. vaihtelevaa tuotantoa, mikä tarkoittaa, että ne vaativat tuekseen säätövoimaa silloin kun kulutus ja tuotanto eivät kohtaa. Tulevaisuudessa tärkeää onkin energijärjestelmän toimivuuden turvaaminen tuotannon vaihdellessa ja toisaalta se, miten kulutusprofiilit joustavat ja vaikuttavat tuotantotarpeisiin.

Aurinkopaneelien tuottamaa sähköä voidaan hyödyntää monin eri tavoin jo nykyään, sähköä kuluttavien laitteiden ja toimintojen lisäksi aurinkosähköä voidaan käyttää lämmöntuottoon lämpöpumppujen avulla, tai akkujen lataamiseen esim. sähköautoissa. Akkuja ja muita energiavarastoja voidaan käyttää apuna kysyntäjoustossa lataamalla niitä esim. vähäisen kulutuksen aikana ja toisaalta ottamalla niistä energiaa kulutushuipun aikana, jolloin kulutusvaihtelu tasaantuu. Sähkön varastoinnin kannattavuus ja joustavuus on riippuvainen pitkälti akkuteknologian kehityksestä ja hinnasta. Tällä hetkellä akkuteknologia ei mahdollista pitkäaikaista varastointia, ja toisaalta Suomessa sähköautoja ei ole vielä merkittävästi käytössä.

Ilmaston lämmitessä myös Suomessa jäähdytystarve lisääntynee jonkin verran, mutta jäähdytystarveluku on vielä vuosisadan lopussakin pieni lämmitystarvelukuun verrattuna (Pirinen ym., 2014). Tulevaisuudessa kuitenkin aurinkosähkö yhdistettynä lämpöpumppuihin tai lämpökaivoihin voi tuoda kustannustehokkaita ja vähäpäästöisiä tapoja tuottaa tarvittavaa jäähdytystä. VTT on tutkinut aurinkolämmön kausivarastointiratkaisuja osana alueellista energijärjestelmään. Selvityksen mukaan lämpövarastoratkaisuja käytettäessä alueen rakennusten lämmityksen aiheuttamia päästöjä voidaan vähentää merkittävästi (Paiho ym. 2015).

7. Yhteenveto ja päätelmät

Työssä tarkasteltiin ympäristövaikutuksia, jotka seuraavat uusien E-lukuvaatimusten tuomista päästövähennyksistä, sekä omavaraisenergian määritelmään ja taserajaan ehdotettujen muutosten vaikutuksia. Vaikutuksia uudisrakennusten päästöihin arvioitiin kvantitatiivisesti vuosina 2020 ja 2030. Päästökertoimien määrittäminen tämän pidemmälle tulevaisuuteen sisältää väistämättä niin suuria epävarmuuksia, että päästövaikutusten laskeminen ei olisi enää tarkoituksenmukaista. Taulukkoon 13 on koottu työn keskeisimmät tulokset. Päästövähennykset ovat koko maan mittakaavassa aluksi alaiset, sillä uudisrakennukset kattavat rakennuskannasta vasta pienen osan. Kuitenkin koko rakennuskannan osuus nykyisestä energian loppukäytöstä Suomessa on merkittävää, joten pidemmällä aikavälillä muutokset rakennuskannan energiatehokkuudessa ovat tärkeässä roolissa päästöjen vähentämisessä.

Ympäristövaikutusten arvioimiseksi tilanteessa, jossa omavaraisenergian ulosvienti voitaisiin lukea hyväksi E-luvun laskennassa, tehtiin kaksi esimerkkitarkastelua. Kustannustehokkaat energiatehokkuustoimenpiteet vähentävät rakennusten energiankulutukseen liittyviä ympäristövaikutuksia. Vastaavia hyötyjä ei voida suoraan todentaa omavaraistuotannon lisäämisen osalta, sillä ulosviedyn sähkön systeemivaikutus on tapauskohtaista. Verkkoon syötetyn omavaraaurinkoenergian lukeminen hyväksi E-luvun laskennassa olisi järkevää, jos se pystyy tukemaan sähkömarkkinoiden joustavuutta ja parantamaan kysynnän ja tarjonnan tuntikohtaista kohtaamista.

Taulukko 13. Keskeisimmät ympäristövaikutusarvioinnin tulokset.

Tapaus	Vuosittainen päästösäästö (CO ₂ päästöt)	Ilmansaasteet
Perustapaus: FinZEB ehdotukset E-luvuille	16 kt (v. 2020) 86 kt (v. 2030)	11 t SO ₂ , 23 t NO _x , 1 t PM (v. 2020) 34 t SO ₂ , 130 t NO _x , 6 t PM (v. 2030)
Herkkyystarkastelu: Toimistojen ja liikerakennusten maltillisemmat E-lukurajat, muuten kuin perustapaus	49 kt (v. 2030)	20 t SO ₂ , 79 t NO _x , 3 t PM (v. 2030)

Liite 1: Rakennusten ostoenergia

Taulukoihin A1-A4 on koottu oletetut ostoenergiat tarkastelluille uudisrakennuksille lämmönlähteittäin perustapauksessa (nykylainsäädäntö, taulukot A1 ja A3) ja FlnZEB ehdotusten mukainen (uusi lainsäädäntö, taulukot A2 ja A4). Ostoenergiat on tarkasteltu lämmityksen ja sähkön osalta erikseen. Tämä tarkoittaa, että sähkölämmitteisten ja maalämpötalojen ostoenergiat on esitetty taulukoissa A3 ja A4.

Taulukoissa A5 ja A6 on esitetty erikseen lämmitykseen ja sähkөөn käytetyn ostoenergian säästö lämmitystavoittain ja rakennustyypeittäin.

Taulukko A1 Ostettu lämmitysenergia [kWh/m²] rakennustyypeittäin ja lämmönlähteittäin. Perustapaus, vastaa nykylainsäädäntöä.

	kaukolämpö	POK	POR	sähkö	kaasu	kivihiili, koksi, tms	puu	turve	maalämpö
Pientalot (0...150 m ²)	98	106	106	0	106	0	111.8	0	0
Pientalot (150...200 m ²)	97	105	105	0	105	0	110.7	0	0
Pientalot (200+ m ²)	85	92	92	0	92	0	97	0	0
Asuinkerrostalo	58.8			0	58	0	0	0	0
Toimisto	92.2	100.5		0	100.5	0	0	0	0
Koulu	83.2			0		0	96	0	0
Päiväkoti	86.2			0	94.1	0	0	0	0
Liikerakennus	55.3			0	60.4	0	0	0	0
Liikuntahalli	108.8			0		0	0	0	0
Majoitusliikerakennus	145.2			0		0	0	0	0
Sairaala	324.6			0		0	0	0	0

Taulukko A2 Ostettu lämmitysenergia [kWh/m²] rakennustyypeittäin ja lämmönlähteittäin. FlnZEB ehdotusten mukaan, vastaa tarkasteltua lainsäädäntöä.

	kaukolämpö	POK	POR	sähkö	kaasu	kivihiili, koksi, tms	puu	turve	maalämpö
Pientalot (0...150 m ²)	98	101	101	0	101	0	111.8	0	0
Pientalot (150...200 m ²)	92.9	93.6	93.6	0	93.6	0	110.7	0	0
Pientalot (200+ m ²)	79.9	80.6	80.6	0	80.6	0	97	0	0
Asuinkerrostalo	60.6			0	55	0	0	0	0
Toimisto	38.2	28.8		0	28.5	0	0	0	0
Koulu	48.2			0		0	55.7	0	0
Päiväkoti	62.2			0	73.9	0	0	0	0
Liikerakennus	12.6			0	11.5	0	0	0	0
Liikuntahalli	62.5			0		0	0	0	0
Majoitusliikerakennus	72.6			0		0	0	0	0
Sairaala	228.5			0		0	0	0	0

Taulukko A3 Ostettu sähkö [kWh/m²] rakennustyypeittäin. Perustapaus, vastaa nykyainsäädäntöä.

	kaukolämpö	POK	POR	sähkö	kaasu	kivihiili, koksi, tms	puu	turve	maalämpö
Pientalot (0...150 m ²)	54	55	55	123	55	0	54	0	77
Pientalot (150...200 m ²)	54	55	55	124	55	0	54	0	77
Pientalot (200+ m ²)	54	55	55	119	55	0	54	0	75
Asuinkerrostalo	49.5				42	0	0	0	68.5
Toimisto	59.1	41			40	0	0	0	82.5
Koulu	51.3					0	51.3	0	73.8
Päiväkoti	58.5				44	0	0	0	82.4
Liikerakennus	108.2				105	0	0	0	122.4
Liikuntahalli	51.1					0	0	0	81.3
Majoitusliikerakennus	71.9					0	0	0	111.1
Sairaala	170.5					0	0	0	271.5

Taulukko A4 Ostettu sähkö [kWh/m²] rakennustyypeittäin. FlNZEB ehdotusten mukaan, vastaa tarkasteltua lainsäädäntöä.

	kaukolämpö	POK	POR	sähkö	kaasu	kivihiili, koksi, tms	puu	turve	maalämpö
Pientalot (0...150 m ²)	54	42	42	99	42	0	54	0	77
Pientalot (150...200 m ²)	44.5	28.2	28.2	100	28.2	0	51	0	77
Pientalot (200+ m ²)	42	28	28	95	28	0	46	0	75
Asuinkerrostalo	42.6				36	0	0	0	68
Toimisto	36.9	36			26.2	0	0	0	52.9
Koulu	40.9					0	40.9	0	61.2
Päiväkoti	37.1				19.5	0	0	0	62.9
Liikerakennus	78.6				77.3	0	0	0	84.1
Liikuntahalli	41.7					0	0	0	67.6
Majoitusliikerakennus	71.5					0	0	0	107.1
Sairaala	151.2					0	0	0	245.9

Taulukko A5. Lämmitykseen käytetyn ostoenergian säästö lämmitystavoittain ja rakennustyypeittäin (kWh/v, nykylainsäädäntö – FlNZEB). Sähkölämmitteisten rakennusten ostoenergia on esitetty taulukossa ?.

	kaukolämpö	POK	POR	kaasu	puu
Pientalot (0...150 m ²)	0	11591	92	2569	0
Pientalot (150...200 m ²)	550653	59293	183	21453	0
Pientalot (200+ m ²)	758573	87721	110	14821	0
Asuinkerrostalo	-1754719*	0	0	8096	0
Toimisto	9037545	76293	0	164607	0
Koulu	3169723	0	0	0	176039
Päiväkoti	646375	0	0	32864	0
Liikerakennus	15579538	0	0	835282	0
Liikuntahalli	686563	0	0	0	0
Majoitusliikerakennus	7082702	0	0	0	0
Sairaala	1084931	0	0	0	0

*Asuinkerrostalojen ostettu lämmitysenergia kasvaa, sillä kaukolämmityksen ominaiskulutus kasvaa hieman (ks. Taulukko A1 ja A2). E-lukujen tuoma vähennys toteutuu sähkön käytön vähentymisen myötä (ks. taulukko A6).

Taulukko A6. Ostetun sähkön säästö lämmitystavoittain ja rakennustyypeittäin (kWh/v, nykylainsäädäntö – FlNZEB).

	kaukolämpö	POK	POR	sähkö	kaasu	puu	maalämpö
Pientalot (0...150 m ²)	0	30137	239	5695100	6679	0	0
Pientalot (150...200 m ²)	1275904	139391	430	6044724	50432	116419	0
Pientalot (200+ m ²)	1784879	207759	262	3803221	35101	311699	0
Rivi- ja ketjutalot	0	0	0	0	0	0	0
Asuinkerrostalo	6726424	0	0	0	16192	0	2956
Toimisto	3715435	5320	0	0	31550	0	240316
Koulu	941861	0	0	0	0	45429	37712
Päiväkoti	576351	0	0	0	39860	0	77095
Liikerakennus	10799867	0	0	0	473155	0	1178725
Liikuntahalli	139389	0	0	0	0	0	55533
Majoitusliikerakennus	39023	0	0	0	0	0	5451
Sairaala	217889	0	0	0	0	0	0

Kirjallisuus

- Ecoinvent, 2015, Saatavilla: <http://www.ecoinvent.org/about/about.html>. Luettu 3.12.2015.
- Ekholm T., Karvosenoja K., Tissari J., Sokka L., Kupiainen K., Sippula S., Savolahti M., Jokiniemi J. & Savolainen I. 2014. A multi-criteria analysis of climate, health and acidification impacts due to greenhouse gases and air pollution – The case of household-level heating technologies. Energy policy. Volume 74, November 2014, Pages 499–509.
- Fuller G.W., Sciare J., Lutz M., Moukhtar S., Wagener S. 2013. New Directions: Time to tackle urban wood burning? Atmospheric Environment 68:295-296.
- Heljo, J., Vihola, J., 2005, Rakennusten energiankulutus ja CO₂-ekv päästöt Suomessa, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakentamistalouden laitos, Raportti 2005:4. Saatavilla: http://webhotel2.tut.fi/ee/Materiaali/Ekorem/EKOREM_Loppuraportti_051214.pdf , luettu 12.11.2015.
- Heimonen, I., 2011, Aurinko-opas 2012, Aurinkolämmön ja –sähkön energiantuoton laskennan opas, Saatavilla: <http://www.ym.fi/download/noname/%7BF4F73E83-56AF-4112-AD7B-0E1F1804D38B%7D/30750> , luettu 11.11.2015.
- Hänninen O., Leino O., Kuusisto E., Komulainen H., Meriläinen P., Haverinen-Shaughnessy U., Miettinen I., Pekkanen J. 2010. Elinympäristön altisteiden terveysvaikutukset Suomessa. Ympäristö ja Terveys -lehti 3/2010. s. 12-35.
- Karvosenoja N. 2008. Emission scenarios model for regional air pollution. Väitöskirja. Monographs Boreal Environ. Res. 32.
- Kopsakangas-Savolainen, M., Mattinen, M., K., Manninen, K., Nissinen, A., 2015, Hourly-based greenhouse gas emissions of electricity – cases demonstrating possibilities for households and companies to decrease their emissions, hyväksytty julkaistavaksi sarjassa: Journal of Cleaner Production.
- Leskinen, P., Holma, A., Manninen, K., Sinkko, T., Pasanen, K., Rantala, M., Sokka, L., 2014, Uusiutuvat energian tuotannon ja käytön ympäristövaikutukset ja –riskit, Kirjallisuuskatsaus ja asiantuntija-arvio, Ympäristöministeriön raportteja 9, 2014.
- Lindroos T., Monni S., Honkatukia J., Soimakallio S. & Savolainen I. 2012. Arvioita uusiutuvan energian lisäämisen vaikutuksista Suomen kasvihuonekaasupäästöihin ja kansantalouteen. VTT technology 11
- Nissinen, A., Heiskanen, E., Perrels, A., Berghäll, E., Liesimaa, V., Mattinen, M., 2012, Ohjauskeinoyhdistelmät asumisen, henkilöliikenteen ja ruoan ilmastovaikutusten hillintään – KUILU-hankkeen loppuraportti, Suomen ympäristö 11/2012. Saatavilla: <http://hdl.handle.net/10138/38758> , luettu 13.11.2015.
- Paiho, S. Hoang, H., Hukkalainen, M., Westerberg, R., 2015, Paikallista energiaa asuinalueella, Esimerkkinä Helsingin Vartiosaari, VTT Technology 234, Saatavilla: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2015/T234.pdf> , luettu 13.11.2015.
- Pirinen, P., Simola, H., Nevala, S., Karlsson, P., Ruuhela, R., 2014, Ilmastonmuutos ja lämmitystarveluku paikkatietoarvioina Suomessa, Ilmatieteenlaitos, raportteja 2014:3. Saatavilla: <http://hdl.handle.net/10138/135722> , luettu 13.11.2015.
- Rinne, S., Syri, S., 2013, Lämpöpumput ja kaukolämpö energijärjestelmässä, Suomen ilmastopaneeli Raportti 3/2013, Saatavilla: http://www.ilmastopaneeli.fi/uploads/selvitykset_lausunnot/L%C3%A4mp%C3%B6pumput%20ja%20kaukol%C3%A4mp%C3%B6%20energij%C3%A4rjestelm%C3%A4ss%C3%A4_29-1-2013.pdf , luettu 11.11.2015

- Savolahti M., Karvosenoja K., Kupiainen K. & Paunu V-V. 2015. Pienpolton päästövähennyskeinojen kustannustehokkuus ja vaikutukset väestöaltistukseen. Suomen ympäristökeskus.
- Seppälä, J., Mäenpää, I., Koskela, S., Mattila, T., Nissinen, A., Katajajuuri, J-M., Härmä, T., Korhonen, M-R., Saarinen, M., Virtanen, Y., 2009, Suomen kansantalouden materiaalivirtojen ympäristövaikutusten arviointi ENVIMAT-mallilla, Suomen ympäristö 20/2009.
- Suoheimo P., Grönroos J., Karvosenoja K., Petäjä J., Saarinen K., Savolahti M. & Silvo K. 2015. Päästökattodirektiiviehdotuksen ja keskisuurten polttolaitosten direktiiviehdotuksen toimeenpanon vaikutukset Suomessa. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 6/2015 TEM (Työ- ja elinkeinoministeriö), 2013. Kansallinen energia- ja ilmastostrategia. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 20. päivänä maaliskuuta 2013. VNS 2/2013 vp. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja. Energia ja ilmasto. 8/2013
- Tilastokeskus, 1994, Rakennusluokitus 1994, Saatavilla: <http://www.tilastokeskus.fi/meta/luokitukset/rakennus/001-1994/index.html> luettu 10.11.2015.
- Tilastokeskus, 2014, Polttoaineluokitus.
- Vainio, T., Belloni, K., Jaakkonen, L., 2012, Asuntotuotanto 2030. Asuntotuotantotarpeeseen vaikuttavia tekijöitä. Espoo 2012. VTT Technology 2. 33 s. + liitt. 17 s.
- Vehviläinen, I., Pesola, A., Heljo, J., Vihola, J., Jääskeläinen, S., Kalenoja, H., Lahti, P., Mäkelä, K., Ristimäki, M., 2010, Rakennetun ympäristön energiankäyttö ja kasvihuonekaasupäästöt, Sitran selvityksiä 39.
- Ympäristöministeriö, 2012, Rakennusten energiatehokkuus, Määräyksen ja ohjeet 2012, D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Saatavilla: http://www.ymparisto.fi/FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma, luettu 13.11.2015
- Ympäristöministeriö, 2014, Suomen täydentävä raportti rakennusten energiatehokkuutta koskevien vähimmäisvaatimusten kustannusoptimaalisten tasojen laskennasta (direktiivi 2010/31/EU).