

# Energiatehokkuuden mittarit ja potentiaalit

## Tutkimusraportti

Mari Tuomaala et al.





# Energiatehokkuuden mittarit ja potentiaalit

**Mari Tuomaala, Pekka Ahtila, Turo Haikonen,  
Hanna Kalenoja, Erika Kallionpää, Jarkko  
Rantala, Pekka Tuominen, Jari Shemeikka, Miika  
Rämä, Kari Sipilä, Esa Pursiheimo, Juha  
Forsström, Irmeli Wahlgren, Pekka Lahti**

Aalto-yliopiston julkaisusarja  
**TIEDE + TEKNOLOGIA** 1/2012

© 2011 Aalto-yliopisto, Tampereen Teknillinen Yliopisto ja VTT

ISBN 978-952-60-4503-0 (printed)

ISBN 978-952-60-4504-7 (pdf)

ISSN-L 1799-487X

ISSN 1799-487X (printed)

ISSN 1799-4888 (pdf)

Kuvat: Kansikuva: Stora Enso Oyj

Unigrafia Oy  
Helsinki 2012

Julkaisutilaukset:  
Aalto-yliopisto Energiatekniikan laitos

**Author**

Mari Tuomaala et al.

**Name of the publication**

Energy efficiency metrics and improvement potentials

**Publisher** School of Engineering**Unit** Department of Energy Technology**Series** Aalto-yliopiston julkaisusarja TIEDE + TEKNOLOGIA 1/2012**Field of research** Energy efficiency**Abstract**

The first objective of the research ‘Energy Efficiency Metrics and Improvement Potentials’ was to study how energy efficiency is measured in different sectors. The second objective was to study how energy efficiency improvement potential could be evaluated on a sectoral basis, and more comprehensively in society as a whole. The research covered five sectors: communities, buildings, transportation and logistics, (process) industry and energy production.

According to the Energy Service Directive 2006/32/EC (EC, 2006), energy efficiency is defined as “a ratio between an output of performance, service, goods or energy, and an input of energy”. The output of performance, service, goods or energy covers a wide range of subjects. This results in a variety of energy efficiency metrics.

Sometimes it is useful to provide a broader perspective on energy efficiency measurement (e.g. kWh/m<sup>3</sup>, kWh/m<sup>2</sup>, etc. in the construction and real estate sector). Sometimes explanatory metrics are also needed, e.g. ‘the capacity utilisation rate’ in the process industry sector. In the analysis of efficiency, one must make decisions about how to set the balance boundary and how to take the life-cycle aspects into account. It is worthwhile to compare only objects which have been defined in a similar way.

Energy is used in different forms: as fuel, electricity and heat. Different forms of energy should not be aggregated until they have been transformed into a comparable form. This is made using so-called primary energy factors. There are varying practices in the use of primary energy factors, and the ways in which they are calculated is not well established. Energy efficiency and energy efficiency potential should be studied primarily using energy units. Carbon dioxide (or greenhouse gas) efficiency can be used as a supporting and complementary evaluation criterion.

Energy efficiency improvement potential means a difference in energy consumption between the current situation and the reference situation. Defining the reference situation, i.e. the target state, is one of the challenges in calculating the potential. Such a target state can be the best known reference (such as BAT), or ideal performance. No common method exists to define the target state, so practices vary between the sectors. For example, the concept ‘ideal state’ is not even suitable in communities and logistics.

A case study was carried out during the late part of the research to calculate the energy efficiency potential of an example area. The study was made in the Kalasatama district near the city centre of Helsinki. The case study verified for example, that metrics from different sectors can be combined in a single study.

Based on the study it can be said that the methods being used to measure energy efficiency are still undeveloped, and much research is needed in this area. In practical work, emphasis should be put on reaching agreements concerning the standardisation of energy efficiency calculation methods.

**Keywords** Energy efficiency, energy efficiency indicators, energy efficiency potential**ISBN (printed)** 978-952-60-4503-0**ISBN (pdf)** 978-952-60-4504-7**ISSN-L** 1799-487X**ISSN (printed)** 1799-487X**ISSN (pdf)** 1799-4888**Location of publisher** Espoo**Location of printing** Helsinki**Year** 2012**Pages** 334



**Tekijä**

Mari Tuomaala et al.

**Julkaisun nimi**

Energiatehokkuuden mittarit ja potentiaalit

**Julkaisija** Insinööritieteiden korkeakoulu**Yksikkö** Energiatekniikan laitos**Sarja** Aalto-yliopiston julkaisusarja TIEDE + TEKNOLOGIA 1/2012**Tutkimusala** Energiatehokkuus**Tiivistelmä**

Energiatehokkuuden mittarit ja potentiaalit (EPO) – tutkimushankkeen ensimmäinen tavoite oli selvittää, miten energiatehokkuutta mitataan eri sektoreilla. Toinen tavoite oli selvittää, miten energiatehokkuuden parannuspotentiaalia arvioidaan sektorikohtaisesti ja myös kattavammin koko yhteiskunnassa. Tutkimuksessa mukana olleet sektorit olivat: yhdyskunnat, rakennukset, (prosessi-) teollisuus, liikenne ja logistiikka sekä energiantuotanto.

Energiapalveludirektiivin 2006/32/EY mukaan (EU, 2006): ”Energiatehokkuus on suoritteen, palvelun, tavaran tai energian tuotoksen ja energiantuotoksen välinen suhde”. Tämä suorite, palvelu, tavara tai energian tuotos on laaja joukko erilaisia asioita. Näin ollen myös energiatehokkuuslukuja on erilaisia.

Energiankulutusta on usein tarkasteltava useammasta näkökulmasta kattavan kokonaiskäsityksen saamiseksi (esim. rakennussektorilla kWh/m<sup>3</sup>, kWh/m<sup>2</sup>, jne.). Energiankulutusluvun tukena on usein ilmaistava myös selittäviä tekijöitä, kuten teollisuudessa kapasiteetin käyttöaste. Laskelmia tehdessä on tehtävä rajauksia koskien kokonaisuuden laajuutta ja sitä miten huomioidaan elinkaari vaikutukset. Vain samalla tavalla rajattuja kohteita on mielekästä vertailla toisiinsa.

Energiaa käytetään eri muodoissa: polttoaineina, sähköinä ja lämpönä. Erilaisia jakeita ei tulisi laskea yhteen ennen niiden muuttamista keskenään vertailukelpoiseen muotoon. Tähän käytetään ns. primäärienergiakertoimia. Kertoimien käytössä on vaihtelevia käytäntöjä eikä laskenta ole vakiintunut. Energiatehokkuutta kuten sen tehostamispotentiaalia tulee ensisijaisesti tarkastella energiayksiköiden avulla. Hiilidioksidi- tai kasvihuonekaasutehokkuutta voi käyttää tukevana ja täydentävänä arviointikriteerinä.

Energiatehokkuuden parannuspotentiaali on ero energiankulutuksessa nykytilanteen ja vertailutilanteen välillä. Potentiaalilaskennan haaste kulminoituu tavoitetilan eli vertailutilanteen määrittämiseen. Vertailutilanteena voidaan käyttää parasta nykykäytäntöä (esim. BAT) tai ideaalitulannetta. Vertailutilan määrittämiseen tai laskemiseen ei millään tutkituista viidestä sektorista ole olemassa yleisesti hyväksyttyä, käytössä olevaa menetelytapaa ja siksi käytännöt vaihtelevat. Esimerkiksi yhdyskuntien ja logistiikan sektoreille käsite ”ideaalitulanne” ei edes sovellu hyvin. Tutkimuksen aikana suoritettiin kokeilulaskenta yhdessä yhteisessä kohteessa, joka oli Helsingin Kalasatama. Case laskenta osoitti mm., että eri sektoreiden mittareita voidaan käyttää samanaikaisesti valitun kohteen energiatehokkuuden tarkastelussa. Mittareiden käyttö eri laskentatapausten vertailussa mahdollistaa energiatehokkuuden potentiaalilaskennan arvioimisen.

Tutkimuksen perusteella voidaan sanoa, että menetelmät energiatehokkuuden mittaamiseksi ja potentiaalilaskemiseksi ovat vielä varsin kehittymättömiä siihen, että ne toimisivat käytännön työn ohjaajina. Aihealueella on edelleen perustutkimustarve. Käytännön työssä tulisi edistää sopimuksia liittyen laskennan pelisääntöihin.

**Avainsanat** Energiatehokkuus, energiatehokkuuden mittarit, energiatehokkuuden potentiaali**ISBN (painettu)** 978-952-60-4503-0**ISBN (pdf)** 978-952-60-4504-7**ISSN-L** 1799-487X**ISSN (painettu)** 1799-487X**ISSN (pdf)** 1799-4888**Julkaisupaikka** Espoo**Painopaikka** Helsinki**Vuosi** 2012**Sivumäärä** 334





# **Energiatehokkuuden mittarit ja potentialit (EPO)**



Mari Tuomaala<sup>1</sup>, Pekka Ahtila<sup>1</sup>, Turo Haikonen<sup>1</sup>, Hanna Kalenoja<sup>2</sup>, Erika Kallionpää<sup>2</sup>, Jarkko Rantala<sup>2</sup>, Pekka Tuominen<sup>3</sup>, Jari Shemeikka<sup>3</sup>, Miika Rämä<sup>3</sup>, Kari Sipilä<sup>3</sup>, Esa Pursiheimo<sup>3</sup>, Juha Forsström<sup>3</sup>, Irmeli Wahlgren<sup>3</sup> ja Pekka Lahti<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Aalto-yliopisto Energiatekniikan laitos

<sup>2</sup>TTY Tiedonhallinnan ja logistiikan laitos

<sup>3</sup>VTT

# Alkusanat

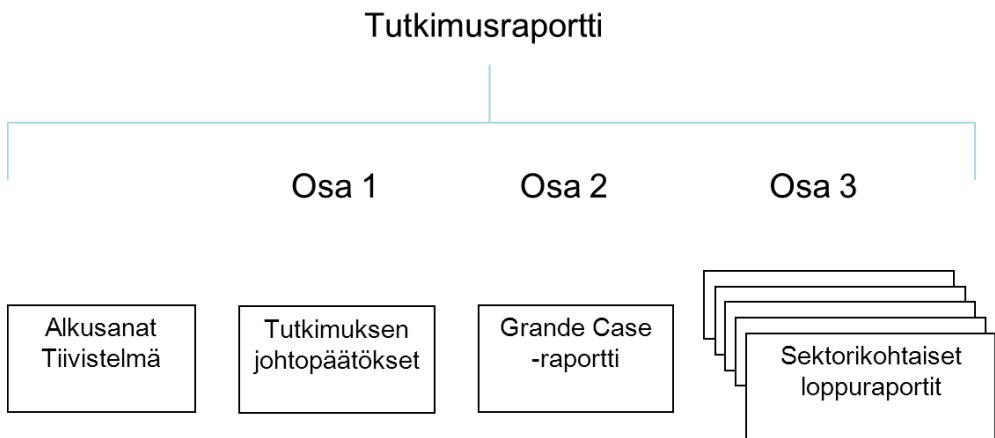
Euroopan komissio hyväksyi vuonna 2008 strategian ilmastotoimista. Sen mukaan jäsenvaltioiden tulee vähentää niiden yhteisiä kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 20 % ja lisätä uusiutuvien energialähteiden osuutta 20 %:in loppukulutuksesta vuoteen 2020 mennessä. Lisäksi Euroopan komissio on asettanut suuntaa antavan tavoitteen vähentää primäärienergian kulutusta 20 %:lla verrattuna vuoden 2020 ennakoituaan energiankulutukseen. Tämä korostaa tarvetta parantaa energiatehokkuutta EU:ssa. Energiatehokkuuden mittaamiseksi ja tehostamispotentiaalien laskemiseksi ei ole kuitenkaan ollut yhtenäistä menetelmää. Tutkimus Energiatehokkuuden mittarit ja potentiaalit (EPO) perustettiin tarkastelemaan näitä kysymyksiä. Hanke toteutettiin viiden sektorin yhteistarkasteluna. Tutkimuksessa mukana olleet sektorit olivat: yhdyskunnat, rakennukset, (prosessi-) teollisuus, liikenne ja logistiikka sekä energiantuotanto. EPO - tutkimushanke toteutettiin osana Tekesin ClimBus tutkimusohjelmaa. Se aloitettiin 1.1.2008 ja se päättyi 30.10.2011.

Tutkimuksen johtoryhmän työhön osallistuivat Jouko Kinnunen Motiva Oy:stä (johtoryhmän puheenjohtaja), Sirkka Vilkamo ja Pentti Puhakka työ- ja elinkeinoministeriöstä, Erkki Laitinen ympäristöministeriöstä, Risto Saari (2008), Jari Gröhn (2009 - 2010) ja Saara Jääskeläinen (2011) liikenne- ja viestintäministeriöstä, Mikael Ohlström ja Kati Ruohomäki (2011) Elinkeinoelämän keskusliitosta sekä Mikko Ylhäisi Tekesistä.

Tutkimusryhmä koostui Aalto-yliopiston, Tampereen teknillisen yliopiston ja VTT:n edustajista. Aalto-yliopiston Energiatekniikan laitokselta tutkimustyöhön osallistuivat Mari Tuomaala (tutkimuksen projektipäällikkö), Pekka Ahtila (vastuullinen johtaja), Sari Siitonen ja Turo Haikonen (teollisuus-osuus). Tampereen teknillisen yliopiston tutkimustyöhön osallistuivat Hanna Kalenoja, Erika Kallionpää ja Jarkko Rantala TTY:n Tiedonhallinnan ja logistiikan laitokselta (liikenne ja logistiikka -osuus). VTT:n tutkimustyöhön osallistuivat Kari Sipilä, Miika Rämä, Esa Pursiheimo ja Juha Forsström Energiajärjestelmät osaamiskeskuksesta (energiantuotanto -osuus) sekä Pekka Tuominen ja Jari Shemeikka (rakennukset -osuus) ja Irmeli Wahlgren, Pekka Lahti ja Minna Halonen (yhdyskunnat -osuus) Rakennusten teknologiat ja palvelut osaamiskeskuksesta. Lisäksi tutkimuksen valmisteluun osallistui Janne Hietaniemi Finpro ry:stä.

Hankkeen ensimmäisessä vaiheessa tutkimusryhmien tueksi muodostettiin kaksi ohjausryhmää: Rakennukset ja yhdyskunnat -ohjausryhmä sekä Logistiikan ohjausryhmä. Rakennukset ja yhdyskunnat ohjausryhmän jäseniä olivat: Erja Reinikainen Granlund Oy:stä (ohjausryhmän puheenjohtaja), Kyösti Oasmaa, Leena Silfverberg ja Ulla Soitinaho Helsingin kaupungilta, Mikko Nousiainen Pöyry Oy:stä, Pekka Kalliomäki ympäristöministeriöstä ja Erkki Aalto RAKLI:sta. Logistiikan ohjausryhmän jäseniä olivat Jari Gröhn liikenne- ja viestintäministeriöstä, Tiina Haapasalo Elinkeinoelämän keskusliitosta, Mikko Melasniemi LOGY ry:stä ja Vesa Peltola Motiva Oy:stä. Lisäksi logistiikan ohjausryhmän työhön osallistuivat Paavo Siurua Rautaruukki Oyj:stä sekä Sari Karpkala, Jukka Hölsä ja Mika Koponen UPM Kymmene Oy:stä.

Tutkimuksen raportointi on jaettu kolmeen osaan: 1) tutkimuksen johtopäätökset 2) koelaskentaa kuvaava ns. Grande Case raportti ja 3) sektorikohtaiset loppuraportit, yhteensä 5 kpl eli energiantuotanto, yhdyskunnat, rakennukset, liikenne ja logistiikka sekä prosessiteollisuus.



Espoossa 10.1.2012

Mari Tuomaala

tutkimuksen projektipäällikkö



# **Osa 1**

## **Tutkimuksen johtopäätökset**





Mari Tuomaala

Aalto-yliopisto, Energiatekniikan laitos

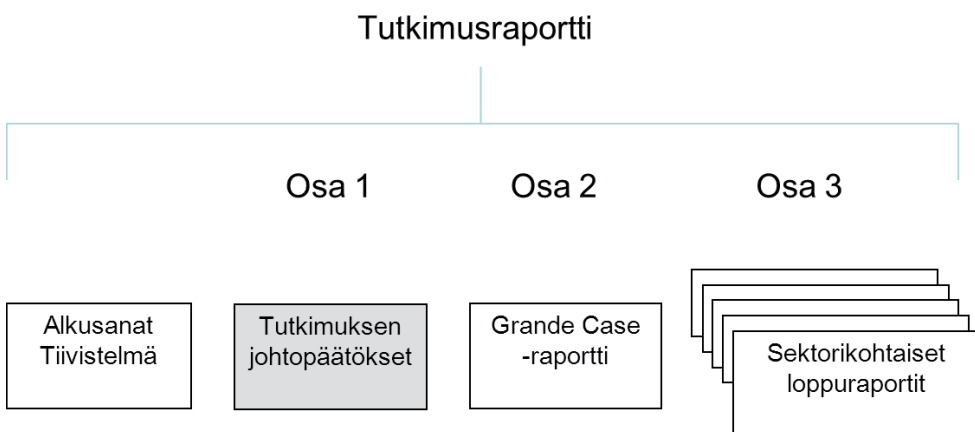
# Alkusanat

Energiätehokkuuden mittarit ja potentiaalit – tutkimuksen raportointi on jaettu kolmeen osaan: 1) tutkimuksen johtopäätökset 2) koelaskentaa kuvaava ns. Grande Case raportti ja 3) sektorikohtaiset loppuraportit, yhteensä 5 kpl. Tämä raportti kuvaa tutkimuksen johtopäätökset.

Tutkimuksen johtopäätökset on kirjoitettu viiden sektoriraportin ja yhteisen koelaskennan tulosten perusteella. Osassa tiivistetään tulokset tutkimuksen kahdesta päätaivitteesta (mittarit, potentiaalien laskenta) sekä kuvataan kattavammin muutamaa keskeistä teemaa. Raportin loppuun on kirjattu päähavaintoja ja jatkosuosituksia.

Tämän johtopäätösraportin lähtöaineistona olivat pääasiassa EPO loppuraportin osat 2 ja 3. Tämän vuoksi raportti sisältää runsaasti viittauksia näihin osiin ja niiden sisältämiin kappaleisiin.

Tämän johtopäätösosan kommentointiin ja täydentämiseen sekä käytännön esimerkkien toimittamiseen osallistuivat kirjoittajan lisäksi tutkimusryhmän jäsenet Pekka Ahtila ja Turo Haikonen Aalto-yliopistosta, Hanna Kalenoja TTY:ltä sekä Miika Rämä, Pekka Tuominen, Jari Shemeikka ja Irmeli Wahlgren VTT:ltä.



# Sisällysluettelo

|   |    |
|---|----|
| Alkusanat .....   | 4  |
| Symboliluettelo ja lyhenteiden selitykset .....                     | 7  |
| 1. Johdanto .....   | 10 |
| Tutkimuksen tausta .....  | 10 |
| Tutkimuksen tavoitteet .....  | 10 |
| Tutkimuksen raportointi .....                                       | 11 |
| Tutkimusmenetelmä .....   | 12 |
| 1. Energiatohokkuuden mittaaminen .....                             | 13 |
| Kooste mittareista .....  | 13 |
| Energiatohokkuusmittarien muodostaminen .....                       | 15 |
| Määritelmästä mittaamiseen .....                                    | 15 |
| Toimialojen jako alasektoreihin .....                               | 16 |
| Energiatohokkuus eri näkökulmista .....                             | 17 |
| Muiden kriteerien huomioiminen .....                                | 18 |
| Materiaalien käyttöä ja laatua kuvaavat kriteerit .....             | 18 |
| Energiatohokkuus, ekotohokkuus ja kestävä kehitys .....             | 19 |
| Päätöksenteon yhteydessä tehtävät valinnat .....                    | 20 |
| Energian arvon huomioiminen ja primäärienergiakerroin .....         | 22 |
| Energiatohokkuus ilmiönä – kulutuksen vaihtelu .....                | 23 |
| 2. Mittausalueen rajaaminen .....                                   | 26 |
| Yleistä .....   | 26 |
| Sektorikohtaisia laskentarajoja .....                               | 27 |
| Energiaa käyttävien sektoreiden kytkentöjä energiantuotantoon ..... | 32 |
| Energiaa käyttävien sektoreiden muodostama kokonaisuus .....        | 34 |
| Esimerkkejä taserajojen valinnan vaikutuksista .....                | 35 |
| 3. Elinkaariajattelu osana energiatohokkuutta .....                 | 37 |
| Yleistä .....   | 37 |
| Elinkaariajattelu osana sektoreiden mittareita .....                | 37 |
| Sektoreiden yhteistarkastelu elinkaarinäkökohdat huomioiden .....   | 39 |
| 4. Energiatohokkuuden parannuspotentiaali .....                     | 41 |
| Potentiaalilaskennan periaatteet ja avoimet kysymykset .....        | 41 |
| Päätöksenteko elinkaaren eri vaiheissa .....                        | 43 |
| Grande Case – laskentaesimerkin tulokset .....                      | 45 |

|   |    |
|---|----|
| Työn tavoite.....   | 45 |
| Laskentakohde ja -vaihtoehdot.....                                  | 46 |
| Työn suoritus.....  | 47 |
| Tulokset ja johtopäätökset.....                                     | 47 |
| Laskentaan liittyviä käytännön haasteita .....                      | 49 |
| Muiden kriteerien huomioiminen.....                                 | 49 |
| Sektoreiden ryhmittely .....  | 50 |
| Sektoreilla tehtyjen päätösten ristikkäisvaikutuksia.....           | 51 |
| 5. Päähavainnot.....  | 52 |
| Päätöksenteon näkökulmia .....                                      | 52 |
| Päätulokset liittyen mittaamiseen ja potentiaalilaskentaan.....     | 53 |
| Ehdotus seuraaviksi tutkimusvaiheiksi.....                          | 55 |
| Lähdeluettelo .....   | 56 |
| Liite 1. Sektoreilla tehtyjen päätösten ristikkäisvaikutuksia ..... | 57 |

# Symboliluettelo ja lyhenteiden selitykset

|                        |   |
|------------------------|---|
| BAT                    | Best Available Technique, paras käytettävissä oleva tekniikka   |
| Elinkaari              | Tuotejärjestelmän peräkkäiset tai vuorovaikutteiset vaiheet raaka-aineiden hankinnasta tai tuottamisesta luonnonvaroista loppusijoitukseen (SFS, 2006)                                    |
| Elinkaariarviointi     | Tuotejärjestelmän elinkaaren aikaisten syötteiden ja tuotosten sekä potentiaalisten ympäristövaikutusten koostaminen ja arviointi (SFS, 2006)   |
| Energia- ja massatase  | Ks. taseraja  |
| Grande Case            | Tutkimuksen aikana tehty koelaskenta  |
| Kuljetussuorite        | Tietyssä ajassa kuljetettujen tonnikipometrien määrä [tonnikm]  |
| Mittaaminen            | Termi, jota tässä raportissa on käytetty tarkoittamaan energiatehokkuuden mittaamista, seuranta tai arvioimista   |
| Ominaisenergiankulutus | Energiankulutus suhteutettuna tuotoksen määrään (esim. teollisuudessa tuotannon määrä)  |
| Taseraja               | Rajaus, jolla erotetaan tarkasteltava kohde ympäristöstään. Po. energia- ja massatase, josta tässä yhteydessä on korostettu energiatehokkuuslaskennan kannalta oleellisia energiavirtoja. |
| Tonnikipometri         | Tonnin suuruisen tavaramäärän siirtäminen kilometrin matkan (kuljetussuoritteen mitta)  |

|  |   |
|--|---|
| A  | Pinta-ala [m <sup>2</sup> ]   |
| As                                       | Asukasmäärä [kpl]   |
| As+tp                                    | Asukas- ja työpaikkamäärä [kpl]   |
| CO <sub>2</sub>                          | Hiilidioksidi   |
| CO <sub>2</sub> -ekv                     | Hiilidioksidiekvivalentti   |
| E  | Energiankulutus [J, MWh]  |
| E <sub>ajosuorite</sub>                  | ajosuoritekohtainen energiankulutus [l/ajoneuvokm, MJ/ajoneuvokm]   |
| E <sub>kuljetussuorite</sub>             | kuljetussuoritetta kohti laskettu energiankulutus, [MJ/tonnikm]   |
| E <sub>käyttö</sub>                      | Alueen rakennusten käytön energiankulutus [MWh]   |
| E <sub>liikenne</sub>                    | Alueen aiheuttaman liikenteen energiankulutus [MJ, MWh]   |
| ET <sub>logistiikka</sub>                | Toimitusketjun energiatehokkuus [esim. MJ/t]  |
| E <sub>lämpö</sub>                       | Lämmöntuotantoon käytetty energiamäärä [esim. MWh]  |
| E <sub>polttoaineet</sub>                | Polttoaineiden käyttö [esim. MWh]   |
| E <sub>sähkö</sub>                       | Sähköenergian käyttö [esim. MWh]  |
| E <sub>tuotanto</sub>                    | Yhdyskuntasektorilla: alueen rakenteisiin sitoutunut energia [MWh], jolla tarkoitetaan rakennusmateriaalien tuotannon energiankulutusta<br>Logistiikkasektorilla: tuotannon energiankulutus [MWh/t] |
| EEI                                      | Energiatehokkuusindeksi (Energy Efficiency Index)   |
| ET                                       | Energiatehokkuus tai -luku [esim. MJ/suorite]   |
| ET <sub>as+tp</sub>                      | Primäärienergiankulutus asukas- ja työpaikkamäärää kohden [MWh/(as+tp)]   |
| ET <sub>k-m<sup>2</sup></sub>            | Primäärienergiankulutus kerrosneliometriä kohden [MWh/(k-m <sup>2</sup> )]  |
| k-m <sup>2</sup> , kerros-m <sup>2</sup> | Kerrosneliometri  |
| kWh, MWh                                 | Kilowattitunti, megawattitunti  |

|                     |  |
|---------------------|--|
| MJ                  | Megajoule  |
| SEC                 | Specific energy consumption (ominaisenergiankulutus)                             |
| SEC <sub>ref</sub>  | Vertailu l. referenssiprosessin energiankulutus                                  |
| SEC <sub>u</sub>    | Käytön intensiteetillä korjattu rakennuksen ominaiskulutus [kWh/m <sup>2</sup> ] |
| SEC <sub>Thlö</sub> | Ominaiskulutus rakennuksessa oleskeltuja henkilötunteja kohden [kWh/h]           |
| Thlö                | Henkilötuntimäärä [h]  |
| tp                  | Työpaikkojen määrä [kpl]   |
| t <sub>tuote</sub>  | Tuotteiden massa tai tuotannon määrä, tonnia [t]                                 |
| uA                  | Käyttöasteella korjattu pinta-ala [m <sup>2</sup> ]                              |
| η                   | Hyötysuhde   |
| Φ <sub>pa</sub>     | Polttoaineen energiasisältö [MJ, MWh]  |
| Q                   | Lämpöenergia [MJ, MWh]   |
| P                   | Sähköenergia [MJ, MWh]   |

# 1. Johdanto

## Tutkimuksen tausta

Euroopan komissio hyväksyi vuonna 2008 strategian ilmastotoimista. Sen mukaan jäsenvaltioiden tulee vähentää niiden yhteisiä kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 20 % ja lisätä uusiutuvien energialähteiden osuutta 20 %:in loppukulutuksesta vuoteen 2020 mennessä. Lisäksi Euroopan komissio on asettanut suuntaa antavan tavoitteen vähentää primäärienergian kulutusta 20 %:lla verrattuna vuoden 2020 ennakoituun energiankulutukseen. Tämä korostaa tarvetta parantaa energiatehokkuutta EU:ssa. Energiatehokkuuden mittaamiseksi ja tehostamispotentiaalien laskemiseksi ei ole kuitenkaan ollut yhteistä menetelmää. Tutkimus Energiatehokkuuden mittarit ja potentiaalit (EPO) perustettiin tarkastelemaan näitä kysymyksiä (Tekes, 2009). Hanke toteutettiin viiden sektorin yhteistarkasteluna. Tutkimuksessa mukana olleet sektorit olivat: yhdyskunnat, rakennukset, (prosessi-) teollisuus, liikenne ja logistiikka sekä energiantuotanto. Tutkimus alkoi 1.1.2008 ja päättyi 30.10.2011.

## Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteet asetettiin seuraavasti: 1) kehittää yhdenmukainen, koko energiaketjun kattava energiatehokkuuden käsitteistö ja mittaristo, 2) luoda energiatehokkuuden potentiaalien laskentatapa, 3) laskea kehitetyn laskentatavan avulla saavutettavissa oleva energiatehokkuuden tehostamispotentiaali ja 4) tuottaa ehdotus tulevaisuuden kansallisiksi energiatehokkuuden painopistealueiksi sekä luoda perusta uusille koko energiaketjua palveleville liiketoimintamalleille.

Ensimmäisen tutkimusvuoden jälkeen todettiin, että kokonaisuutta 3 (potentiaalinen laskenta) ei ole realistista tavoitella alun perin kuvattuna kaltaisena. Tämä johtui siitä, että kehityksen todettiin olevan tavoiteosa-alueella 2 (potentiaalisten laskentamenetelmät) vasta alkutaipaleella. Potentiaalisten laskenta päätettiin toteuttaa case-laskelman omaisesti (ks. EPO-tutkimusraportti, osa 2).

Tutkimus kattoi 5 sektoria, jotka olivat yhdyskunnat, rakennukset, (prosessi-) teollisuus, liikenne ja logistiikka sekä energiantuotanto.



## Tutkimuksen raportointi

EPO -tutkimuksen raportointi on jaettu kolmeen osaan:

1. Tutkimuksen johtopäätökset (tämä raportti)
2. Koelaskentaa kuvaava ns. Grande Case –raportti
3. Sektorikohtaiset loppuraportit, yhteensä 5 kpl

Osa 1 on synteesi hankkeen osatuloksista (Osat 2 ja 3). Raportissa käsitellään tutkimustuloksia kahdesta päätutkimustavoitteesta: energiatehokkuuden mittarit ja energiatehokkuuden potentiaalien laskenta. Lisäksi joitakin osa-alueita on tarkasteltu kattavammin. Raportin loppuun on kiteytetty keskeiset johtopäätökset ja jatkotoimenpideehdotukset.

Osa 2, ns. Grande Case laskenta, kuvaa kaikkien tutkimusryhmien yhteistyönä toteutetun koelaskentaosuuden. Laskennassa arvioitiin energiatehokkuuden paranemista (osittain virtuaalista) valitulla alueella, joka oli Helsingin Kalasataman alue. Alueen energiatehokkuutta arvioitiin tutkimusaikana löydettyjen ja kehitettyjen energiatehokkuusmittareiden avulla.

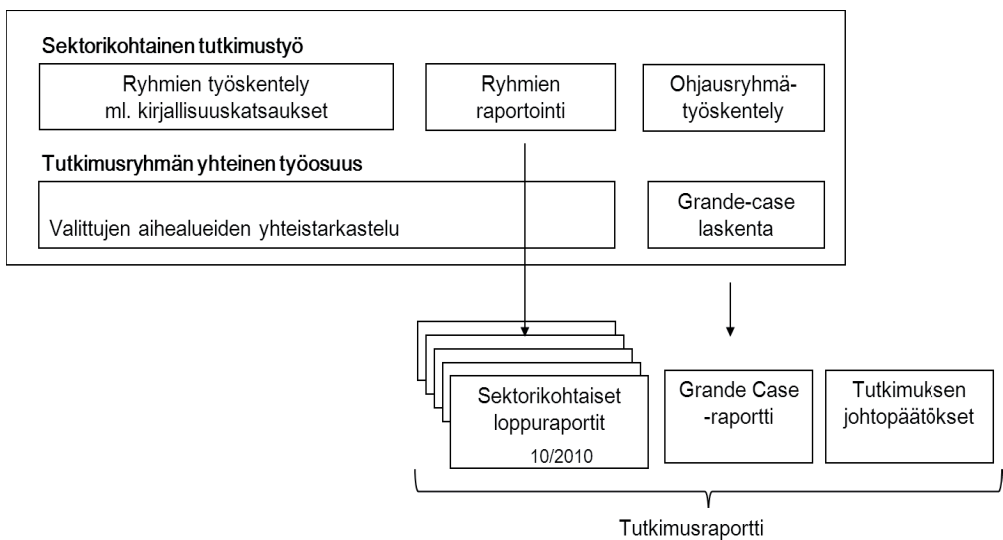
Osa 3 sisältää tutkimuksessa mukana olleiden viiden sektorin ensimmäisen vaiheen tutkimustulokset omina kokonaisuuksinaan. Sektoreiden vertailemisen helpottamiseksi kaikkien viiden raportin sisällysluettelot on laadittu yhdenmukaisiksi. Sektoreiden raportit sisältävät tutkimusryhmien työstämät kuvaukset ko. sektoreiden potentiaalilaskennasta sekä sektorikohtaiset suositukset ja johtopäätökset.

## Tutkimusmenetelmä

Tutkimustyö jakautui sektori- eli ryhmäkohtaiseen tutkimustyöhön ja sektoreiden väliseen yhteiseen tutkimustyöhön (kuva 1).

Sektorikohtainen tutkimustyö sisälsi kirjallisuuskatsaukset sekä tutkimusryhmäkohtaisia aihetta konkretisoivia koelaskentoja ja/tai syventäviä teoriatarkasteluita. Tulokset koottiin ”Sektorikohtaisiksi loppuraportteiksi”, joita on 5 kpl.

Tutkimusryhmien välinen yhteinen työosuus koostui työpajoista, joiden avulla pyrittiin tunnistamaan kaikille sektoreille yhteisiä energiatehokkuuden mittaamiseen ja potentiaalien laskentaan liittyviä teemoja. Joitakin teemoja käsiteltiin useissa työpajoissa. Yhteiset teemat jäsentyivät lopulta sektorikohtaisten loppuraporttien sisällysluetteloksi. Tulosten pohjalta toteutettiin yhteinen laskentaosuus, ns. Grande Case laskenta.



Kuva 1. Energiatehokkuuden mittarit ja potentiaalit -tutkimuksen työvaiheet.

# 1. Energiatehokkuuden mittaaminen

## Kooste mittareista

Hankkeessa tutkittiin energiatehokkuuden mittaamista viidellä eri sektorilla. Tutkimuksessa löydetyt ja sen aikana kehitetyt keskeiset mittarit on koottu Taulukkoon 1. Energiatehokkuuden nimeämis- ja merkitsemistavat vaihtelevat eri sektoreilla.

*Taulukko 1. Energiatehokkuuden mittareita eri sektoreilla (EPO-loppuraportti, osa 3, kpl 1-5).*

| Sektori            | Mittari <sup>1)</sup>  |
|--------------------|--|
| Yhdyskunnat        | <p>Primäärienergiankulutus asukas- ja työpaikkamäärää kohden vuodessa<sup>2)</sup></p> $ET_{as+tp} = (E_{tuotanto} + E_{käyttö} + E_{liikenne}) / (as+tp), a \text{ [MWh}/(as+tp), a]$ <p>Primäärienergiankulutus kerrosneliometriä kohden vuodessa<sup>2)</sup></p> $ET_{k-m^2} = (E_{tuotanto} + E_{käyttö} + E_{liikenne}) / (k-m^2), a \text{ [MWh}/(k-m^2), a]$ <p>Energiatohokkuus voidaan laskea myös esim. 50 vuoden ajanjaksolle<sup>2)</sup></p> |
| Rakennukset        | <p>Ominaiskulutus nettopinta-alaa kohti<sup>3)</sup></p> $SEC = E/A \text{ [kWh}/m^2]$ <p>Käytön intensiteetillä korjattu ominaiskulutus nettopinta-alaa kohti<sup>3)</sup></p> $SEC_u = E/uA \text{ [kWh}/m^2]$ <p>Ominaiskulutus rakennuksessa oleskeltuja henkilötunteja kohden<sup>3)</sup></p> $SEC_{Thlö} = E/T_{hlö} \text{ [kWh}/h]$   |
| Logistiikka        | <p>Toimitusketjun energiatohokkuus<sup>4)</sup></p> $ET_{logistiikka} = (E_{hankinta} + E_{tuotanto} + E_{jakelu} + E_{paluu}) / t_{tuote} \text{ [MJ}/t]$ <p>Hankinnan ja jakelun energiatohokkuutta voidaan mitata myös kuljetussuoritepohjaisilla mittareilla:<sup>4)</sup></p> $E_{kuljetussuorite} = E / \text{kuljetussuorite} \text{ [MJ}/\text{tonnikm}]$ $E_{ajosuorite} = E / \text{ajosuorite} \text{ [esim. l}/\text{ajoneuvokm}]$             |
| Prosessiteollisuus | <p>Ominaisenergiankulutus<sup>5)</sup></p> $SEC = (E_{polttoaineet} + E_{sähkö} + E_{lämpö}) / t_{tuote} \text{ [MWh}/t]$ <p>Energiatohokkuusindeksi<sup>5)</sup></p> $EEI = SEC_{ref} / SEC \text{ (toisinaan käytetään käänteislukua)}$  |
| Energiantuotanto   | <p>Voimalaitoksen hyötysuhde<sup>6)</sup></p> $\eta = (P + Q) / \Phi_{pa}$   |

<sup>1)</sup> Ks. symboliluettelo ja lyhenteiden selitykset, <sup>2)</sup> EPO loppuraportti, osa 3, kpl 2, <sup>3)</sup> EPO loppuraportti, osa 3, kpl 3, <sup>4)</sup> EPO loppuraportti, osa 3, kpl 4, <sup>5)</sup> EPO loppuraportti, osa 3, kpl 5, <sup>6)</sup> EPO loppuraportti, osa 3, kpl 1.

# Energiatehokkuusmittarien muodostaminen

## Määritelmästä mittaamiseen

Kirjallisuudessa esitetään energiatehokkuudelle useita, hieman toisistaan poikkeavia määritelmiä. Energiapalveludirektiivin 2006/32/EY mukaan (EU, 2006):

*'energiatehokkuus' on suoritteen, palvelun, tavaran tai energian tuotoksen ja energiapanoksen välinen suhde.*

Edellä mainittu suorite, palvelu, tavara tai energian tuotos on laaja joukko erilaisia asioita. Suoritteen, palvelun, tavaran tai energian tuotoksen määrittely vaikuttaa siihen millaiseksi energiatehokkuusluku muodostuu (Taulukko 2). Kaikki energiaa kuluttavat kohteet jaotellaan sektoreiksi (tässä tutkimuksessa viisi sektoria) ja sektorit voidaan edelleen jakaa alasektoreiksi (Taulukko 3).

Energiatehokkuutta on usein kuvattava eri näkökulmista kattavamman kokonaiskäsitetyksen saamiseksi. Tällöin käytetään useampaa kuin yhtä energiatehokkuuslukua (Taulukko 4). Joillain aloilla energiatehokkuuden mittaaminen tarvitsee tuekseen selittäviä tekijöitä, kuten rakennuksissa tilankäytön tehokkuus ja teollisuudessa kapasiteetin käyttöaste.

Laskelmia tehtäessä on suoritettava erilaisia rajoituksia. Niitä tehtäessä otetaan kantaa siihen, mitä laskelmiin sisällytetään ja mitä rajataan niiden ulkopuolelle. Rajaukset vaikuttavat saatuun tulokseen. Rajaukset liittyvät etenkin ns. laskennan taserajan määrittelyyn sekä siihen miten huomioidaan elinkaarikysymykset. Energiatehokkuusluku-  
jen muodostamisen keskeinen vaihe on myös energiajakeen muunnos primäärienergiaksi. Näistä kysymyksiä käsitellään tarkemmin seuraavissa kappaleissa.

Taulukko 2. Esimerkkejä eri sektoreille muodostetuista energiatehokkuusmittareista.

| Sektori            | Suorite, palvelu, tavara tai energian tuotos | Energiatehokkuusmittari             |
|--------------------|--|-------------------------------------|
| Yhdyskunnat        | asukasluku [as]                              | MWh/as                              |
|                    | rakennusten kerrosala [k-m <sup>2</sup> ]    | kWh/k-m <sup>2</sup>                |
| Rakennukset        | pinta-ala [m <sup>2</sup> ]                  | kWh/m <sup>2</sup>                  |
| Logistiikka        | Tuotetonni [t]                               | MJ/t                                |
|                    | kuljetussuorite [tonnikm]                    | MJ/tonnikm                          |
| Prosessiteollisuus | tuotannon määrä [t]                          | MWh/t                               |
| Energiantuotanto   | sähkö ja/tai lämpö [MWh]                     | MWh <sub>pa</sub> /MWh <sup>1</sup> |

<sup>1</sup> kulutussuhde

### Toimialojen jako alasektoreihin

Todellisuudessa yhdyskunta-alueet, rakennukset, teollisuusprosessit, kuljetusketjut ja energiantuotantoratkaisut muodostuvat toisistaan poikkeaviksi. Energiatehokkuuden mittaamisen haasteena on luokitella kohteita yhteisesti hyväksyttäviin ryhmiin. Luokittelua tarvitaan, jotta energiaa kuluttavia kohteita voitaisiin vertailla keskenään.

Rakennukset -sektoria voidaan jakaa talotyypeittäin pientaloiksi, kerrostaloiksi, teollisuushalleiksi, jne. Samalla tavalla prosessiteollisuus-sektori voidaan jakaa metallinjalostusteollisuudeksi, puunjalostusteollisuudeksi, kemianteollisuudeksi, jne. Nämä jaetaan edelleen tuotteen mukaan. Sektoreita ja alasektoreita on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Esimerkkejä sektoreiden jakamisesta alasektoreihin.

| Sektori            | Alasektori   |
|--------------------|--|
| Yhdyskunnat        | Kaupunkien keskustat, lähiöt, haja-asutusalueet <sup>1)</sup><br><br>Asuntoalueet, kunnat, seudut <sup>1)</sup><br><br>Rakennukset, perusrakenne, liikenne <sup>1)</sup>   |
| Rakennukset        | Pientalot, kerrostalot, teollisuusrakennukset, koulut <sup>2)</sup>  |
| Logistiikka        | Teollisuuden logistiikka, kaupan logistiikka, energiantuotannon logistiikka <sup>3)</sup>  |
| Prosessiteollisuus | Jako teollisuussektoreihin ja sen alasektoreihin: paperinjalostusteollisuus, metallurginen teollisuus, petrokemian teollisuus, jne. <sup>4)</sup><br><br>Teollisuussektorin jako osaprosesseittain kuten paperiteollisuudessa massanvalmistusprosessi, kuivatusprosessi, jne. TAI teollisuussektorin jako tuotesektoreittain kuten paperinjalostusteollisuudessa SC, LWC, jne. |
| Energiantuotanto   | Erillistuotantolaitos, yhteistuotantolaitos, poltovoimalaitos, tuulivoimala, vesivoimala <sup>5)</sup>   |

<sup>1)</sup>EPO loppuraportti, osa 3, kpl 2, <sup>2)</sup>EPO loppuraportti, osa 3, kpl 3, <sup>3)</sup>EPO loppuraportti, osa 3, kpl 4, <sup>4)</sup>EPO loppuraportti, osa 3, kpl 5, <sup>5)</sup>EPO loppuraportti, osa 3, kpl 1.

### Energiatehokkuus eri näkökulmista

Energiankulutusta voidaan tarkastella eri näkökulmista kattavamman kokonaiskäsitteen saamiseksi. Näkökulmia kuvataan valitsemalla useampi *suoritetta, palvelua, tavaraa tai energian tuotosta* kuvaava tekijä (nimittäjä). Kohteita kuvaavia näkökulmia on esitetty taulukossa 4. Käytännössä eri näkökulmien tarkastelu toteutuu niin, että energiatehokkuutta arvioidaan useamman energiatehokkuusmittarin avulla.

*Taulukko 4. Esimerkkejä tarkastelunäkökulmista eli tekijöistä, joihin energiankäyttöä voidaan suhteuttaa.*

| <b>Sektori</b>     | <b>Tarkastelunäkökulmia</b>   |
|--------------------|---|
| Yhdyskunnat        | alueen asukasmäärä [kpl], alueen työpaikkojen määrä [kpl], alueen rakennusten kerrosala [k-m <sup>2</sup> ]                                       |
| Rakennukset        | tilavuus [m <sup>3</sup> ], kokonaispinta-ala [m <sup>2</sup> ], lämmitetty pinta-ala [m <sup>2</sup> ], asukkaiden määrä [kpl], vuokran arvo [€] |
| Logistiikka        | Tuotetonni [t], kuljetussuorite [tonnikm], tuotteiden arvo [€]  |
| Prosessiteollisuus | Tuotannon määrä [t], tuotannon arvo [€]   |
| Energiantuotanto   | energiayksikkö polttoaineyksikköä kohden [MWh/MWh <sub>pa</sub> ], energiayksikkö päästöyksikköä kohden [MWh/t <sub>CO2</sub> ]                   |

## Muiden kriteerien huomioiminen

### Materiaalien käyttöä ja laatua kuvaavat kriteerit

Energian käytön optimoinnissa tulee huomioida laaja joukko myös muita kuin energiankulutusta kuvaavia tekijöitä. Kattavassa tarkastelussa on huomioitava materiaalien käyttöön liittyviä tekijöitä sekä laatua ja toimintaa kuvaavia tekijöitä.

Materiaaleja ovat yhdyskunnissa ja rakennuksissa rakennusmateriaalit (sitoutuvat pääasiassa rakenteisiin), logistiikassa pakkausmateriaalit ja teollisuudessa raaka-aineet, täyteaineet ja muut hyödykkeet kuten vesi.

Laatua ja toimintaa kuvaavia kriteereitä ovat yhdyskunnissa ympäristön laatua kuvaavat tekijät, rakennuksissa sisäympäristön laatua kuvaavat tekijät ja rakennuksen käyttöaste (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 3), logistiikassa toimitusaika, toimitusfrekvenssi, kuljetusnopeus ja kuormausaste (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 4), teollisuudessa prosessin tehokkuutta kuvaavat tekijät kuten kapasiteetin käyttöaste ja tuotannon laatu



(EPO loppuraportti, osa 3, kpl 5) sekä energiantuotannossa käyntiaste ja huipun käyntiaika (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 6). Yleensä laatuun liittyviä tekijöitä on vaikea mitata. Tällaisia ovat mm. rakennusten lämpöolosuhteet, ilmanlaatu, valaistus, ääniolosuhteet, huolto ja ylläpito, jne.

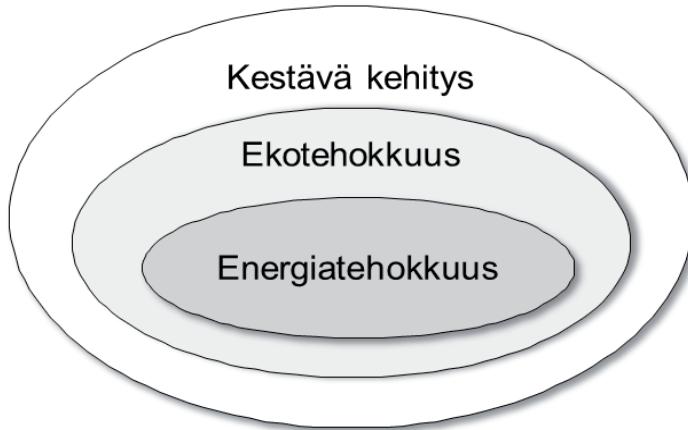
Kaikissa tarkasteluissa on huomioitava myös ympäristökriteerit. Näitä käsitellään seuraavassa kappaleessa.

### **Energiatehokkuus, ekotehokkuus ja kestävä kehitys**

Energiatehokkuus on osa ekotehokkuutta (eco-efficiency), joka tarkastelee luonnonvarojen (energia, materiaalit, vesi, jne.) tehokasta käyttöä. Kestävä kehitys (sustainability) sisältää ekologisen, taloudellisen ja sosiaalisen näkökulman (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 2). Käytännössä energiatehokkuuden mittaaminen näin laajassa viitekehyksessä on vielä vaikeaa. Käytännön työssä ympäristönäkökulmat huomioidaan liittämällä tarkasteluun mukaan erilaisia ympäristökriteereitä.

Vakiintunut tapa on mitata energiatehokkuuden rinnalla hiilidioksiditehokkuutta (esim.  $\text{kgCO}_2/\text{t}_{\text{tuote}}$ ) tai kasvihuonekaasutehokkuutta. Hiilidioksiditehokkuuden käyttö ainoana kriteerinä ei ole suositeltavaa, sillä se ei ole yksiselitteistä (ks. laajemmin kpl 4).

Lisäksi mitataan muita päästöjä ja jätteiden määriä. Energiatehokkuuden mittaamisen viitekehys osana kestäväen kehityksen viitekehitystä on havainnollistettu kuvaan 2.



*Kuva 2. Energiatehokkuuden mittaaminen osana ekotehokkuutta ja kestävää kehitystä. (EPO loppuraportti, Osa 3, kpl 2)*

### **Päätöksenteon yhteydessä tehtävät valinnat**

Investointien päätöksenteko perustuu kannattavuuslaskelmaan. Kannattavuuslaskelmat muodostuvat hyvin erilaisiksi riippuen siitä mitä laskelmiin huomioidaan ja mitä niistä rajataan pois. Laskelma voi olla suppea tai laaja kriteerien suhteen tai laskenta-alueen (taserajan) suhteen. Lisäksi laskelmiin vaikuttaa se, miten elinkaarenaikaiset vaikutukset huomioidaan. Tätä on havainnollistettu kuvassa 3. Laskennan taserajakysymyksiä tarkastellaan luvussa 2 ja elinkaarikysymyksiä luvussa 3.

Investointilaskelmassa huomioidaan alkupääoma sekä vuotuiset tulot ja menot. Energiatehokkaampi rakenne on usein kalliimpi ratkaisu ja vaatii siten enemmän alkupääomaa (uusi teknologia, lisäeristäminen jne.). Tämä asettaa haasteita energiatehokkuuden edistämiseksi. Energiatehokkaampi ratkaisu saadaan houkuttelevammaksi, jos laskenta-aika, jolta energiansäästöä kerrytetään, asetetaan pitkäksi. Yhdyskuntasuunnittelussa rakenteiden energiankäyttöä mitataan yleensä 50 vuoden ajanjaksolta.

Poikkeuksena suuremmasta alkupääomavaatimuksesta voidaan mainita yhdyskuntien energiatehokkuus. Yhdyskuntien osalta energiatehokkaat rakenteet ovat yleensä myös taloudellisia. Tämä koskee mm. rakennusten kerrosalaa asukasta kohden (asumisväljyys), perusrakenteen (verkostojen) määrä ja yhdyskuntien toimintojen edellyttämää liikennettä (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 2).

Lisäksi päätöksentekoa ohjaavat mm. kuluttajien mieltymykset. Monissa kohteissa juuri muut kuin energianäkökulmat ohjaavat valintoja ja saattavat tulla priorisoiduksi ohi energiatehokkuustavoitteiden. Esimerkkinä voidaan mainita sähköllä toimiva kylpyhuoneen lattialämmitys kaukolämmityssä talossa.



Kuva 3. Energiatehokkuuden mittaamiseen liittyviä valinta- ja rajauskysymyksiä.

Energiatehokkuuden laskentaan liittyy myös erilaisia kohdentamis- eli allokointikysymyksiä. Näistä keskeinen on polttoaineen ja CO<sub>2</sub> -päästöjen jakaminen sähkön ja lämmön yhteistuotannossa, josta ei ole yleisesti hyväksyttyä käytäntöä. Lisäksi on olemassa erilaisia muita kohdentamiseen liittyviä haasteita, jotka liittyvät mm. energiankäytön jakamiseen tuotteiden, tuotantoyksiköiden tai tuotantovaiheiden kesken. Esimerkkinä voidaan mainita energiankulutuksen kohdentaminen paluukuljetuksille logistiikassa. Lisäksi esimerkiksi teollisuuden valmiudet tässä asiassa ovat vielä vajavaiset. Polttoaineen ja päästöjen jakaminen sekä muut kohdentamiskysymykset ovat keskeisiä myös elinkaariarvioinneissa (LCA).

## Energian arvon huomioiminen ja primäärienergiakerroin

Energiaa käytetään eri muodoissa: polttoaineina, sähköinä ja lämpönä. Erilaisilla energijakeilla on erilainen termodynaaminen arvo (exergia). Tämän vuoksi niitä ei tulisi laskea yhteen ennen jakeiden yhteismitallistamista eli muuttamista keskenään vertailukelpoiseen muotoon. Yhteismitallistamiseen käytetään ns. primäärienergiakertoimia, joiden avulla energiankulutus muutetaan primäärienergiaksi (yl. polttoaineen energiasisältö). Kertoimien avulla huomioidaan konversioprosessissa tapahtuvat häviöt.

Primäärienergiakertoimien käytössä on vaihtelevia käytäntöjä eikä niiden laskenta ole vakiintunut. Keskustelua käydään mm. siitä pitäisikö muutoksia sähkönkäytössä arvioida keskimääräisen tuotannon perusteella vai marginaalituotannon perusteella. Muutoksia sähkönkäytössä tarkastellaan usein marginaalituotannon perusteella.

Kertoimien valinnassa tarkastelun aikavälillä on oleellinen merkitys. Marginaalituotannon käyttö laskentaperusteena on perusteltua lyhyellä aikavälillä, koska energijärjestelmä ei ehdi sopeutua muutokseen Keskipitkällä aikavälillä voimalaitosten ajotapaa ja ajojärjestystä voidaan muuttaa ja pitkällä aikavälillä voidaan toteuttaa uusinta- ja korvausinvestointeja. Näin ollen keskipitkällä ja pitkällä aikavälillä on perustellumpaa käyttää keskimääräisen tuotannon arvoja. (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 3)

Tutkimuksen aikana energiatehokkuuspotentiaalia arvioitiin kokeilulaskennalla casekohteessa, jossa kohteena oli Helsingin Kalasataman alue. Laskennan avulla haluttiin tuottaa arvio mittareiden ja niiden yhdistämisen soveltuvuudesta energiatehokkuuden potentiaalien laskentaan. Case-laskennassa tuotettiin todelliset primäärienergiakerroimet ja CO<sub>2</sub> -päästökertoimet kahdeksalle eri energiantuotantovaihtoehdolle (ks. EPO-loppuraportti, Osa 2).

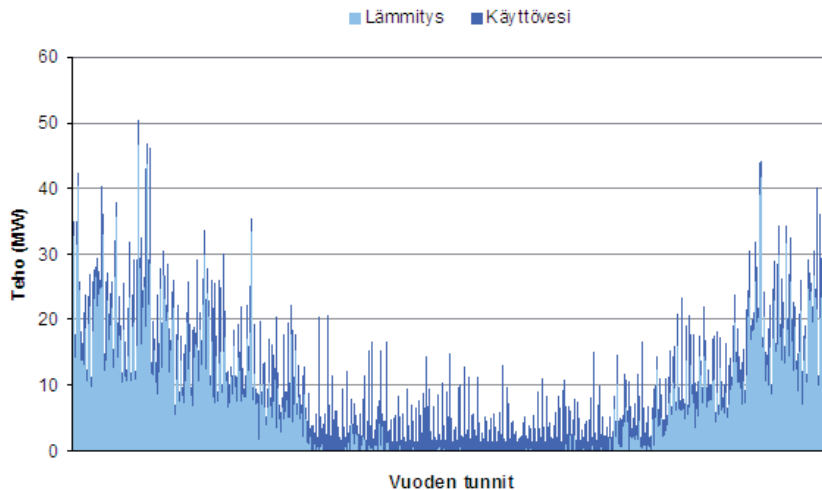
Case-laskenta havainnollisti, että todellisten primäärienergiakertoimien laskeminen vaatii yksityiskohtaista laskentaa. Laskelmien tekeminen edellyttää, että energiantuotannon tekniset tiedot ovat olemassa. Virtuaalitalouksien laskemiseksi on tehtävä erilaisia oletuksia koskien teknisiä ratkaisuja. Lisäksi on valittava allokointimenetelmä, jonka mukaan CHP-tuotannon (mikäli sitä käytetään) polttoaine ja CO<sub>2</sub> -päästöt jaetaan sähkölle ja lämmölle. Todellisuudessa primäärienergiakertoimien laskeminen onkin haasteellinen ja aikaa vievä tehtävä.

Käytännössä esimerkiksi teollisuuden primäärienergiamuunnokset tehdään käyttämällä vakiokertoimia, joita on määritelty normeissa. Niiden käyttö laskelmissa suosii tehoittomia tuotantolaitoksia ja aliarvostaa tehokkaita tuotantolaitoksia.

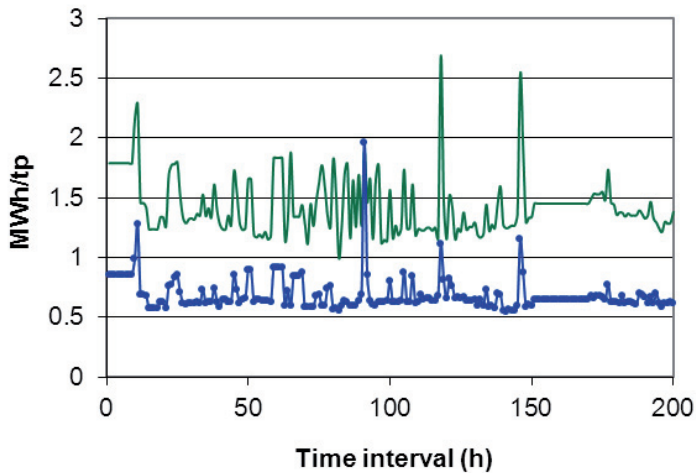
## Energiatehokkuus ilmiönä – kulutuksen vaihtelu

Energiankulutus ei ole koskaan vakio vaan se vaihtelee ajan suhteen. Vaihtelua aiheuttavat muutokset käyttöolosuhteissa ja –tilanteissa. Vaihtelua aiheuttavat:

- Yhdyskuntasektorilla muutokset rakennusten energiankulutuksessa ja liikenteessä
- Rakennukset -sektorilla muutokset vuodenaikojen ja säiden vaihtelussa sekä vaihteluista rakennusten käytössä (kuva 4).
- Teollisuussektorilla muutokset sääolosuhteissa, raaka-aineissa ja kapasiteetin käytösteessä jne. (kuva 5).
- Logistiikassa muutokset sääolosuhteissa, ajotavoissa, jne.
- Energiantuotantosektorilla muutokset mm. polttoaineen laadussa.



Kuva 4. Kaukolämmön tehonvaihtelu (Rämä, EPO-loppuraportti Osa 2).



Kuva 5. Esimerkki sähkön- ja lämmönkulutuksen vaihtelusta paperikoneen kuiva-  
tusosalla (Ahtila et al., 2010).

Vaihtelut aiheuttavat haasteita energiatehokkuuden laskennalle ja seurannalle. Vaihtelun johdosta laskennassa ja seurannassa käsitellään sektorista riippuen esimerkiksi kuukauden kesikulutuservoja.

Myös suunnittelussa on otettava kantaa siihen, miten odotettavissa olevat vaihtelut huomioidaan. Toisilla sektoreilla käytetään suunnittelutyön apuna kehittyneitä simuloimismalleja. Dynaaminen laskenta huomioi vaihteluita.

Taulukossa 5 on esitetty karkea arvio energiatehokkuuden seurannan ja suunnittelun apuvälineiden nykytilasta. Taulukon tiedot perustuvat tutkimuksen aikana syntyneeseen yleiskäsitykseen (ei tutkittu).

*Taulukko 5. Arvio energiatehokkuuden seurannan ja suunnittelun apuvälineiden nykytilasta.*

| <b>Sektori</b>                    | <b>Energiatehokkuuden seuranta</b>   | <b>Energiatehokkuustiedot suunnittelussa</b>  |
|-----------------------------------|--|---|
| Yhdyskunnat                       | Osa kunnista seuraa vuositasolla. Erityisesti kasvihuonekaasupäästöjen seuranta lisääntymässä, myös viikkotasolla. | Suunnittelussa käytetään tilastoituja arvoja sekä simulointia ja mallinnusta. Kunnissa käytössä esim. Kasvener-malli, joka on kuntatason kasvihuonekaasu- ja energiatasemalli.  |
| Rakennukset                       | Pääasiassa kuukausi- ja vuositasolla, on-line seuranta tulossa   | Suunnittelussa käytetään rakennusmääräyksiin perustuvia vähimmäisarvoja sekä simulointia ja mallinnusta. Simuloinnissa on käytössä: (1) kuukausitason laskenta ja (2) dynaaminen tuntitason laskenta. Rakennusmääräysten vähimmäisarvot ovat käytössä lähinnä uudistuotannossa. Palvelut ja käyttöprofiilit mallinetaan käyttötarkoituksen (asuminen, toimisto etc.) mukaisilla standardiprofileilla. |
| Prosessiteollisuus                | On-line seuranta tavoitellaan / seuranta pääasiassa kuukausi- ja vuositasolla                                      | Suunnittelussa käytetään tilastoituja arvoja sekä simulointia ja mallinnusta.   |
| Liikenne ja logistiikka           | Energiatehokkuuden jatkuvaa seuranta lähinnä kuljetusvälinekohtaisesti   | Suunnittelussa käytetään tilastoituja arvoja (esim. kuljetusvälinekohtaiset tiedot) sekä ennustemalleja.  |
| Energiantuotanto (voimalaitokset) | On-line seuranta käytössä. Laskenta on puutteellinen biopolttoainevoimalaitoksissa lämpöarvon vaihtelun vuoksi.    | Suunnittelussa käytetään simulointia ja mallinnusta.  |

## 2. Mittausalueen rajaaminen

### Yleistä

Tarkasteltava kohde rajataan ympäristöstään ennen laskentaa. Rajauksella otetaan kantaa siihen mitä laskelmissa huomioidaan ja mitä jätetään laskennan ulkopuolelle. Energiatieteissä tätä toimenpidettä kutsutaan taserajan (po. energia- ja massataserajan) määrittelyksi. Tarkasteltava alue voidaan rajata usealla eri tavalla. Eri sektoreilla on meneillään standardointityötä liittyen mittausalueiden määrittämiseen.

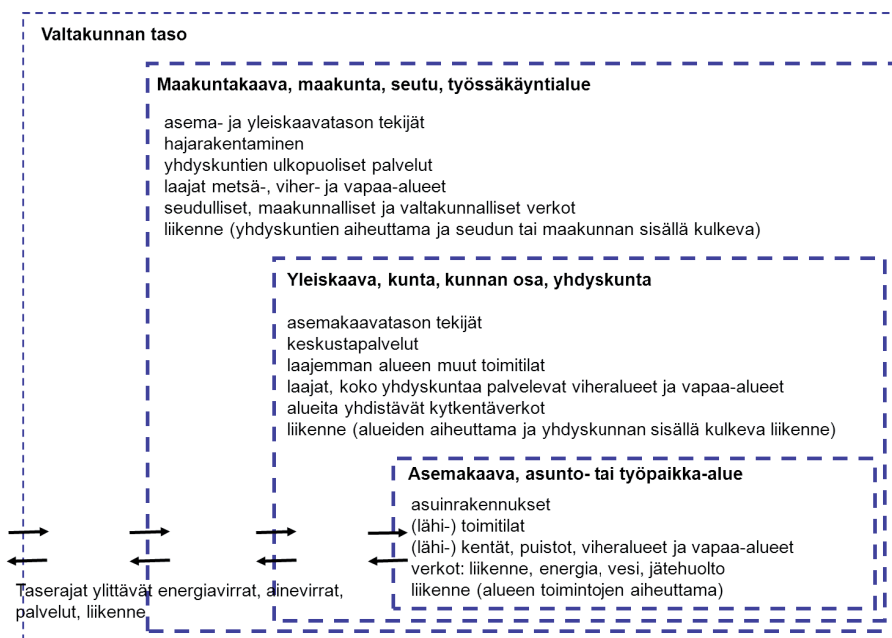
Mittausalue voidaan määrittellä laajaksi tai suppeaksi. Laajin mittausalue voidaan jakaa yhdyskunnissa alueisiin, rakennuksissa huoneistoihin ja teollisuudessa osaprosesseihin. Energiatehokkuus voidaan lisäksi laskea erikseen järjestelmille, kuten esimerkiksi rakennuksissa ilmanvaihtojärjestelmälle ja teollisuudessa paineilmajärjestelmälle. Logistiikassa ja energiantuotannossa toiminnot ovat ketjumaisia. Energiantuotannon ketju käsittää polttoaineen toimituksen (pl. uusiutuvat paitsi bioenergia), energiantuotannon, siirron ja jakelun. Logistiikan toimitusketju koostuu yksilöllisistä vaiheista.

Energiatehokkuuden laskenta eri sektoreilla kytkeytyy toisiinsa. Tämä on laskennan ja arvioimisen suuri haaste. Esimerkiksi teollisuusintegraatin tehdasalueella sijaitseva voimalaitos on kytketty tuotantoprosessin kanssa yhteen ja samalla se on osa koko valtakunnan energiajärjestelmää. Rakennusten energiatehokkuus voi kytkeytyä alueelliseen energiajärjestelmään (lämpöverkko) ja valtakunnalliseen energiajärjestelmään (sähköverkko). Osien välillä vallitsee vuorovaikutuksia, joiden kuvaaminen on haasteellista. Tämä voi johtaa siihen, että tavoiteltavat ratkaisut eivät ole aina kokonaisuuksien kannalta parhaita mahdollisia (osaoptimointi).



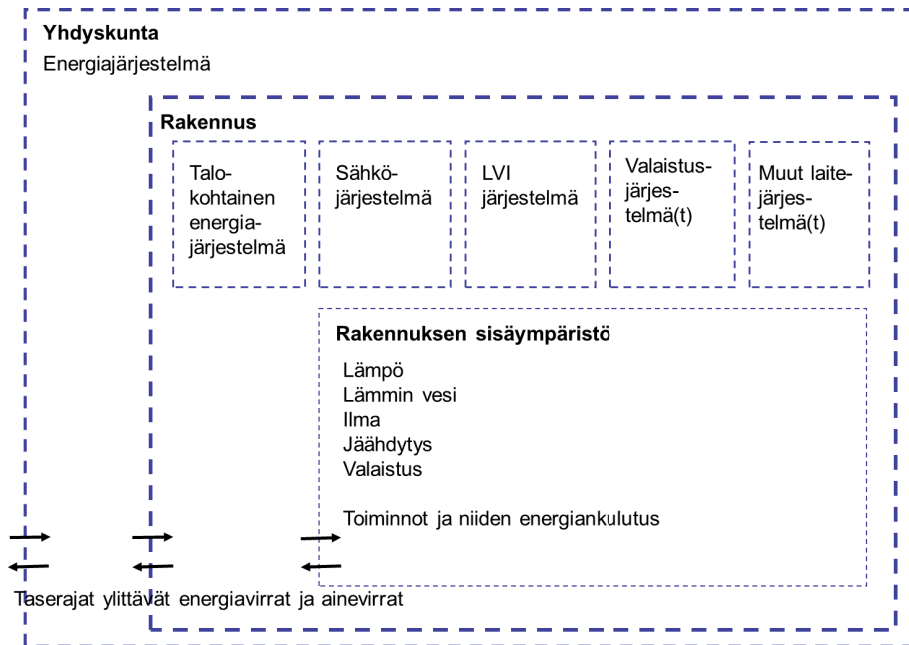
## Sektorikohtaisia laskentarajoja

**Yhdyskunnat** koostuvat rakennuksista, verkostoista ja muista rakenteista (perusrakenteesta) sekä liikenteestä. Liikenteen osalta tarkastellaan toimintojen aiheuttamaa liikennettä, joka voi suuntautua myös rajojen ulkopuolelle. Liikenteen lisäksi yhdyskunnissa on muita taserajoja ylittäviä virtoja. Yhdyskuntasektorin taserajojen määrittelyn perustana voivat olla Suomen alueidenkäytön suunnittelujärjestelmään kuuluvien kaavojen rajaukset eri suunnittelutasoilla, hallinnolliset rajat tai muut alueelliset rajaukset. Toinen mahdollinen taserajojen määrittelyperuste voi olla toiminnallinen, jolloin tarkastelualueina ovat lähiympäristö tai päivittäisympäristö, yhdyskunta tai viikoittaisympäristö, työssäkäyntialue jne. (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 2). Yhdyskunnan energiatahokkuuden mittaamisen alueet (taserajat) on esitetty kuvassa 7.



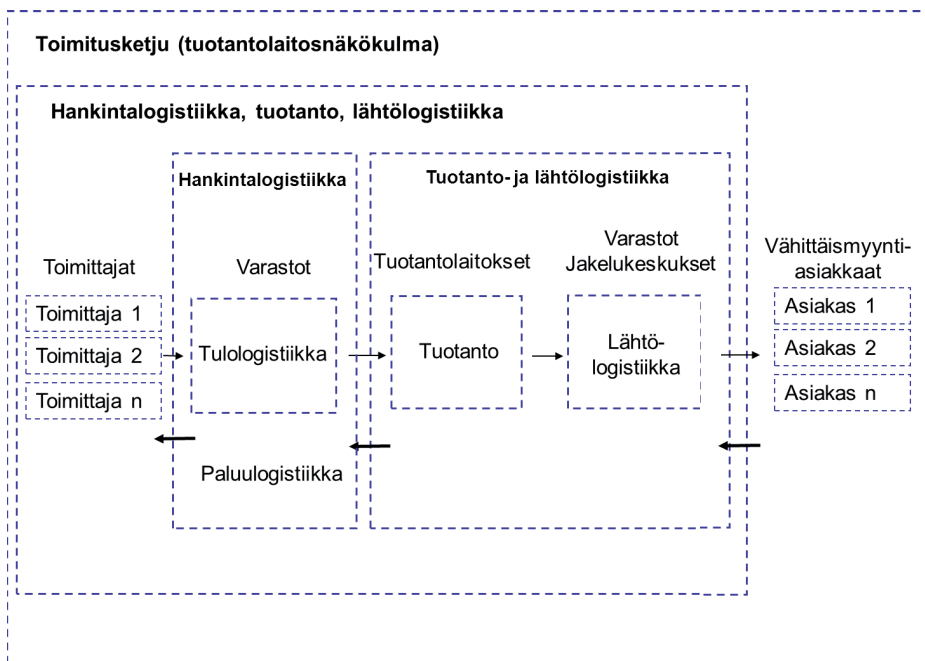
Kuva 7. Yhdyskunnan mittaamisen taserajat (EPO loppuraportti, Osa 3, kpl 2, mukailtu).

**Rakennuksen** päätaserajalle saapuvat ulkoa tulevat energiavirrat: polttoaineet, kaukolämpö, sähkö, suora auringonvalo, ym. (Kuva 8). Päätaserajan sisällä voidaan erottaa erilaisia talokohtaisia järjestelmiä. Järjestelmillä luodaan halutunlainen sisäympäristö ja tuotetaan tarvittavat palvelut. Tarvittaessa järjestelmien tehokkuuksia voidaan tarkastella omina kokonaisuuksinaan. (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 3).



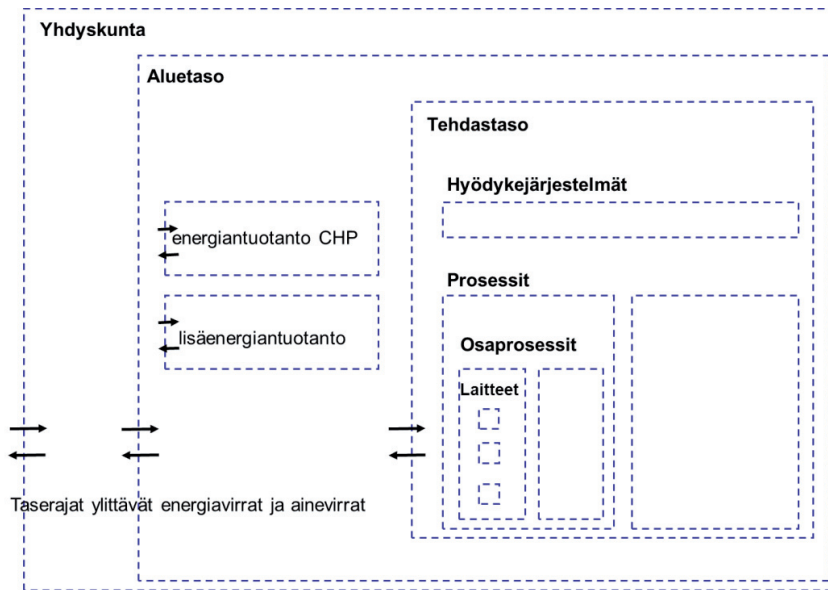
Kuva 8. Rakennuksen mittaamisen taserajat (EPO loppuraportti, Osa 3, kpl 3, mukailtu).

**Logistiikan** energiatehokkuutta voidaan tarkastella tuotannon ja lähtölogistiikan taserajalla, hankinnan, tuotannon ja lähtölogistiikan taserajalla ja toimitusketjun taserajalla. Teollisuusyritykset tarkastelevat energiatehokkuutta tyypillisimmin tuotannon ja lähtölogistiikan taserajalla. Laajimmalla taserajalla energiatehokkuustarkastelu kattaa koko toimitusketjun sisältäen markkinoinnin, toimitukset loppuasiakkaille ja paluulogiistiikan. Energiatehokkuustarkastelun laajuuden kasvaessa laskennasta tulee yhä monimutkaisempi. Laajimpaan tarkasteluun sisältyy kaikki toimitusketjun vaiheet raaka-aineesta asiakkaille tehtäviin toimituksiin asti. (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 4). Logistiikan energiatehokkuuden mittaamisen rajauksia on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Logistiikan mittaamisen taserajat (EPO loppuraportti, Osa 3, kpl 4, mukailtu).

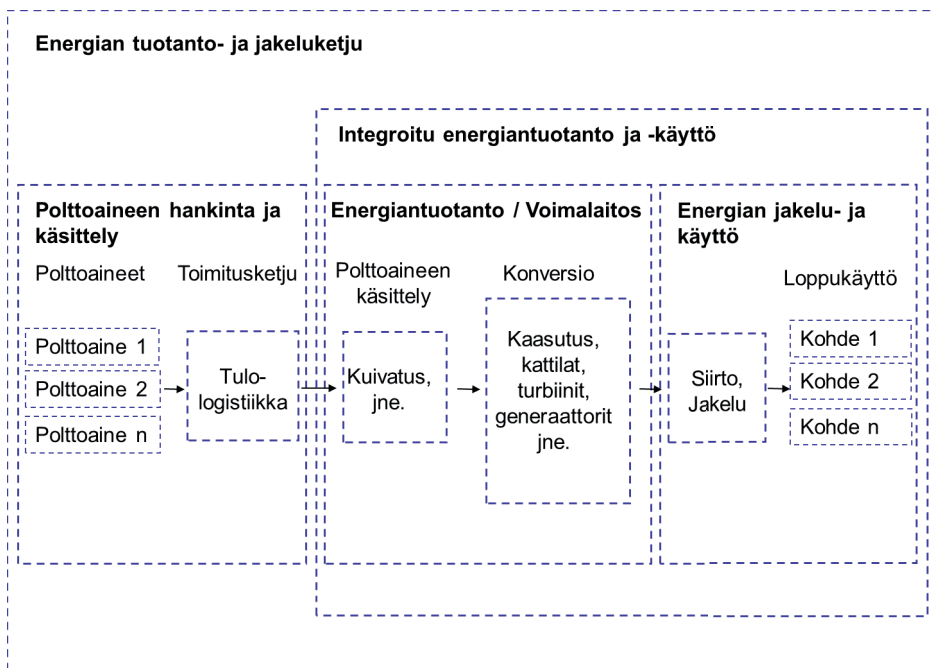
**Teollisuuden** (prosessiteollisuuden) energiatehokkuutta mitataan yleensä tehdastason ominaisenergiankulutuksena (esim. MWh/t). Lisäksi energiatehokkuutta seurataan prosessikohtaisesti (esim. paperiteollisuudessa painehiomo, PGW), osaprosessikohtaisesti (esim. paperikoneen lämmöntalteenottoyksikkö) tai laitekohtaisesti (esim. sähkömoottorit). Prosessiteollisuuden tuotantoprosessi on yleensä integroitu tehdasalueella toimivan voimalaitoksen kanssa ja joskus edelleen läheisen yhdyskunta-alueen kanssa. (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 5). Teollisuuden energiatehokkuuden mittaamisen vaihtoehtoisia rajauksia on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Prosessiteollisuuden mittaamisen taserajat.

**Energiantuotannon** energiatehokkuuden tarkastelu on perinteisesti voimalaitoksien tuotantohyötysuhteiden tarkastelua. Voimalaitokset voivat olla esim. sähköä ja lämpöä tuottavia yhteistuotantolaitoksia (CHP, Combined Heat and Power) tai lämpökattilalaitoksia. Voimalaitoksen sisällä voidaan tarkastella myös osaprosessien kuten kattilan tai kaasutuksen hyötysuhteita. Laitoksen mitoituksen lähtökohtana on energiantarve. (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 1). Tarkastelu tapahtuu siten periaatteessa taserajalla Integroitu energiantuotanto ja – käyttö (kuva 11). Laajin mahdollinen energiaketjutarkastelu ulottuisi polttoaineen hankinnasta energian loppukäyttöön.

Kiinnostus polttoaineketjujen tarkasteluun on kasvanut bioenergian käytön myötä. Tämän johtuu mm. tarpeesta minimoida jalostus- ja kuljetusketjussa tapahtuvia häviöitä ja kiinnostuksesta tarkastella bioenergian kuljettamisen aiheuttamia päästöjä, kun kuljetuskaluston polttoaineet ovat pääasiassa fossiilisia polttoaineita.



Kuva 11. Energiantuotannon mittaamisen taserajat termisissä konversioprosesseissa.

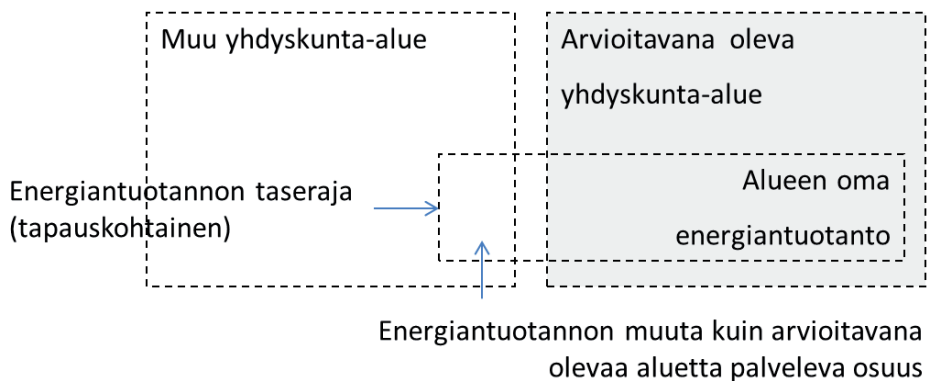
## Energiaa käyttävien sektoreiden kytkentöjä energiantuotantoon

Tutkimuksen neljä energiaa käyttävää sektoria kytkeytyvät energiantuotannon sektoriin. Tästä on keskusteltu kappaleessa ”Energian arvon huomioiminen ja primäärienergiakerroin”.

Kaikki käytetyt energijakeet tulisi muuttaa primäärienergiaksi. Laskelmissa käytetään usein vakiokertoima. Vakiokertoimien käyttö suosii tehottomia tuotantolaitoksia ja aliarvostaa tehokkaita tuotantolaitoksia. Todelliset kertoimet ovat laitoskohtaisia. Primäärienergiakertoimet määräytyvät tapauskohtaisesti energiantuotannon rakenteen perusteella (ks. laskenta esim. EPO loppuraportti, Osa 2).

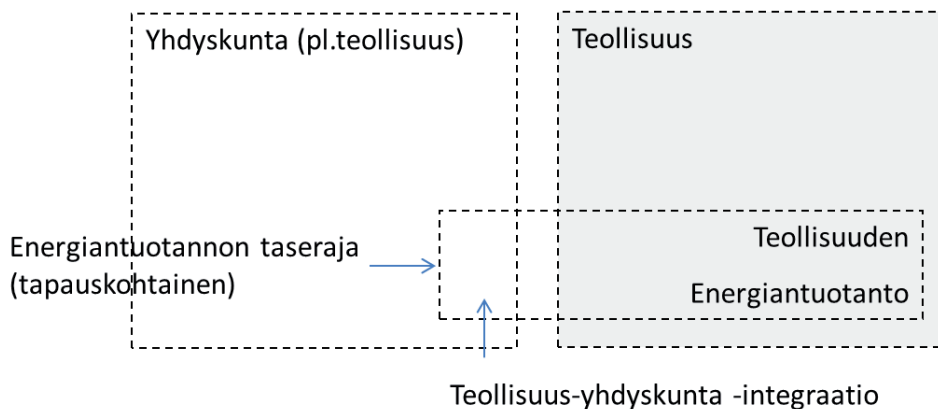
Energiajärjestelmien rakentamisessa voidaan pitää tavoitteena yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon (CHP) maksimoiminen, jonka tuotannon hyötysuhde on huomattavasti korkeampi kuin sähkön (ja myös lämmön) erillistuotannon hyötysuhde.

- **Yhdyskuntien** energiatehokkuuden laskenta kytkeytyy yhteen energiantuotannon tehokkuuden kanssa, kun sen energiankulutus (perusrakenne, rakennukset, liikenne) muutetaan laskelmissa primäärienergiaksi. (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 2). Alueen energiantuotanto voi palvella joko vain kyseistä yhdyskunta-aluetta tai laajempaa kokonaisuutta (kuva 12).



Kuva 12. Yhdyskuntien energiatehokkuuden kytkentä energiajärjestelmän tehokkuuteen.

- **Rakennusten** energiankäyttö muutetaan laskelmissa primäärienergiaksi kuten yhdyskuntienkin osalta. Laskenta vastaa yhdyskuntasektorin laskentaa.
- **Logistiikan** energiatehokkuus tarkastelee logistiikan eri toimintojen muodostamaa ketjua. Alue- ja yhdyskuntarakenne vaikuttaa toimintojen sijoittumiseen ja sitä kautta kuljetustarpeisiin. Kuljetustarpeisiin vaikuttavat myös teollisuuden sijoittumispäätökset. Yksi osa logistiikan energiatehokkuutta on teollisuustuotteiden valmistusvaiheen energiankulutus. (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 4). Kaikkien vaiheiden energiankulutus tulisi muuntaa primäärienergiaksi ennen jakeiden (ja vaiheiden) laskemista yhteen.
- **(Prosessi-) teollisuuden** energiatehokkuuteen voidaan vaikuttaa oleellisesti sillä, miten sen energijärjestelmä suunnitellaan. Energiantuotannon ja – käytön integrointi mahdollistaa tehokkaiden tuotantoratkaisuiden rakentamisen. Teollisuuden tarkastelun taseraja voi kattaa myös yhdyskunta-alueita, jos tuotantolaitoksen voimalaitos huolehtii sekä teollisuusprosessien että yhdyskunnan lämmöntarpeesta (kuva 13). Myös teollisuudessa energiankulutus tulisi muuntaa primäärienergiaksi ennen jakeiden laskemista yhteen.

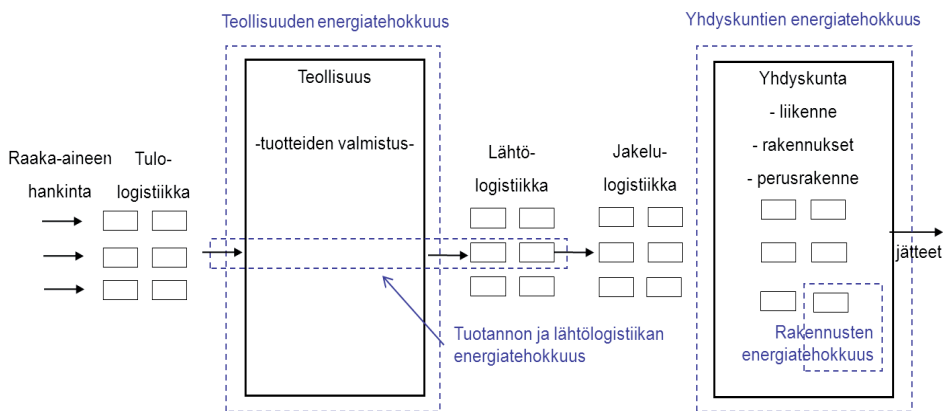


Kuva 13. Teollisuuden energiantuotannon kytkentä yhdyskuntien energiatehokkuuden laskentaan.

## Energiaa käyttävien sektoreiden muodostama kokonaisuus

Yhdyskuntien energiatehokkuutta mitataan tyypillisesti alueidenkäytön suunnittelun yhteydessä eri suunnittelutasoilla: asema-, yleis- ja maakuntakaavoja valmisteltaessa sekä seutujen yhdyskuntarakenteen kehittämissuunnitelmia laadittaessa (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 2). Rakennuksien energiatehokkuutta mitataan rakennuksen ulkoseinien rajaamasta kokonaisuudesta (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 3). Prosessiteollisuudessa energiatehokkuutta mitataan joko tehdastasolla tai tuotannon osista. Logistiikassa energiatehokkuutta mitataan esimerkiksi tuotanto- ja lähtölogistiikan osalta (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 4).

Kaikkien sektoreiden taserajojen samanaikaisella tarkastelulla voidaan havainnollistaa sitä, miten energiatehokkuuden mittaaminen eri sektoreilla kytkeytyy toisiinsa. Kuvassa 14 on esitetty tilanne, joka kuvaa neljän tutkimuksessa mukana olleen energiaa käyttävän sektorin tämänhetkistä tyypillisiä mittaamisen taserajoja.



Kuva 14. Yhdistelmäkuva neljän energiaa käyttävän sektorin taserajakuvaajista. Kuvaan rajatut kokonaisuudet (katkoviivat) edustavat tämän hetken tyypillisiä energiatehokkuuden mittaamisen taserajoja.

Kuvan 14 tarkastelussa on huomioitava, että taserajan asettaminen on valintakysymys, kun energiatehokkuuden mittaaminen voidaan rajata kattamaan pieniä kokonaisuuksia tai se voidaan rajata koskemaan laajoja kokonaisuuksia. Teollisuudessa mittaamista



voidaan laajentaa tehdas- ja aluetason tarkasteluiksi, logistiikassa mittaamista voidaan laajentaa kattamaan suurempi osa toimitusketjua, jne.

Kuvan 14 esitys muuttuu, kun tarkastelua laajennetaan koskemaan laajempaa osaa elinkaaren vaiheita. Laajassa tarkastelussa huomioidaan toimintojen ketju, joka alkaa valmistuksesta ja päättyy käytön jälkeen purkuun tai hävitykseen. Tätä seikkaa käsitellään myöhemmissä kappaleissa ml. kuva 15.

## **Esimerkkejä taserajojen valinnan vaikutuksista**

*Esimerkki yhdyskunnista: alueen sijaintia ei huomioida*

Asuntoalueen energiatehokkuutta tarkastellaan toisinaan vain alueen sisäisten ratkaisuiden osalta. Näissä tarkasteluissa alue voi näyttää energiatehokkaalta rakennusten energianjärjestelmän perusteella. Kuitenkin, mikäli alue sijaitsee irrallaan olemassa olevasta yhdyskuntarakenteesta, etäällä työpaikoista ja palveluista ja liikenne perustuu henkilöautojen käyttöön, arvioinnin ulkopuolelle jätetyt liikenteen vaikutukset voivat olla merkittäviä. Alueen energiatehokkuudesta ja aiheutuvista kasvihuonekaasupäästöistä voidaan saada väärä käsitys ja yhdyskuntarakennetta kehitettäessä voidaan tehdä energiatehokkuuden ja ilmaston kannalta epäedullisia valintoja.

*Esimerkki rakennuksista: lämpöpumput kaukolämpöalueella*

Lämpöpumppujen suosio rakennuksen lämmitysjärjestelmänä on kasvanut. Asukkaan /omistajan kannalta ne osoittautuvat usein taloudellisesti kannattavaksi vaihtoehdoksi. Jos arviointikriteeriksi vaihdetaan primäärienergiankulutus ja CO<sub>2</sub> – päästöt, on tilanteen arvioiminen vaikeampaa. Näin on etenkin silloin, kun lämmitettävä rakennus sijaitsee kaukolämpöalueella, jonne lämpö toimitetaan sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitokselta. Kaukolämmön kulutuksen pienentyessä ja sähkönkulutuksen pysyessä samana (tai kasvaessa), osa sähköstä saatetaan joutua tuottamaan muulla tavalla. Epätoivottavassa tilanteessa se tuotetaan lauhdevoimalla, jonka tuotannon hyötysuhde on yhteistuotannon hyötysuhdetta alhaisempi.

*Esimerkki teollisuudesta: laskennan taserajan vaikutuksia*

Tehtaan ominaisenergiankulutus ( $MWh/t_{\text{tuotanto}}$ ) lasketaan jakamalla laitoksen kokonaisenergiankäyttö tuotannon määrällä. Ominaisenergiankulutuskuluun voidaan vaikuttaa (pientää) siirtämällä esivalmistus- ja jatkokäsittelyvaiheita laskennan ulkopuolelle. Näin tapahtuu, jos tehdas siirtyy ostamaan puolivalmisteita sen sijaan, että valmistaisi ne itse. Tehtaan ominaishiilidioksidipäästöluukuun voidaan vaikuttaa samalla tavoin kuin ominaisenergiankulutuskuluun. Käytännössä tulisi kehittää laskentaohjeistusta ja sääntöjä niin, että tulkinnanvaraa ei synny.

*Esimerkki logistiikasta: laskennan laajentamisesta seuraavia haasteita*

Teollisuusyritykset tarkastelevat toimitusketjua tyypillisimmin taserajalla, joka kattaa tuotannon ja lähtölogistiikan. Jos toimitusketjun hankintaprosessi raaka-aineesta mahdollisiin välituotteisiin ja hankintalogistiikka sisällytetään laskelmiin, ne laajenevat huomattavasti. Laskennan laajentuessa siitä tulee yhä monimutkaisempi toimenpide. Samalla lisääntyä haaste hahmottaa lukujen välisiä eroavaisuuksia.

*Esimerkki energiantuotannosta: polttoaineketjun huomioimisen haaste*

Energiantuotannon energiatehokkuutta voidaan tarkastella pelkän voimalaitoksen osalta tai laajemmin huomioiden koko energiaketju kaikkine vaiheineen. Käytännössä laskelmien laajentaminen esimerkiksi koko polttoaineketjun kattavaksi on vielä vaikeaa. Laajuuden (taserajan) valinnalla on merkitystä etenkin biomassaa hyödyntävissä laitoksissa ja laskelmat tulisikin ulottaa koskemaan mm. polttoaineen kuljetus.

Tarkastelua rajatessa tulisi huomioida koko energiajärjestelmä. Koko maan tasolla on kysymys siitä, miten energiantarve voidaan tyydyttää tehokkaimmalla tavalla (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 1). Esimerkkinä laskennan haasteista voidaan mainita tarkastelut koskien pääkaupunkiseudun energiantuotantoa.

## **3. Elinkaariajattelu osana energiatehokkuutta**

### **Yleistä**

Elinkaariarviointi on yleinen työkalu tuotejärjestelmän elinkaaren aikaisten syötteiden ja tuotosten sekä potentiaalisten ympäristövaikutusten koostamiseksi ja arvioimiseksi (SFS, 2006). Elinkaariarvioinnissa tarkastellaan siis toimintojen ketjua, joka alkaa valmistuksesta ja päättyy käytön jälkeen purkuun tai hävitykseen. Tässä yhteydessä käsitellään elinkaariarvioinnin yhtä osaa, energiankäyttöä.

Elinkaarikysymys on merkittävä tekijä aloilla, joissa energiaa sitoutuu rakenteisiin niiden rakennusaikana (ja tuotteisiin niiden valmistuksen aikana) ja sitä vapautuu niiden purkuvaiheessa. Tämän lisäksi elinkaarikysymykset liittyvät tuotteisiin.

Elinkaarinäkökulman esille tuominen on huomionarvoista etenkin siksi, että energiatehokkuuteen vaikuttamismahdollisuudet ovat kaikilla sektoreilla suurimmat silloin, kun rakenteita ja toimintaa suunnitellaan.

### **Elinkaariajattelu osana sektoreiden mittareita**

#### **Yhdyskunnat**

Elinkaarinäkökulma on oleellisesti mukana yhdyskuntien energiatehokkuus-tarkastelussa. Energiatehokkuutta mitattaessa huomioidaan yhdyskunnan rakenteiden tuottamisen vaatima (rakennusmateriaalien tuotanto) energiamäärä, rakenteiden käytönaikainen energiankulutus sekä yhdyskunnan toimintojen edellyttämän liikenteen energiankulutus. (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 2)

#### **Rakennukset**

Perinteisesti rakennusten energiatehokkuuden seurata kattaa käytön aikaisen energiankulutuksen. Lisäksi rakennusmateriaalien valmistus kuluttaa energiaa ja niihin sitoutuu energiaa. Täten rakennusteollisuuden energiatehokkuus liittyy rakennusten energiatehokkuuteen. Rakennusmateriaaleihin sitoutunutta energiamäärää tarkastellaan elinkaariarvioinneissa, mutta energiatehokkuuslaskelmista se jätetään vielä pääsääntöisesti pois. Käytön aikainen kulutus edustaa yli 80 %:a rakennuksen elinkaaren-

aikaisesta energiankulutuksesta. Tilanne muuttuu vähitellen, kun rakennusten energiatehokkuus paranee ja siirrytään kohti nollaenergiaratkaisuja. (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 3)

## **Logistiikka**

Teollisuusyritykset tarkastelevat energiatehokkuutta tyypillisimmin taserajalla, joka koostuu tuotannosta ja lähtölogistiikasta. Energiaintensiivisessä teollisuudessa lähtölogistiikalla ei ole ollut mittaamisessa kovin suurta painoarvoa. Energiatehokkuuden laskentaa voidaan laajentaa kattamaan myös hankintaprosessin raaka-aineesta mahdollisiin välituotteisiin ja myös hankintalogistiikan. Laajin taseraja sisältää koko toimitusketjun lisäksi tuotteen mahdollisen jatkojalostuksen ja koko elinkaaren aikaisen käytön sekä tuotteen käytöstä poiston ja kierrätyksen. Se edustaa tuotteen koko elinkaarta, jolloin tarkastelu edellyttää suhteellisen paljon lähtötietoja. Laskennan tulokset riippuvat siitä, kuinka paljon välillisiä vaikutuksia laskennassa otetaan huomioon (esim. liikenneinfrastruktuurin rakentaminen ja ylläpito). (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 4)

## **Prosesseiteollisuus**

Energiatehokkuutta mitataan laitoksen operointivaiheessa. Laskelmissa ei huomioida muita laitoksen elinkaaren vaiheita kuten rakentamisvaihetta (rakenteisiin sitoutuva energiamäärä), joka on valmistusprossin energiankulutukseen suhteutettuna pieni. Tehdaslaitos koostuu toisiinsa kytketyistä osista. Energiatehokkuuden seurannan haasteena on järjestelmiä ja osaprosesseja kuvaavien tehokkuuslukujen kytkeminen koko laitosta kuvaaviksi luvuiksi. Haastetta lisää se, että puolivalmisteita voidaan hankkia prosessiin sen eri vaiheissa ja että jatkojalostusta voi tapahtua joko prosessin jatkeena tai erikseen. (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 5)

Elinkaarinäkökulma liittyy myös teollisuuden tuotteisiin. Joissain prosesseissa osa energiankulutuksesta sitoutuu tuotteisiin niiden valmistuksen aikana. Kiinnostus tämän energiamäärän tarkasteluun on kasvanut hiilijalanjäljen laskennan yleistyessä. (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 5)

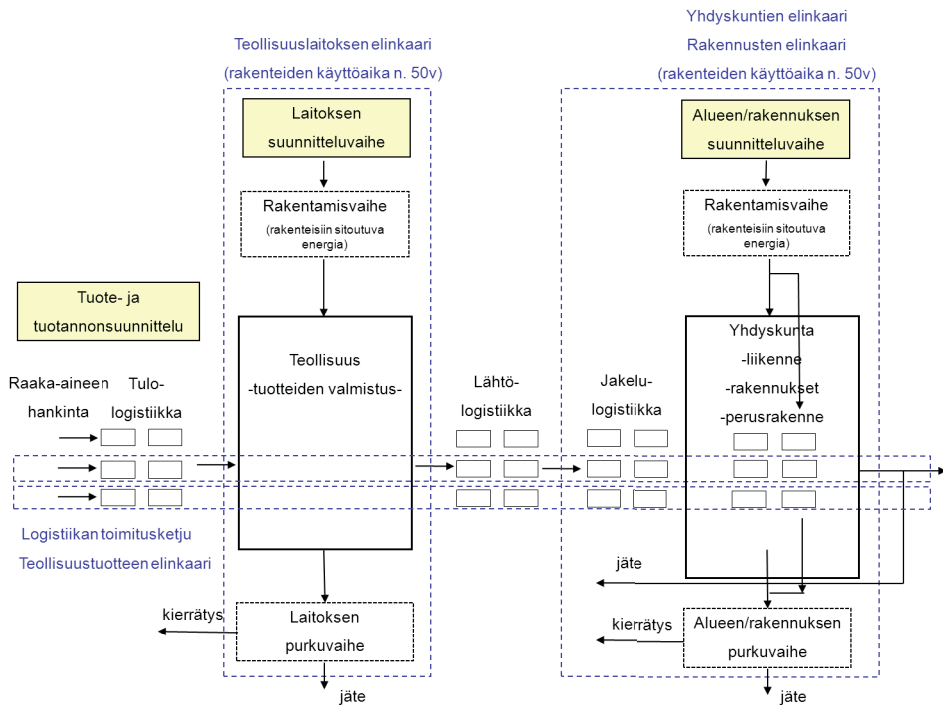
## **Energiantuotanto**

Energiatehokkuuden mittaamisen pääpaino on laitoksen tehokkuuden (hyötysuhde) mittaamisessa. Laskelmissa ei huomioida laitoksen rakentamisen aikana rakenteisiin sitoutuvaa energiamäärää. (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 1)

## Sektoreiden yhteistarkastelu elinkaarinäkökohdat huomioiden

Kuvassa 15 on esitetty mittaamisen taserajoja silloin, kun energiatehokkuustarkastelu laajennetaan huomioimaan rakenteisiin niiden rakennusaikana sitoutuvan ja purkuvaiheessa niistä vapautuvan energiamäärän. Yhdyskuntien energiatehokkuusluku huomioi jo nykyisin rakenteisiin sitoutuneen l. rakennusmateriaalien tuotannon edellyttämän energiamäärän (ks. mittarit, kpl 2). Tällä sektorilla tarkastelun laajennus tarkoittaisi rakenteista sen purkuvaiheessa vapautuvan energiamäärän huomioimisen. Rakennuksissa elinkaarinäkökulman huomioiminen edellyttäisi niin ikään rakenteisiin sitoutuvan ja niistä käytön jälkeen vapautuvan energiamäärän huomioimisen. Teollisuudessa ja energiantuotannossa voitaisiin myös tarkastella tuotantolaitoksien rakenteisiin sitoutuvia energiamääriä. Tämänkaltaisilla laskelmilla on kuitenkin käytännössä vähäinen rooli. (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 1-5).

Kuvaan 15 on yhdistetty myös tuotteiden elinkaari. Tutkimussektoreista tämä näkökulma liittyy läheisesti logistiikan energiatehokkuuteen. Myös teollisuudessa voidaan tarkastella tuotteen elinkaarta, jolloin arviointi kattaa kaikki vaiheet tuotteiden valmistuksesta sen kierrättämiseen tai hävittämiseen.



Kuva 15. Yhdistelmäkuva neljän energiaa käyttävän sektorin taserajakuvaajista silloin, kun energiatehokkuustarkasteluita laajennetaan huomioimaan elinkaarinäkökulmat.

## 4. Energiatehokkuuden parannuspotentiaali

### Potentiaalilaskennan periaatteet ja avoimet kysymykset

#### Vertailutilanteen asettaminen

Energiatehokkuuspotentiaali on ero energiankulutuksessa kahden vaihtoehdon välillä. Se tarkoittaa useimmiten eroa nykytilanteen ja vertailutilanteen välillä. Vertailutilanne voi olla 1) hyvä tai paras käytäntö tai 2) ideaalutilanne.

Hyvää tai parasta käytäntöä edustaa esimerkiksi BAT (Best Available Technology). Tämän vaihtoehdon haaste on määrittää sellainen samankaltainen kohde, johon vertailu on mielekästä suorittaa (taseraja, muut ominaisuudet). Lisäksi esimerkiksi paras nykykäytäntö ei ole vakio vaan muuttuu ajan mukana.

Idealutilanne voi olla esimerkiksi teollisuudessa teoreettinen minimikulutus (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 5). Idealutilanteen määrittäminen on etenkin laskentatekninen haaste, mutta käsite voi olla toisilla aloilla jopa soveltumaton. Esimerkiksi yhdyskunnissa ja logistiikassa energiankulutuksen minimin laskeminen ei ole tarkoituksenmukaista (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 2 ja 4). Teollisuudessa ja energiantuotannossa idealutilan määrittäminen on periaatteessa mahdollista, mutta siihen ei ole käytännön valmiuksia vielä (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 5). Rakennussektorilla lienee tutkimuksen sektoreista parhaat edellytykset minimienergiankulutuksen laskentaan (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 3).

#### Laskennan tämänhetkiset mahdollisuudet

Potentiaalilaskennan haaste kulminoituu tavoitetilan eli vertailutilanteen määrittämiseen. Vertailutilanteen määrittämiseen tai laskemiseen ei millään viidellä sektorilla ole olemassa yleisesti hyväksyttyä, käytössä olevaa menettelytapaa ja siksi käytännöt vaihtelevat. Yhdyskuntien ja logistiikan sektoreille käsite "idealutilanne" ei edes sovellu hyvin, ja korkeintaan se voidaan määrittellä tilanteena, josta aiheutuu ”mahdollisimman vähän haitallisia vaikutuksia”. Energiatehokkuuden potentiaalilaskentatavat ovat siis vielä kehityksen alkutaipaleella. Laskennan apuvälineeksi on toistaiseksi olemassa vasta yksittäisiä laskentatyökaluja, joita voidaan käyttää sektorikohtaisiin tarkasteluihin.

Energiatehokkuuden potentiaalien kannalta elinkaarinäkökulmalla on oleellinen merkitys. Kaikilla sektoreilla vaikutusmahdollisuus potentiaalihin hyödyntämiseen on suurin silloin, kun rakenteita ja toimintaa suunnitellaan. Esimerkiksi hajautunutta yhdyskuntarakennetta on vaikea korjata myöhemmin.

### **Energia- vs. hiilidioksidipotentiaali**

Energiatehokkuuspotentiaalia tulee ensisijaisesti tarkastella energiankulutuslukujen avulla ( $J/(as+tp)$ ; MWh/t, jne.). Arviointia perustuen hiilidioksidipäästöihin (tai vaihtoehtoisesti kasvihuonekaasupäästöihin) voi käyttää tukevana ja täydentävänä menetelmänä. Pelkästään hiilidioksiditehokkuuden tarkastelu ei ole suositeltavaa, sillä se ei ole yksiselitteistä. Tämä johtuu etenkin bioenergiaa koskevista sopimuksista, joiden mukaan bioenergia lasketaan hiilidioksidineutraaliksi polttoaineeksi (v. 2011).

Käytännössä myös hiilineutraalin energian säästön tulee olla tavoiteltavaa. Primäärienergiensäästön asettaminen ensisijaiseksi tavoitteeksi korostaa tätä seikkaa. Näin ei tehdä virheellisiä johtopäätöksiä energiatehokkuudesta tilanteessa, jossa hiilidioksidipäästöt pienenevät, mutta primäärienergiankulutus pysyy samana. Edellä mainittu tilanne on esimerkiksi silloin, kun voimalaitos korvaa fossiilista polttoainetta biopolttoaineella.

Uusiutuvan energian säästö on tärkeää, koska kaikki mahdollinen uusiutuva energia tarvitaan korvaamaan uusiutumattomia energiamuotoja. Lisäksi tuotantokapasiteetin rakentaminen kuluttaa muita arvokkaita resursseja kuten metallit ja jalometallit, joiden säästäminen on aina tavoiteltavaa.

### **Energiatehokkuuden edistämiseen liittyvää problematiikkaa**

Energiatehokkuuden parantamisen yhteydessä käydään keskustelua myös ns. rebound ja backfire -ilmiöistä. Pidetään mahdollisena, että tehokkuuden kasvun myötä ei saavutettaisi vastaavaa energiankulutuksen laskua. Tutkijat ovat esittäneet, että tehokkaampi energian käyttö saattaa johtaa suurempaan energian kulutukseen (rebound) (esim. Madlener ja Alcott, 2009; Hanley et al., 2009; EPO loppuraportti, osa 3, kpl 3) ja että tehokkuuden myötä energiankulutus voi nousta korkeammalle tasolle kuin mitä se olisi ollut ilman tehokkuusparannuksia (backfire). Asiasta ei kuitenkaan vallitse tutkijoiden keskuudessa täyttä yksimielisyyttä. Asian tarkempi selvittely ei ollut myöskään osana EPO-tutkimuksen asialistalla.



## **Päätöksenteko elinkaaren eri vaiheissa**

Vaikutusmahdollisuus potentiaalin hyödyntämiseen on suurin elinkaaren alussa, jolloin tehdään päätökset koskien rakenteellisia ratkaisuita. Sektoreilla on myös tunnistettavissa erilaisia päätöksentekijöitä ja päätöksentekoryhmiä, jotka vaikuttavat siihen miten energiatehokkuus yhteiskunnassa edistyy.

### **Yhdyskunnat**

#### *Energiatehokkuuden kannalta merkittävä elinkaaren vaihe*

Suunnitteluvaiheella on oleellinen merkitys yhdyskuntien energiatehokkuuteen. Yhdyskuntarakenne on pitkäikäinen ja suunnitteluvaiheessa tehdyt ratkaisut vaikuttavat kauas tulevaisuuteen. Yleispiirteisessä suunnittelussa määritellään keskeiset ratkaisut. Yksityiskohtaisessa suunnittelussa ja myöhemmissä vaiheissa ei pystytä yleensä enää muuttamaan aikaisemmin tehtyjä valintoja. Rakenteiden energiankäyttöä mitataan yleensä ajanjaksolta, joka usein on noin 50 vuotta. Käytännössä yhdyskuntien elinkaari on huomattavasti tätäkin pidempi. Yhdyskunnat rakentuvat pitkien aikojen kuluessa ja ovat jatkuvassa muutoksen tilassa. (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 2)

#### *Energiatehokkuuteen liittyvät päätöksentekijät*

Alue- ja yhdyskuntarakenteen muutokset vaikuttavat energiankäyttöön ja kasvihuonekaasupäästöihin kahdella tavalla: 1) suoraan rakenteiden (rakennusten, verkostojen ja muiden rakenteiden) määrän ja sijainnin sekä toimintojen välisen liikenteen kautta, ja 2) muiden, mm. elintasoon, autoistumiseen ja kuljetusmääriin liittyvien muutosten sekä näiden muutosten yhteis- ja kerrannaisvaikutusten kautta. Nämä ilmenevät esimerkiksi kulkutapajakaumassa, missä autoistuminen kasvattaa henkilöautojen osuutta liikenteessä. Se taas luo edellytyksiä yhdyskuntarakenteen hajautumiseen, mikä puolestaan lisää edelleen henkilöautojen käyttöä. Alueidenkäytön suunnittelussa keskeisiä päätöksentekijöitä ovat kunnat, joilla on rooli myös maakuntien liitoissa. Kunnat laativat ja hyväksyvät asema- ja yleiskaavat. Maakuntakaavat laaditaan ja hyväksytään maakuntien liitoissa ja ne vahvistetaan ympäristöministeriössä. Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskukset ohjaavat kuntien osaltaan kuntien kaavoitusta. (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 2)

## **Rakennukset**

### *Energiatehokkuuden kannalta merkittävä elinkaaren vaihe*

Suurin osa rakennuksen energiankulutuksesta lyödään lukkoon suunnitteluvaiheessa tehdyillä ratkaisuilla. Lisäpanostukset rakennuskuluissa voivat mahdollistaa merkittävät säästöt käytön aikaisessa energiankulutuksessa. (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 3)

### *Energiatehokkuuteen liittyvät päätöksentekijät*

Rakennussektorilla voidaan tunnistaa useita päätöksentekotasoja: viranomainen, urakoitsija ja alihankkijat, rakennuttaja, omistaja, käyttäjä, (rakennuksessa asioiva) asiakas, energiayhtiö sekä hallinta- ja huolto-yhtiö. Pääsääntöisesti jokaisella sidosryhmällä on erilaiset tavoitteet toimia asian edistämiseksi. (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 3)

## **Logistiikka**

### *Energiatehokkuuden kannalta merkittävä elinkaaren vaihe*

Logistiikan energiatehokkuus riippuu ensisijaisesti teollisuuden ja kaupan toimintojen asettamista vaatimuksista. Logistiikan energiankäyttö on sidoksissa yritysten hierarkisiin päätöksentekoprosesseihin. Siirryttäessä hierarkiatasolla alemmas mahdollisuudet energiatehokkuuden parantamiseen pienenevät. (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 4)

### *Energiatehokkuuteen liittyvät päätöksentekijät*

Strategisella tasolla tehdyt päätökset rajaavat myöhemmissä vaiheissa tehtäviä taktisia ja operatiivisia päätöksiä. Strategiset päätökset liittyvät esimerkiksi tuotesuunnitteluun ja tuotevalikoimaan. Nämä ohjaavat toimitusketjun rakennetta ja hallinnointia. Toimitusketjun rakenne puolestaan rajaa kuljetuserien, toimitustapojen ja yksittäisen kuljetuksen suunnittelun mahdollisuuksia. Energiankulutus riippuu kuljetussuoritteiden lisäksi esimerkiksi käytettävästä kuljetusmuodosta ja toimitusten eräkoosta. (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 4)

## **Prosessiteollisuus ja energiantuotanto**

### *Energiatehokkuuden kannalta merkittävä elinkaaren vaihe*

Tuotantolaitoksen elinkaaren vaiheet voidaan jakaa seuraavasti: konseptisuunnittelu, suunnittelu, rakentaminen ja käynnistys, käyttö, kunnostus ja laitoksen purku. Energiatehokkuuden edistämisen kannalta merkityksellisiä ovat suunnitteluvaiheet, käyttövaihe sekä korjaus/ kunnostusvaihe. Energiantuotantolaitoksen suunnittelussa tehdään ratkaisevat päätökset koskien laitoksen hyötysuhdetta. (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 1 ja 5)

Uudet laitokset ovat energiatehokkaampia kuin vanhat laitokset. Kokonaan uusia laitoksia on viime aikoina rakennettu pääsääntöisesti lähelle kehittyviä markkinoita tai halpoja raaka-ainelähteitä.

### *Energiatehokkuuteen liittyvät päätöksentekijät*

Valmisteilla olevan laitoksen energiatehokkuuteen vaikuttavat kaikki suunnitteluprosessiin osallistuvat henkilöt. Laitoksen käytönaikaiseen energiatehokkuuteen vaikuttavat kaikki henkilöt johdosta (tavoitteet, osaamisen kehittäminen, investoinnit, jne.) operaattoreihin (prosessien ohjaus) ja huoltajiin.

## **Grande Case – laskentaesimerkin tulokset**

### **Työn tavoite**

Tutkimuksen aikana suoritettiin kokeilulaskelma energiatehokkuuspotentiaalin laske-  
miseksi. Tässä ns. Grande Case – laskennassa sovellettiin sektorikohtaisien töiden tu-  
loksena löydettyjä ja kehitettyjä energiatehokkuuden mittareita yhdessä yhteisessä koh-  
teessa (ks. EPO-loppuraportti, osa 2).

Laskennan avulla haluttiin arvioida mittareiden soveltuvuutta käytäntöön, arvioida  
mahdollisuuksia eri mittareiden yhdistämiseen ja arvioida mittareiden soveltuvuutta  
energiatehokkuuden potentiaalilaskentaan. Lisäksi haluttiin tuottaa mallilaskelma yh-  
den yhdyskunta-alueen energiatehokkuuden potentiaalista. Tuloksen avulla arvioitiin  
myös ilmasto- ja energiatavoitteita.

Laskelmassa vertailtiin erilaisia vaihtoehtoja koskien rakennusten energiatehokkuutta, energian siirtoa ja jakelua, energiantuotantoa ja yhdyskuntarakenteellista sijaintia (liikennettä ja asutuksen ominaisuuksia). Tutkittavien vaihtoehtojen avulla laskettiin kohdealueen energiatehokkuus kolmella eri mittarilla tutkittuna: absoluuttisina lukui-  
na (GWh/a, CO<sub>2</sub>-ekv.t/a), kerrosalaa kohden laskettuina (kWh/k-m<sup>2</sup>,a; CO<sub>2</sub>-ekv.t/k-  
m<sup>2</sup>,a) ja asukas- ja työpaikkamäärää kohden laskettuina (MWh/(as+tp),a; CO<sub>2</sub>-  
ekv.t/(as+tp),a).

## **Laskentakohde ja -vaihtoehdot**

Tarkastelun kohteena oli Helsingin Kalasatama. Alueelle oli laadittu osayleiskaava, jossa määritellään, mitä alueelle rakennetaan.

Jokainen sektori laati omat laskentavaihtoehdonsa. Rakennusten energiankulutuksesta laadittiin kolme skenaariota: nykyinen rakentamistapa, passiivitalot ja nettonollaenergiatalot. Nykyinen rakentamistapa valittiin vertailutapaukseksi. Energian siirtojärjestelmien osalta tarkasteltiin energianjakeluverkkoa kahdessa tapauksessa: nykyinen rakentamistapa ja passiivitalot. Molemmista vaihtoehdoista tarkasteltiin kahta lämmitysvaihtoehtoa: nykyinen rakennustavan tapauksessa normaali kaukolämpöjärjestelmä ja passiivitalojen tapauksessa matalalämpötilajärjestelmä. Nykyisen rakennustavan tapauksessa tutkittiin myös kaukojäähdytystä. Lisäksi osalla aluetta tarkasteltiin ”lähes nollaenergiatalojen” toteutusta. Teollisuuden osuudessa tarkasteltiin energiantuotannon tehokkuuden ja teollisuuden energiatehokkuuden tunnuslukuja. Koelaskennassa alueelle tuotiin biojalostamo, joka kytkettiin yhdyskunnan yhteyteen. Asukkaiden liik-  
kumista vertailtiin kolmessa tapauksessa, joista perusvaihtoehdon muodosti Kalasataman rakentaminen suunnitelman mukaisesti. Tätä verrattiin tapaukseen, että Kalasataman asuntoja ei rakennettaisi ja asukkaat sijoittuisivat muualle ja tapaukseen, että Kalasataman aluetehokkuus toteutuisi pienempänä ja osa asukkaista sijoittuisi muualle. Kaikissa vaihtoehdoissa Kalasataman toimitilat toteutuisivat suunnitelmien mukaisesti. Muualle sijoittuvien asukkaiden osalta oletettiin asuntoalueiden ominaisuuksien vastaavan nykyisiä samoilla yhdyskuntarakenteisilla vyöhykkeillä olevia alueita. Yhdyskuntatason tarkastelun kohteena on rakennusten, verkostojen ja muiden rakenteiden sekä liikenteen muodostama kokonaisuus.

## Työn suoritus

Kukin tyyppitalo mallinnettiin dynaamisella simuloinnilla energiankäytön (lämmitys, sähkö ja jäähdytys) tuntitason tehovaihtelun kuvaamiseksi. Tätä varten valittiin edustavat tyyppirakennukset (asuinkeuhkotalo, pientalo, toimistot sekä päiväkodit ja julkiset palvelut). Tuloksena saatiin rakennusten nettoenergiankulutus vuodessa ( $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{a}$ ). Simulointitulokset laskettiin myös tuntikohtaisesti, kaukolämmityksen tapauksessa käyttövesi ja lämmitys eroteltuna. Lisäksi tuloksia tarkasteltiin muilla hankkeessa kehitetyillä mittareilla.

Rakennusten kulutustietoja (vain valituista laskentatapauksista) hyödynnettiin alueen kaukolämmitys- ja kaukojäähdytysjärjestelmän tarkastelussa. Järjestelmien tehokkuutta tutkittiin verkkomallilla. Tuloksena saatiin kaukolämpöjärjestelmän lämpöhäviöt, pumppauksen tarve ja ns. suhteelliset lämpöhäviöt.

Lopulliset energiankulutustiedot hyödynnettiin energiantuotannon ja teollisuuden osuudessa. Tavoitteena oli laskea energiantuotannon primäärienergia ja  $\text{CO}_2$ -päästöt normaalin ja alennetun kaukolämpöveden lämpötilan tapauksessa. Laskennassa arvioitiin yhteensä kahdeksan erilaisen energiantuotantovaihtoehdon vaikutuksia.

Liikkumisen energiatehokkuutta tutkittiin vertailemalla Kalasataman sijaintia asukkaiden sijoittumiseen muualle Helsingin seudulle. Asukkaiden liikkumistottumuksia arvioitiin soveltaen ns. yhdyskuntarakenteen vyöhykemenetelmää.

Yhdyskunnan tarkastelu yhdisti kaikkien viiden sektorin tarkastelut yhdeksi kokonaisuudeksi. Laskennassa huomioitiin: perusrakenteeseen sitoutunut energia, rakennuksiin sitoutunut energia, rakenteiden käytönaikainen energia ja liikenteen energiankulutus. Rakenteisiin sitoutunut energia jaettiin 50 vuoden ajalle. Tuloksia tarkasteltiin kolmella eri mittarilla: absoluuttisina ( $\text{GWh}/\text{a}$ ,  $\text{CO}_2\text{-ekv.t}/\text{a}$ ), kerrosalaa kohden laskettuina ( $\text{kWh}/\text{k-m}^2,\text{a}$ ,  $\text{CO}_2\text{-ekv.t}/\text{k-m}^2,\text{a}$ ) ja asukas- ja työpaikkamäärää kohden laskettuina ( $\text{MWh}/(\text{as+tp}),\text{a}$ ,  $\text{CO}_2\text{-ekv.t}/(\text{as+tp}),\text{a}$ ). Lopputulosta arvioitiin yhteensä kuudessa laskentatapauksessa.

## Tulokset ja johtopäätökset

Grande Case-laskenta vahvisti, että tutkimuksessa löydetty ja kehitetyt mittarit soveltuvat hyvin käytäntöön. Laskenta osoitti myös, että eri sektoreiden mittareita voidaan käyttää samanaikaisesti valitun kohteen energiatehokkuuden tarkastelussa. Mittareita

den käyttö eri laskentatapausten vertailussa mahdollistaa energiatehokkuuden potentiaalın arvioimisen. Case-laskennan tyyppisellä tarkastelulla voidaan myös arvioida vuoden 2050 ilmasto- ja energiatavoitetta (päästövähennys 80 %).

Laskentatuloksen mukaan energiatehokkuuden parantamispotentiaali tutkituissa vaihtoehdossa oli enimmillään lähes 80 %. Tuloksen tulkinnassa on kuitenkin huomioitava, että tutkitut vaihtoehdot olivat useassa suhteessa keskenään erilaisia. Energiatehokkaimman Kalasatamassa sijaitsevan vaihtoehdon rakennukset olivat lähes nolla-energiataloja kun taas haja-asutusalueen, jonne osa asuinrakennuskannasta sijoitettiin, rakentamistavaksi oletettiin vuoden 2010 rakentamistapa. Lisäksi haja-asutusalueiden talot oletettiin lämmitettäväksi maalämmöllä (70 %) ja sähköllä (30 %). Näillä alueilla rakennukset oletettiin omakotitaloiksi ja niiden asumisväljyys suuremmaksi kuin Kalasatamassa. Alueelle tyypillisen pienemmän energiatehokkuuden vuoksi niiden verkostot ja muut rakenteet ovat laajempia kuin Kalasatamassa. Alueisiin liitetyt ominaisuudet vastaavat suurin piirtein nykyisiä ja vuodelle 2030 arvioituja olosuhteita. Rakennusten energiatehokkuuden parantuessa myös näillä alueilla kokonaisenergiatehokkuus paranee. Tällöin liikenteen merkitys korostuu entisestään.

Kalasatama sijaitsee keskeisesti yhdyskuntarakenteessa, jossa on tehokas ja vähän päästöjä aiheuttava liikennejärjestelmä. Asukkaiden liikkuminen perustuu alueen hyvän sijainnin vuoksi kävelyyn ja pyöräilyyn sekä tehokkaaseen joukkoliikenteeseen. Erilaisten tekijöiden vaikutuksien arvioimiseksi laskennassa vertailtiin kokonaisarvion lisäksi erikseen yhdyskuntarakenteellisten vaihtoehtojen eroja ja Kalasataman sisällä rakennusten rakentamistavan ja energiajärjestelmien tuomia eroja. Arvioinnin perusteella todettiin sekä yhdyskuntarakenteellisella sijainnilla että alueen sisäisillä ratkaisuilla olevan merkitystä energiatehokkuuden kannalta.

Energiatehokkaimman vaihtoehdon voidaan siis katsoa edustavan parasta mahdollista tilannetta. Passiivitalo- ja aurinkoenergia (nettonollaenergia) -ratkaisut parantavat energiatehokkuutta merkittävästi. Laskenta vahvisti, että rakennusten energiatehokkuuden parantuessa materiaaleihin sitoutuneen energian suhteellinen osuus kasvaa.

Alueen oma biomassaa käyttävä sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitos vähentää päästöjä, mutta suhteellisen pienen kokonsa vuoksi ei saavuta suurten laitosten hyötysuhdetta. Pienin primäärienergiakerroin oli sellaisessa järjestelmässä, joka edustaa suurta kokoluokkaa. Hiilidioksidipäästöt määräytyvät pääasiassa siitä, mikä on biomassan käytön osuus.

Biojalostamon (FT, Fischer Tropsch) ylimääräisen lämmön hyödyntäminen parantaa laskennallisesti alueen lämmön primäärienergiankulutusta. Kokonaisuuden arvioiminen on kuitenkin vaikeaa. Kattavassa energiatehokkuustarkastelussa tulisi huomioida se seikka, että biojalostamon myötä alueen sähkönkäyttö kasvaa. Kokonaisuutta tarkasteltaessa pitää myös huomioida, että alueen ”tuotos” ei enää koostu asunnoista ja työpaikoista vaan myös biodieselin tuotannosta. Alueelle toimitetaan myös puuta, jonka seurauksena liikenne voi kasvaa ja sen päästöt lisääntyä. Laaditussa kokonaisarviossa jätettiin FT-laitoksen oman tuotteen valmistamisen edellyttämä sähkönkäyttö tarkastelun ulkopuolelle.

Yleisenä johtopäätöksenä on, että kehitettyjä menetelmiä voidaan hyödyntää koko Suomea koskevissa arvioinneissa. Koko Suomen energiatehokkuuden parantamispotentiaaleja voidaan arvioida kahdella tavalla: 1) (perinteisesti) sektoreittain ja 2) aluekohtaisesti koelaskennan tavoin. Sektorikohtaisen laskennan haasteita on, että tulosten yhdistäminen ja johtopäätösten tekeminen voi olla vaikeaa. Eri sektoreiden yhteistarkastelussa voidaan arvioida eri komponenttien vaikutuksia. Näitä ovat yhdyskuntarakenteellinen sijainti, toimintojen sijoittelu, rakennusten energiatehokkuus, energiajärjestelmien ja energiantuotannon tehokkuus.

## **Laskentaan liittyviä käytännön haasteita**

### **Muiden kriteerien huomioiminen**

*Esimerkki rakennuksista – kriteerit rakennuksen peruskorjauksen arvioimiseen*

Kun rakennus peruskorjataan sen energiankulutus saattaa kasvaa esim. jos ilmanvaihtoa parannetaan. Tässä tapauksessa sisäilmaston laatu paranee, mutta energiankulutus kasvaa.

*Esimerkki prosessiteollisuudesta – kuidun talteenotto*

Teollisuudessa joissain tilanteissa toisen kriteerin arvon parantaminen voi johtaa toisen heikkenemiseen. Esimerkiksi paperiteollisuudessa kuidun talteenotto sisäisiä kiertoja ja suodatuksia lisäämällä voi johtaa sähkönkulutuksen kasvuun.

### *Esimerkki energiantuotannosta – turpeen käytön hyödyt ja haitat*

Turpeen käytöstä luopumista puoltaa sen korkea hiilidioksidipäästökerroin. Toisaalta sen käyttöä puoltavat huoltovarmuusseikat (saatavuus, kotimaisuus).

## **Sektoreiden ryhmittely**

Energiatehokkuuspotentiaalin laskenta edellyttää aina vertailutilan määrittämistä. Käytännössä törmätään seuraaviin haasteisiin:

**Yhdyskunnat:** Energiatehokkuutta mitataan erilaisilla alueilla ja eri kaavatasoilla: asemakaava, yleiskaava, maakuntakaava. Eri alueet poikkeavat toisistaan tunnuspiirteidensä (asukasluku, talotyyppit, sijainti, maasto-olosuhteet, verkostojen laajuus, liikennejärjestelmä, jne.) perusteella (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 2). Näin ollen alueista muodostuu luonnostaan yksilöllisiä. Oleellista on tunnistaa keskeiset tekijät, joista tarkasteltava kokonaisuus muodostuu ja joiden välisistä eroista myös erot energiatehokkuudessa aiheutuvat.

**Rakennukset:** Suomen asuinrakennuskannassa on omakotitaloja, kerrostaloja ja rivitaloja. Lisäksi on mm. toimisto-, liike- ja julkisia rakennuksia. Rakennusten energiatehokkuuden arvioimisen haasteena on määritellä riittävä ja tarpeellinen määrä talotyyppejä, jotka huomioivat erilaiset rakennus- ja käyttötavat. (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 3)

**Prosessiteollisuus:** Teollisuuden tuotantoprosessit räätälöidään tuotekohtaisesti. Sama tuote voidaan valmistaa myös eri raaka-aineista ja erilaisella tuotantoteknologialla, jolloin niillä on erilainen energiankulutus (esim. teräksen valmistus malmiraaka-aineesta tai kierrätysteräksestä) (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 5). Näin ollen prosesseista suuri osa muodostuu yksilöllisiksi. Lisäksi prosessien integrointi vaikeuttaa rajapintojen määrittelyä ja tunnistamista.

**Logistiikka:** Lähtölogistiikka ja hankintalogistiikka ovat tuotannollisissa yrityksissä useimmiten osittain tai kokonaan ulkoistettuja. Tarkastelun laajuuden kasvaessa energiatehokkuuslaskennasta tulee yhä monimutkaisempi prosessi varsinkin, jos se sisältää kaikki toimitusketjun eri vaiheet raaka-aineesta asiakkaille tehtäviin toimituksiin asti (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 4). Ketjuista (ja niiden energiatehokkuusluvusta) muodostuu tapauskohtaisia.



**Energiantuotanto:** Energiajärjestelmä sisältää monilukuisen määrän ns. energiaketjuja eli -reittejä. Lähes jokaiselle raaka-aineelle on vaihtoehtoisia reittejä, jotka voivat jakautua ja liittyä toisiinsa uudestaan. (EPO loppuraportti, osa 3, kpl 1)

### **Sektoreilla tehtyjen päätösten ristikkäisvaikutuksia**

Sektoreilla tehdyt päätökset vaikuttavat toisien sektoreiden edellytyksiin muodostaen energiatehokkaita kokonaisuuksia. Sektoreiden välisiä kytkentöjä on koottu taulukkoon liitteessä 1.

## **5. Päähavainnot**

### **Päätöksenteon näkökulmia**

#### **Perustan luominen energiatehokkuudelle**

Päätöksenteon ajankohdalla on suuri merkitys energiatehokkuuden tavoittelussa. Kaikkien tutkittujen sektoreiden kohdalla merkittävimmät päätökset energiatehokkuudesta tehdään silloin, kun rakenteita ja toimintaa suunnitellaan. Yhdyskuntien, rakennusten, teollisuuden ja energiantuotantolaitosten osalta tämä vaihe on suunnitteluvaihe. Logistiikan energiatehokkuus riippuu ensisijaisesti teollisuuden ja kaupan toimintojen asettamista vaatimuksista ja energiatehokkuuteen tulisi voida vaikuttaa mahdollisimman aikaisin eli silloin, kun toimintoja suunnitellaan. Lainsäädännöllä on merkittävä rooli päätöksenteon ohjaajana.

#### **Muutokset myöhemmissä elinkaaren vaiheissa**

Valmiiden rakenteiden energiatehokkuutta voidaan edistää uusimalla ja muuttamalla rakenteita vähemmän energiaa kuluttaviksi sekä muuttamalla käyttötapoja ja käyttötottumuksia. Rakenteet muuttuvat hitaasti ajan kuluessa, kun vanhoja rakenteita tai vanhaa kapasiteettia poistetaan ja tilalle rakennetaan uusia energiatehokkaampia rakenteita. Teollisuudessa tämä vaihe on korjaus/ kunnostusvaihe. Käyttötapoihin ja käyttötottumuksiin voidaan myös vaikuttaa, mutta olemassa olevat rakenteet asettavat toiminnan reunaehdot. Esimerkkeinä energiatehokkuuden edistämisen haasteista elinkaaren myöhemmissä vaiheissa voidaan mainita: energiatehokkuuden parantaminen rakennetussa ympäristössä, energiatehokkuuden parantaminen vakiintuneella kuljetusreitillä ja prosessin hukkaenergiavirtojen ohjaaminen hyötykäyttöön olemassa olevalla tehtaalla.

#### **Investointeihin liittyvä päätöksenteko**

Investointipäätökset pohjautuvat kannattavuuslaskelmaan. Kannattavuuslaskelmat voivat muodostua erilaisiksi riippuen siitä mitä laskelmiin huomioidaan ja mitä niistä rajataan pois. Laskelmiin voidaan vaikuttaa: kriteerien valinnalla, laskenta-alueen valinnalla ja sillä miten elinkaarenaikaiset vaikutukset huomioidaan. Esimerkiksi yhdyskuntien kehittämiseen liittyvät päätökset pohjautuvat mm. kuntien arvioimiin kehittämistarpeisiin.

## Päätulokset liittyen mittaamiseen ja potentiaalilaskentaan

Energiatehokkuuden mittaamisessa on eri sektorien välillä yhtenäisiä käytäntöjä. Kaikilla sektoreilla on käytössä energiatehokkuusluku. Se ilmaisee energiankulutuksen suhteessa tuotosten määrään. Energiatehokkuuslukua kutsutaan usein ominaisenergiankulutukseksi.

Yhtä yhteistä kaikkia sektoreita yhdistävää mittaristoa ei ole olemassa. Tällä hetkellä näyttäisi siltä, ettei sellaista pystytä myöskään kattavasti luomaan. Vaikka yleistä kaikille sektoreille soveltuva mittaria ei ole, energiatehokkuuden seuranta, kehityksen suuntaaminen ja sen arviointi edellyttää mittaamista edes jollakin tarkkuustasolla.

Tutkimuksen yksi keskeisimmistä löydöksistä liittyy ns. taseraja-ajatteluun. Taserajat (po. energia- ja massataserajat) määrittelemällä rajataan arvioitava tai laskettava kohde. Rajauksella otetaan kantaa siihen miten laajaa kokonaisuutta arvioidaan tai lasketaan. Taserajat voidaan määrittää kaikilla sektoreilla usealla eri tavalla. Yhdyskuntien, rakennusten ja teollisuuden sektoreilla taserajat ovat hierarkkisia toisiinsa nähden, jolloin laaja kokonaisuus sisältää useita pieniä kokonaisuuksia. Logistiikka ja energiantuotanto muodostuvat ketjumaisista toisiinsa kytketyistä vaiheista.

Tutkimussektoreiden välillä tunnistettiin monimutkaisia sektoreita yhdistäviä ja päällekkäisiä vuorovaikutuksia. Taseraja-ajattelu on olennaisen tärkeä laajojen kokonaisuuksien hallitsemisessa ja ymmärtämisessä. Se on myös apuväline, jolla voidaan välttää osaoptimointia eli sitä, että haettava ratkaisu olisi edullinen vain jonkin osan suhteen sen sijaan että se olisi edullinen laajemman kokonaisuuden suhteen.

Energiatehokkuutta tulee ensisijaisesti tarkastella energiankulutusta kuvaavien lukujen avulla; hiilidioksidi- (tai kasvihuonekaasu) tehokkuutta voi käyttää tukevana ja täydentävänä menetelmänä. Pelkästään hiilidioksiditehokkuuden tarkastelu ei ole suositeltavaa, sillä se ei ole yksiselitteistä. Tämä johtuu etenkin bioenergiaa (v. 2012) koskevista sopimuksista, joiden mukaan bioenergia lasketaan hiilidioksidineutraaliksi polttoaineeksi. Käytännössä myös hiilineutraalin energian säästön tulee olla tavoiteltavaa.

Useilla aloilla energiatehokkuuden mittaus tarvitsee tuekseen erilaisia selittäviä tekijöitä, kuten rakennuksissa tilankäytön tehokkuus ja teollisuudessa kapasiteetin käyttöaste. Toisilla sektoreilla mitattavaa kohdetta on kuvattava eri näkökulmista, jolloin tarvitaan useampi kuin yksi energiatehokkuusmittari. Lisäksi energiatehokkuuteen liitty-

vässä päätöksenteossa tulee huomioida monipuolisesti myös muita kuin energiatehokkuuteen liittyviä kriteereitä. Mittaristojen määrittäminen ei siis ainakaan vielä ole yksikäsitteistä eikä mittaristoista ole juurikaan sopimuksia. Tällä perusteella voidaan olettaa, että mittarit tarkentuvat ja monipuolistuvat vielä tulevaisuudessa.

Energiaa käytetään eri muodoissa: polttoaineina, sähköinä ja lämpönä. Erilaisilla energijakeilla on erilainen termodynaaminen arvo (exergia). Tämän vuoksi niitä ei tulisi laskea yhteen ennen niiden muuttamista keskenään vertailukelpoiseen muotoon. Tähän käytetään ns. primäärienergiakertoimia. Niiden avulla huomioidaan konversioprosessissa tapahtuvat häviöt. Tyypillisesti primäärienergiamuunnos tarkoittaa energija-keen muuttamista polttoaineiksi. Primäärienergiakertoimien käytössä on vaihtelevia käytäntöjä eikä niiden laskenta ole vakiintunut.

Energiatehokkuuspotentiaali on ero energiankulutuksessa kahden vaihtoehdon välillä, ja yleensä se tarkoittaa eroa nykytilanteen ja vertailutilanteen välillä. Näin ollen energiatehokkuuden potentiaalien laskemiseksi on määriteltävä jokin vertailukohta, jota vastaan kohdetta arvioidaan. Vertailutilanteena voidaan käyttää parasta nykykäytäntöä (esim. BAT) tai ideaalitulannetta. Ideaalitulanne voi olla esimerkiksi teollisuudessa teoreettinen minimikulutus.

Potentiaalilaskennan haaste kulminoituu tavoitetilan eli vertailutilanteen määrittämiseen. Vertailutilanteen määrittämiseen tai laskemiseen ei millään viidellä sektorilla ole olemassa yleisesti hyväksyttyä, käytössä olevaa menettelytapaa ja siksi käytännöt vaihtelevat. Esimerkiksi yhdyskuntien ja logistiikan sektoreille käsite "ideaalitulanne" ei edes sovellu hyvin. Voidaan siis sanoa, että energiatehokkuuden potentiaalilaskentatavat ovat vielä kehityksen alkutaipaleella ja että laskennan apuvälineeksi on toistaiseksi olemassa vasta yksittäisiä laskentatyökaluja, joita voidaan käyttää sektorikohtaisiin tarkasteluihin. Kaikilla sektoreilla vaikutusmahdollisuus potentiaalilaskentaa hyödyntämiseen on suurin silloin, kun rakenteita ja toimintaa suunnitellaan. Esimerkiksi hajautunutta yhdyskuntarakennetta on vaikea korjata myöhemmin.

Tutkimuksen aikana suoritettiin kokeilulaskenta case-kohteessa energiatehokkuuspotentiaalilaskennaksi. Laskennassa hyödynnettiin tutkimuksen aiemmissa vaiheissa löydettyjä ja kehitettyjä mittareita. Laskelmissa arvioitiin sekä energiatehokkuutta että CO<sub>2</sub>-päästöjä. Potentiaalia arvioitiin vertailemalla erilaisia vaihtoehtoja keskenään. Tuloksien perusteella vaihtoehtojen välillä on huomattavia eroja. Ne johtuvat etenkin erilaisista rakenteellisista ratkaisuista.

Esimerkkilaskenta vahvisti käsitystä, että energiatehokkuuden ja sen parannuspotentiaalın arvioiminen on mielekästä selkeästi rajatuissa ja laajahkoissa kohteissa, joissa vertailua eri vaihtoehtojen välillä voidaan tehdä.

## **Ehdotus seuraaviksi tutkimusvaiheiksi**

Mittarit ja potentiaalilaskennan pelisäännöt ovat perusedellytys tavoitteiden ja toteutumisen seuraamiseksi. Tutkimuksen perusteella voidaan sanoa, että menetelmät energiatehokkuuden mittaamiseksi ja potentiaalien laskemiseksi ovat vielä varsin kehittymättömiä siihen, että ne toimisivat käytännön työn ohjaajina.

Näin ollen energiatehokkuuden mittaamisen ja potentiaalien laskennan aihealueella on edelleen jäljellä perustutkimustarvetta. Sektorien välisellä yhteistyöllä jalostetaan yhteistä käsitystä mittaamisesta. Tämä on hyvin tärkeää, jotta työkalut kehittyisivät kaikille sektoreille soveltuvaan suuntaan. Teoreettinen kehitystyö nostaa esiin perusteluita ja edesauttaa menetelmien hyväksyttävyyttä. Yhtenäiset menettelytavat luovat myös toimivaa pohjaa sopimuksille.

Sektorikohtaisia lisätutkimustarpeita on kirjattu sektoreiden loppuraportteihin (EPO loppuraportti, Osa 3). Lisätutkimustarpeita on eri sektoreilla esimerkiksi liittyen tase-rajakysymyksiin. Tutkimuksen jatkaminen näiden teemojen osalta edellyttää, että keskeiset avoimet kysymykset jalostetaan tutkimuskysymyksiksi.

Käytännön työssä tulisi edistää sopimuksia liittyen laskentasääntöihin. Näitä tulisi saada aikaan nopealla aikataululla. Lopullisena tavoitteena voidaan pitää yhtenäistä kansainvälistä käytäntöä. Käytännön työssä tulee kiinnittää myös huomio osaamisen lisäämiseen ja koulutukseen.

## Lähdeluettelo

Ahtila, P., Tuomaala, M., Siitonen, S., Kalenoja, H., Rantala, J., Kallionpää, E., Sipilä, K., Wahlgren, I., Shemeikka, J., Forsström, J., Tuominen, P., Halonen, M., Rämä, M., Pursiheimo, E. & Lahti, P. (2009). Measuring and potentials of energy efficiency (EPO). Energiatehokkuuden mittarit ja potentiaalit. In Veijonen, K., Holviala, N. & Seilo, M. (eds.) *ClimBus – Business Opportunities in the Mitigation of Climate Change 2004-2008*. Final Report. Tekes Programme Report 4/2009. Helsinki 2009. Pp. 386-399.

Ahtila P., Holmberg H., Tuomaala M., Turunen T. (2010) Energy management in drying, Chapter 9. In: *Papermaking Part 2, Drying, Volume 9*. Ed. Karlsson M., In series: *Papermaking Science and Technology*. Paperi ja Puu Oy. Helsinki, Finland.

EU (2006). Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/32/EY annettu 5 päivänä huhtikuuta 2006, energian loppukäytön tehokkuudesta ja energiapalveluista sekä neuvoston direktiivin 93/76/ETY kumoamisesta.

EC (2006). Directive 2006/32/EC of the European Parliament and of the Council of 5 April 2006 on energy end-use efficiency and energy services and repealing Council Directive 93/76/EEC.

Hanley N., McGregor P.G., Swales J.K., Turner K. Do increases in energy efficiency improve environmental quality and sustainability? *Ecological Economics* 68 (2009) 692-709.

Madlener R., Alcott B. Energy rebound and economic growth: A review of the main issues and research needs. *Energy* 34 (2009) 370-376.

SFS EN-ISO 14040 (2006) Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet.

## Liite 1. Sektoreilla tehtyjen päätösten ristikkäisvaikutuksia

|  | Yhdyskunnat | Rakennukset   | Logistiikka   | Liikenne              | Prosessiteollisuus   | Energiantuotanto  |
|--|-------------|---|---|-----------------------|--|---|
| Yhdyskuntasektorin päätösten vaikutus muiden sektoreiden energiatehokkuuteen | -           | → Alue- ja yhdyskuntarakenne (alueen sijainti, tiiviyys, talotyyppi) vaikuttaa siihen millaisia rakennusten lämmitystapa-ratkaisuja on tarjolla | → Alue- ja yhdyskuntarakenne vaikuttaa toimintojen (teollisuus, asunnot, työpaikat, palvelut) sijoittumismahdollisuuksiin ja edelleen liikumis- ja kuljetustarpeisiin, eri kuljetusmuotojen toimintaedellytyksiin (valintaan) ja kuljetusetäisyyksiin | → Kuten logistiikassa | → Alue- ja yhdyskuntarakenne vaikuttaa teollisuuden ja yhdyskunnan energiantegroidin mahdollisuuksiin ja edelleen teollisuuden ja yhdyskunnan energiantegroidin mahdollisuuksiin | → Alue- ja yhdyskuntarakenne (alueen sijainti, tiiviyys, talotyyppi) vaikuttaa energijake-luverkon rakenteeseen.<br><br>→ Liikenneväylien suunnittelu vaikuttaa liikennepolttoaineiden jakamaan ja käyttöön<br><br>→ Energjaväylien suunnittelu vaikuttaa laitosten polttoaine-vaihto-ehtoihin (esim. maakaasu) |

|  | <b>Yhdyskunnat</b>   | <b>Rakennukset</b>   | <b>Logistiikka</b>   | <b>Liikenne</b>              | <b>Prosessi-teollisuus</b>   | <b>Energiantuotanto</b>  |
|--|--|--|--|------------------------------|--|--|
| Rakennukset - sektorin päätösten vaikutus muiden sektoreiden energiatehokkuuteen | → Rakennusten energiankulutus on (merkittävä) osa yhdyskuntien energiankulutusta   | -  | → Rakennukset (esim. varastorakennukset; lämmitys, jäähdytys, ilmastointi) ovat osa logistiikan elinkaarenaikaista energiankulutusta | → Ei merkittäviä vaikutuksia | → Rakennusten energiankulutus on osa teollisuuden energiankulutusta (suhteessa pienehkö)   | → Rakennusten energiatehokkuus ml. rakennusfysiikka ja apulaitteet vaikuttaa rakennusten tehon- ja kokonaisenergian tarpeeseen |
| Logistiikka - sektorin päätösten vaikutus muiden sektoreiden energiatehokkuuteen | → Logistiikan (esim. jätehuollon) energiankulutus on osa yhdyskuntien energiankulutusta (ei vielä huomioita laskelmissa) | → Logistiikkaketjun tarvitsemien rakennuksien energiankulutus on osa rakennusten energiankulutusta | -  | → Ei vaikutuksia             | → Logistiikka on osa teollisuustuotteiden elinkaaren aikaista energiankulutusta (pääasiallisesti tuotteiden valmistuksen aiheuttamalla kulutuksella) | → Logistiikan energiatehokkuus on osa polttoaineketjun energiatehokkuutta (etenkin biopolttoaineet)                            |



|   | <b>Yhdyskunnat</b>  | <b>Rakennukset</b>   | <b>Logistiikka</b>   | <b>Liikenne</b>   | <b>Prosessiteollisuus</b>    | <b>Energiantuotanto</b>  |
|---|---|--|--|---|------------------------------|--|
| Liikenne - sektorin päätösten vaikutus muiden sektoreiden energiatehokkuuteen           | → Liikenteen energiankulutus on (merkittävä) osa yhdyskuntien energiankulutusta   | → Ei vaikutuksia   | → Ei vaikutuksia   | -   | → Ei merkittäviä vaikutuksia | → Kuljetuskaluston valinta vaikuttaa polttoainekeittäjien energiatehokkuuteen (etenkin bio-polttoaineet)   |
| Prosessiteollisuus - sektorin päätösten vaikutus muiden sektoreiden energiatehokkuuteen | → Teollisuuden sijaintipäätökset vaikuttavat teollisuuden ja yhdyskuntien integrointi-asteeseen<br>→ Teollisuuden tuotteiden valmistuksessa sitoutuva energiamäärä muuttuu elinkaaren lopussa jätteen energiasisällöksi | → Teollisuuden sijaintipäätökset vaikuttavat teollisuuden ja rakennusten integrointi-asteeseen<br>→ Teollisuuden tuotteiden valmistuksessa sitoutuva energiamäärä muuttuu elinkaaren lopussa jätteen energiasisällöksi | → Teollisuuden sijaintipäätökset vaikuttavat logistiikan energiankulutukseen | → Teollisuuden sijaintipäätökset vaikuttavat työpaikkojen liikenteeseen | -                            | → Teollisuuden prosessien ja energiantuotannon integroidut ratkaisut ovat tehokkaita energiantuotantopöytä |

|   | <b>Yhdyskunnat</b>   | <b>Rakennukset</b>  | <b>Logistiikka</b>  | <b>Liikenne</b>   | <b>Prosessi-teollisuus</b>   | <b>Energiantuotanto</b> |
|---|--|---|---|---|--|-------------------------|
| Energiantuotanto - sektorin päätösten vaikutus muiden sektoreiden energiatehokkuuteen | → Energiantuotanto-sektorin päätökset luovat edellytykset energiatehokkaan yhdyskuntarakenteen muodostamiselle | → Rakennusten energiantuotantotapa vaikuttaa laskennalliseen primäärienergian kertymiseen ja päästö-<br>kertymiseen | → Energiantuotanto-laitosten sijaintipäätökset vaikuttavat kuljetustarpeisiin ja polttoaineketjujen energiatehokkuuteen (etenkin biopolttoaineet) | → Energiantuotanto-laitosten sijaintipäätökset vaikuttavat kuljetuskalustovalintoihin (etenkin biopolttoaineet) | → Teollisuusprosessien ja energiantuotannon integroidut ratkaisut ovat tehokkaita energiantuotantotapoja | -                       |

# **Osa 2**

## **Grande Case -raportti**



Irmeli Wahlgren<sup>1</sup>, Pekka Tuominen<sup>1</sup>, Jari Shemeikka<sup>1</sup>, Miika Rämä<sup>1</sup>,  
Kari Sipilä<sup>1</sup>, Hanna Kalenoja<sup>2</sup>, Turo Haikonen<sup>3</sup> ja Mari Tuomaala<sup>3</sup>

<sup>1</sup> VTT

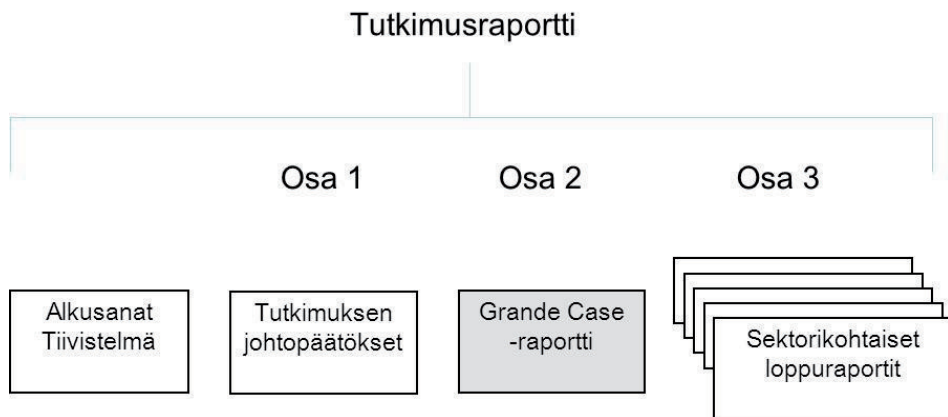
<sup>2</sup> TTY Tiedonhallinnan ja logistiikan laitos

<sup>3</sup> Aalto-yliopisto Energiatekniikan laitos

# Alkusanat

Tämä on energiatehokkuuden mittarit ja potentiaalit (EPO) -tutkimuksen loppuraportin osa 2. Grande Case -tutkimusosuudessa on sovellettu EPO -työn tuloksena kehitetyjä energiatehokkuuden mittareita yhdessä yhteisessä kohteessa. Nämä tulokset on raportoitu erikseen sektorikohtaisiksi loppuraportteiksi (tutkimusraportin osa 3). Grande Case -tutkimuskohteena oli Helsingin Kalasataman alue.

Grande Case -tutkimusosuuden ovat laatineet erikoistutkija Irmeli Wahlgren (Grande Case -tutkimusosuuden projektipäällikkö, yhdyskunnat ja kokonaisarvio), tutkija Pekka Tuominen ja johtava tutkija Jari Shemeikka (rakennukset), tutkija Miika Rämä ja johtava tutkija Kari Sipilä (energian siirto ja jakelu) VTT:stä, erikoistutkija Hanna Kallenoja Tampereen teknillisestä yliopistosta (liikenne) ja tutkija Turo Haikonen ja tutkimuspäällikkö Mari Tuomaala Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulusta (energiantuotanto ja teollisuus). Kalasataman kaavoitusta koskevia tietoja on toimittanut projektipäällikkö Tuomas Hakala Helsingin kaupunkisuunnitteluvirastosta.



# Sisällysluettelo

|   |    |
|---|----|
| Alkusanat .....   | 4  |
| 1. Johdanto .....   | 7  |
| 2. Tavoite .....  | 8  |
| 3. Kalasatama .....   | 10 |
| 4. Laskennan lähtökohdat .....                                  | 13 |
| 5. Rakennukset .....  | 14 |
| Tutkittavat vaihtoehdot .....                                   | 14 |
| Nykyinen rakentamistapa (BAU) -skenaario .....                  | 14 |
| Vähittäiset parannukset -skenaario .....                        | 14 |
| Radikaali ja uudistava muutos -skenaario .....                  | 15 |
| Energiatehokkuusmittarit .....                                  | 16 |
| Rakennusten mallinnus .....                                     | 17 |
| Tulokset .....  | 18 |
| Johtopäätökset .....  | 21 |
| Käytönaikainen energiankulutus .....                            | 21 |
| Elinkaaren aikainen energiankulutus .....                       | 22 |
| Kustannukset .....  | 22 |
| Arvio energiatehokkuudesta .....                                | 23 |
| 6. Energian siirto ja jakelu .....                              | 24 |
| Kalasataman alueen kaukolämmitys- ja jäähdytysjärjestelmä ..... | 24 |
| Tutkimusmenetelmä ja käytetyt lähtötiedot .....                 | 25 |
| Tulokset .....  | 31 |
| Johtopäätökset .....  | 34 |
| 7. Energiantuotanto ja teollisuus .....                         | 37 |
| Lähtökohdat .....   | 37 |
| Laskentavaihtoehtojen kuvaukset .....                           | 38 |
| Biovahan tuotantolaitos .....                                   | 40 |
| Lähtötiedot .....   | 42 |
| Tulokset .....  | 42 |
| Johtopäätökset .....  | 45 |
| 8. Liikenne .....   | 47 |
| Taustaa ja tutkimusmenetelmä .....                              | 47 |

|  |    |
|--|----|
| Tutkitut vaihtoehdot.....  | 49 |
| Vaikutukset kulutapajakaumaan ja liikennesuoritteeseen .....                 | 51 |
| Vaikutukset liikenteen energiankulutukseen ja kasvihuonekaasupäästöihin..... | 52 |
| 9. Yhdyskunnat ja kokonaisarvio .....  | 54 |
| Lähtökohdat .....  | 54 |
| Laskentavaihtoehdot .....  | 55 |
| Arviointiperiaatteet ja lähtötiedot .....                                    | 57 |
| Rakennukset .....  | 57 |
| Perusrakenne .....   | 59 |
| Liikenne.....  | 59 |
| Tulokset .....   | 60 |
| Yhdyskuntia ja kokonaisarviota koskevat johtopäätökset .....                 | 66 |
| 10. Johtopäätökset .....   | 67 |
| Grande Case -laskennan päätulokset .....                                     | 67 |
| Sektorikohtaiset suositukset.....  | 69 |
| Rakennukset .....  | 69 |
| Energian siirto ja jakelu.....   | 70 |
| Energiantuotanto ja teollisuus .....   | 70 |
| Liikenne.....  | 71 |
| Yhdyskunnat ja kokonaisarvio .....   | 71 |
| Lähdeluettelo .....  | 73 |
| Liite 1. Taulukot luvun 9 laskentatuloksista.....                            | 75 |



# 1. Johdanto

Energiatehokkuuden mittarit ja potentiaalit (EPO) – tutkimus on Aalto yliopiston, VTT:n ja Tampereen teknillisen yliopiston yhteinen hanke, jota rahoittaa TEKES. Tutkimuksen tavoitteena on edistää yhtenäisen menetelmän kehittämistä energiatehokkuuden mittaamiseksi ja sen parannuspotentiaalin laskemiseksi. Hanke sisältää seuraavat sektorit: teollisuus, energia, rakennukset, yhdyskunnat, liikenne ja logistiikka.

EPO - tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa kehitettiin energiatehokkuuden mittaristoja ja potentiaalien laskentatapaa sektorikohtaisesti ja samalla yhteisesti kaikkien sektorien tuloksia yhdistäen. Grande Case – tutkimusosuudessa sovelletaan EPO – työn tuloksena kehitettyjä energiatehokkuuden mittareita yhdessä yhteisessä kohteessa. Lisäksi työssä jalostetaan käsitteitä ja menetelmiä liittyen energiatehokkuuden potentiaalien laskentaan, joita tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa tuotettiin kokeilutyypiksi yksittäisistä kohteista.

Grande Case – tutkimuskohteena on Helsingin Kalasataman alue. Tutkimuksessa tarkastellaan Kalasataman aluetta yhdistämällä todelliseen rakenteeseen ja suunnitelmiin virtuaalisia tekijöitä. Tarkastelun pohjaksi kullekin sektorille laadittiin perusvaihtoehto, joka on yhteensopiva muiden sektorien kanssa. Kukin sektori laati omat laskentavaihtoehdonsa, joiden perusteella tarkastellaan EPO - tutkimuksen kannalta keskeisiä asioita. Rakennusten energiankulutuksesta laadittiin kolme skenaariota: nykyinen rakentamistapa, passiivitalot ja nettonollaenergiatalot. Energian siirron ja jakelun osalta tarkastellaan alueen kaukolämpö- ja jäähdytysverkon toimintaa ja vaihtoehtoisia ratkaisuja sen toteuttamiseen. Energiantuotannon ja teollisuuden osuudessa tarkastellaan energiantuotannon tehokkuuden ja teollisuuden energiatehokkuuden tunnuslukuja. Koelaskennassa alueelle tuodaan biojalostamo, joka kytketään yhdyskunnan yhteyteen. Liikenteen tutkimusosuudessa selvitetään henkilöliikenteen energiatehokkuutta yhdyskuntatason vaihtoehtoihin liittyen. Yhdyskuntatason tarkastelun kohteena on rakennusten, verkostojen ja muiden rakenteiden sekä liikenteen muodostama kokonaisuus. Tutkittavien vaihtoehtojen avulla tarkastellaan kohdealueen energiatehokkuutta ja sijainnin, täydennysrakentamisen, aluetehokkuuden ja mitoituksen merkitystä energiatehokkuuden kannalta. Yhdyskuntatason tarkastelussa on koottu yhteen kaikkien sektorien laskentatulokset.

## 2. Tavoite

Grande Case – tutkimusosuudessa sovelletaan EPO – työn tuloksena kehitettyjä sektori-kohtaisia energiatehokkuuden mittareita yhdessä yhteisessä kohteessa. Lisäksi työssä jalostetaan käsitteitä ja menetelmiä liittyen energiatehokkuuden potentiaalien laskentaan, joita tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa tuotettiin kokeilutyypillisesti yksittäisistä kohteista.

Grande Casen tavoitteena on

- soveltaa eri sektoreiden mittareita samaan käytännön kohteeseen
- yhdistää viiden sektorin tarkastelut yhdeksi kokonaisuudeksi
- jalostaa energiatehokkuuden potentiaalien laskentatapoja
- havainollistaa energiatehokkuuden laskentaa ja siihen tarvittavia lähtötietoja

Grande Casen tuloksena saadaan

- arvio EPO - työssä kehitettyjen sektorikohtaisien mittarien soveltuvuudesta
- arvio mahdollisuuksista yhdistää sektorikohtaisia mittareita samanaikaisesti
- arvio energiatehokkuuden potentiaalilaskennan menetelmien tilasta
- mallilaskelmia yhden (Helsingin Kalasatama) yhdyskunta-alueen energiatehokkuuden potentiaaleista.

Sektorien ja niiden muodostaman kokonaisuuden energiatehokkuuspotentiaalia arvioidaan suhteessa vuoden 2050 energia- ja ilmastotavoitteisiin (päästövähennys 80 %).

*Rakennusten* energiankulutustietoja kolmesta skenaarista (nykyinen rakentamistapa, passiivitalot, nettonollaenergiatalot) käytetään lähtötietoina alueen energijärjestelmää mallinnettaessa. Tavoitteena on selvittää kunkin skenaarion järjestelmätason vaikutukset, jotta niitä voidaan vertailla keskenään kokonaisuutena, sekä käyttää energiatehokkuuden mittareita eri laskentavaihtoehtojen vaikutusten vertailuun. Lisäksi tarkastellaan rakennusten käyttöastetta, primäärienergian huomiointia ja aurinkoenergian hyödyntämistä.

*Energiansiirto ja jakelu -osiossa* tarkastellaan Kalasataman alueen kaukolämpö- ja jäähdytysverkon toimintaa ja tuodaan esille vaihtoehtoisia ratkaisuja sen toteuttami-

seen. Tarkastelun kohteena on neljä tapausta: normaali kaukolämpöjärjestelmä vuoden 2010 rakennusmääräysten mukaisilla taloilla, matalalämpötilaratkaisu passiivitaloilla, normaali kaukojäähdytysjärjestelmä 2010 – taloilla ja eteläisen niemenkärjen asuinalueen lämmitysjärjestelmä ”lähes nolla” -taloilla.

*Teollisuuden ja energiantuotannon* tutkimusosuudessa tutkitaan Kalasataman aluetta energiantuotannon ja teollisuuden energiatehokkuuden mittarein. Laskentaa varten alueelle suunniteltiin erilaisia energiantuotantovaihtoehtoja. Koelaskennassa alueelle tuotiin myös biojalostamo, joka kytkettiin yhdyskunnan yhteyteen. Biojalostamon päätuote on biovaha ja sivutuotteita ovat kaukolämpö ja sähkö.

*Liikenteen* tutkimusosuuden tavoitteena on selvittää Kalasataman alueen henkilöliikenteen energiatehokkuutta. Tutkimuksessa arvioidaan alueen toimintojen edellyttämä liikennetarve, matkatuotokset ja ajoneuvosuoritteet sekä niiden perusteella liikenteen energiankulutusta ja kasvihuonekaasupäästöjen määrää. Yhdyskuntarakenteen vaikutusta liikkumisen energiatehokkuuteen tutkitaan vertailemalla Kalasataman suunniteltua sijaintia asukkaiden sijoittumiseen muualle Helsingin seudulle.

*Yhdyskuntatason* tarkastelun kohteena on rakennusten, verkostojen ja muiden rakenteiden (kentät, puistot, muut viheralueet) sekä liikenteen muodostama kokonaisuus. Tutkittavien vaihtoehtojen avulla tarkastellaan alueen energiatehokkuutta ja täydennysrakentamisen, sijainnin, aluetehokkuuden ja mitoituksen merkitystä energiatehokkuuden kannalta. Vaihtoehtoina tarkastellaan Kalasatamaan suunnitellun asutuksen sijoittumista muualle Helsingin seudulle.

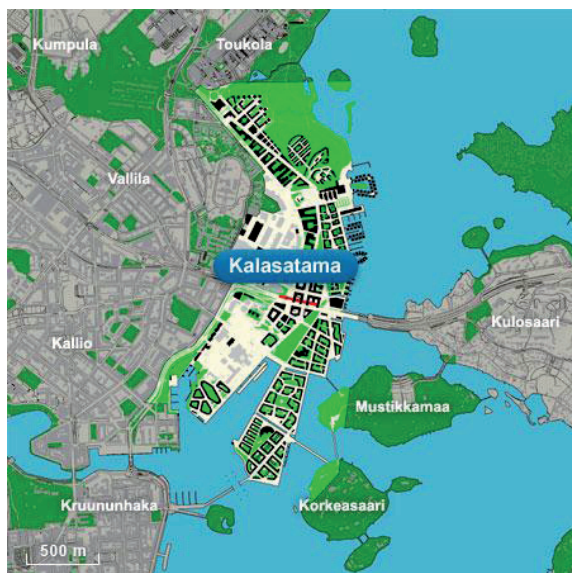
Yhdyskuntatason tarkastelun yhteydessä laaditaan myös laskelma kaikkien sektorien muodostamasta *kokonaisuudesta*.

### 3. Kalasatama

Tutkimuksen kohteena oleva Kalasataman alue käsittää Helsingin kaupungin Sörnäistenrannan - Hermanninrannan - osayleiskaava-alueen. Alue sijaitsee keskeisesti yhdyskuntarakenteessa. Alueella on metroasema ja raitiovaunulinjaston laajennusta suunnitellaan. Alueen suunnittelun edetessä myös sen mitoitus täsmentyy. Kalasatamassa on tutkimusta laadittaessa käytettävissä olleiden suunnitelmien mukaan vuonna 2030:

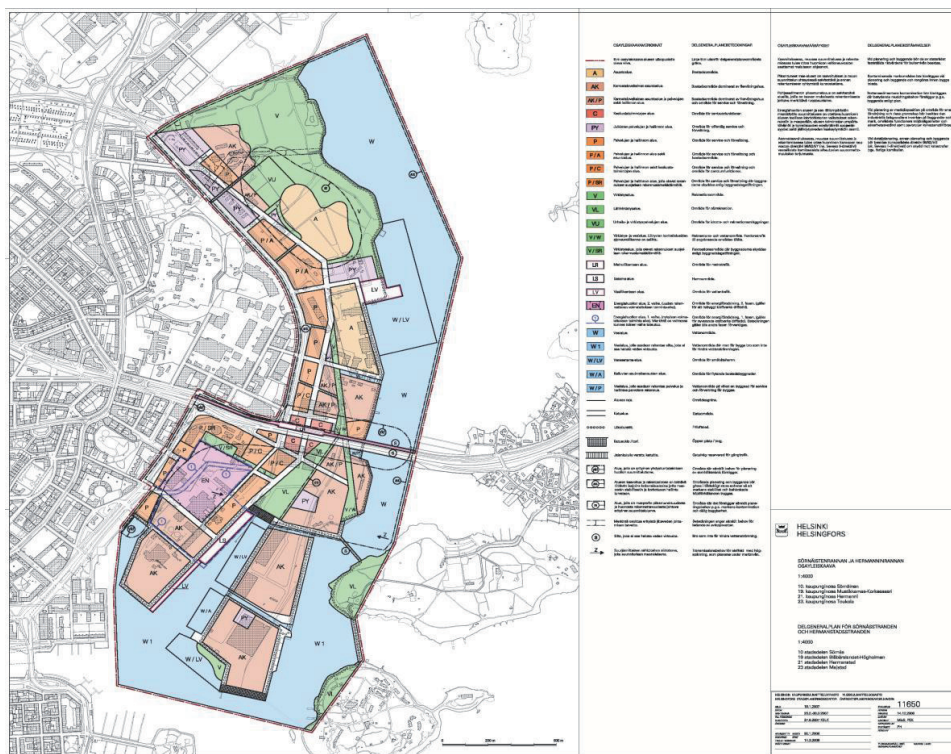
- asukkaita 18 000 ja työpaikkoja 10 000
- asuinrakennuksia 750 000 kerros-m<sup>2</sup>
- liike- ja toimistorakennuksia 525 000 kerros-m<sup>2</sup>
- palvelutiloja 45 000 kerros-m<sup>2</sup>.

Tutkimuksessa tarkastellaan Kalasataman aluetta yhdistämällä todelliseen rakenteeseen ja suunnitelmiin virtuaalisia tekijöitä. Kuvassa 1 esitetään alueen yleispiirteinen sijainti.



*Kuva 1. Kalasataman sijainti Helsingin itäisessä kantakaupungissa. (Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto)*

Kuvassa 2 esitetään Kalasataman alueen osayleiskaava.



Kuva 2. Sörnäistenrannan ja Hermanninrannan (Kalasataman) osayleiskaava. (Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto)

Tutkimuksessa käytetyt Kalasataman alueen lähtötiedot on koottu osayleiskaavan illustraation (kuva 3), alueen asemakaavojen ja Helsingin kaupunkisuunnitteluvirastosta saatujen rakennuksia ja asukkaita koskevien tietojen perusteella. Kalasataman suunnitelmiin perustuvia tutkimuksessa käytettyjä lähtötietoja ovat vuoden 2030 tilanteessa arvioitu väestö- ja työpaikkamäärä, rakennusten kerrosala, osayleiskaavakartasta mitatut verkostojen pituudet ja liikenne- ja puistoalueiden pinta-ala.

Tutkimuksen yhteydessä on laadittu alueen energijärjestelmää koskevat suunnitelmat kaukolämpö- ja kaukojäähdytysverkon ja energiantuotannon osalta, rakennuksia koskevat skenaariot ja asutuksen sijoittumisen vaihtoehtotarkastelut.



Kuva 3. Kalasataman osayleiskaava, illustratio. (Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto)

## 4. Laskennan lähtökohdat

Tarkastelun pohjaksi kullekin sektorille laadittiin perusvaihtoehto, joka on yhteensopi-  
va muiden sektorien kanssa. Kukin sektori laati omat laskentavaihtoehdonsa, joiden  
perusteella tarkastellaan EPO-tutkimuksen kannalta keskeisiä asioita. Laskentavaih-  
toehdoilla on useita oletuksia, jotka on laadittu vuorovaikutuksessa sektorien välillä,  
esimerkiksi rakennusten energiankäyttö, energijärjestelmä, energiantuotanto, yhdys-  
kuntarakenteelliset vaihtoehdot ja liikenteen ominaisuudet.

Seuraavassa esitetään tutkimuksessa käytetyt laskentamenetelmät ja tulokset sektoreit-  
tain.

## 5. Rakennukset

### Tutkittavat vaihtoehdot

Hankkeessa laaditaan kolme skenaariota Kalasataman rakennuskannasta. Skenaarioissa tarkastellaan pääasiassa toimenpiteiden yhteisvaikutusta, mutta eri toimenpiteiden vaikutuksesta kokonaisuuteen esitetään myös arvio.

### Nykyinen rakentamistapa (BAU) -skenaario

Nykyinen rakennustapa (Business As Usual) toimii vertailukohtana. Skenaariossa ei sovelleta mitään energiatehokkuustoimenpiteitä, vaan oletetaan energiankäytön olevan nykyisenkaltaista.

### Vähittäiset parannukset -skenaario

Rakennusten lämmitysenergiankulutus on passiivitalon tasoa, sähkönkulutus minimoidaan valitsemalla tehokkaimmat, taloudellisesti kannattavat saatavilla olevat laitteet ja ratkaisut. Passiivitalo on RIL 216-2001 -standardin määritelmän mukaan rakennus, joka kuluttaa lämpöenergiaa 15 kWh/m<sup>2</sup> asuinrakennuksen ja 9 kWh/m<sup>2</sup> liikerakennuksen tapauksessa.

Skenaario sisältää seuraavat toimenpiteet:

- Lämmön tarvetta pienennetään passiivitalotekniikalla.
- Sähkönkulutus minimoidaan tehokkaimmilla taloudellisesti kannattavilla laitteilla ja ratkaisuilla.
- Ei sähkölämmitystä kylpyhuoneissa tai muuten.
- Lämmöntalteenotto ilmanvaihdossa.
- Rakennusmateriaalien sitoutuneesta energiasta tehdään arvio (kohtuullisesti saatavilla olevan tiedon rajoissa).



## Radikaali ja uudistava muutos -skenaario

Rakennukset ovat nettonollaenergiataloja. Nettonollaenergiatalolla tarkoitetaan tässä yhteydessä rakennusta, jonka nettoenergiankulutus vuoden yli on nolla siten, että 1) rakennuksen bruttoenergiankulutus minimoidaan, 2) jäljelle jäävä energiankulutuksesta katetaan suuri osa rakennuksessa tai sen läheisyydessä tuotettavalla energialla ja 3) tyypillisen vuoden aikana, jos rakennus tarvitsee verkosta energiaa, on rakennuksessa tai sen läheisyydessä tuotettua energiaa syötettävä muuna aikana vuoden kuluessa yhtä suuri määrä verkkoon.

Skenaario sisältää seuraavat toimenpiteet:

- Lämmön tarvetta pienennetään teknisesti mahdolliseen minimiin.
- Sähkönkulutus minimoidaan tehokkaimmilla taloudellisesti kannattavilla laitteilla ja ratkaisuilla.
- Paikallinen energiantuotanto, tavoitteena nettonollaenergiataso
- Ei sähkölämmitystä kylpyhuoneissa tai muuten.
- Matalalämpötilaiset lämmitysratkaisut, aurinkolämmön hyödyntäminen, kaksisuuntainen lämpöverkko, ym.
- Rakennusmateriaalien sitoutuneesta energiasta tehdään arvio (kohtuullisesti saatavilla olevan tiedon rajoissa).
- Toimistotilojen tarvetta vähentää:
  - Tietotyöstä tehdään suurempi osa kotona.
  - Toimistoissa ei omia työpisteitä, tiloja käytetään joustavasti klo 6-21.
- Liike- ja palvelutilojen tarvetta vähentää:
  - Asiointi siirtyy nettiin ja kioski-tyyppisiin asiointipisteisiin.
  - Suurempi määrä nettikauppaa
  - Julkisten tilojen käyttöä monipuolistetaan ja iltakäyttöä lisätään.

## Energiatehokkuusmittarit

Tuloksia arvioidaan EPO-projektin aikaisemmassa vaiheessa valituilla mittareilla. Mittareiden tarkempi kuvaus on esitetty tutkimusraportin osassa 3.

### Energian ominaiskulutus SEC:

$$SEC = \frac{E}{A},$$

jossa  $A$  on rakennuksen bruttoala ja  $E$  on energiankulutus vuodessa. SEC on jo laajalti käytössä, mikä helpottaa vertailua kansallisesti ja kansainvälisesti. Sen laskemiseksi tarvittavat tiedot ovat usein verrattain helposti saatavilla. Lukema on myös helppo tulkita. Vaikka SEC:llä on heikkoutensa, kuten käyttöasteen ja taloudellisten tekijöiden huomiotta jättäminen, sen käytön jatkamista muiden mittareiden ohessa suositellaan historiatietojen vertailtavuuden säilyttämiseksi.

### Käyttöasteella korjattu energian ominaiskulutus $SEC_{UR}$ :

$$SEC_{UR} = \frac{E}{uA},$$

jossa

$$u = \frac{T_{toteutunut}}{T_{max}},$$

ja  $T_{toteutunut}$  on toteutuneiden käyttötuntien määrää ja suurin mahdollinen käyttötuntien määrään  $T_{max}$ . Tavoitteena on SEC:n muokkaaminen niin, että se huomioi rakennusten erilaiset käyttöasteet. Käyttöaste voidaan määritellä eri tavoin. Tässä ehdotettu tapa on myös yksinkertainen: mitata toteutuneiden käyttötuntien määrää suhteessa suurimpaan mahdolliseen käyttötuntien määrään.

### Käytön energiaintensiteetti EIU:

$$EIU = \frac{E}{T_{hlö}},$$

jossa  $T_{hlö}$  on rakennuksessa vietetyt henkilötunnit. Koska  $SEC_{UR}$  ei ota huomioon tehokasta tilankäyttöä, sovelletaan toistakin käyttöasteen huomioivaa indikaattoria. EIU mittaa paljonko energiaa kulutetaan rakennuksessa oleskeltua henkilötuntia ( $T_{pers}$ ) kohden.

### Taloudellinen energiaintensiteetti EEI:

$$EEI = \frac{E}{R},$$

jossa R on todellinen tai laskennallinen vuokra. Tällaisen mittarin taustalla on ajatus, että vuokra määrittää eräänlaisen minimitason hyödyille, jonka vuokralainen katsoo rakennuksesta saavansa. Näin ollen EEI ainoana tässä mittarijoukossa antaa mahdollisuuden suhteuttaa energiankulutuksen sillä saavutettuun taloudelliseen hyötyyn, tai ainakin sen likiarvoon. Etuna mittarilla on ainakin jonkinlainen verrattavuus talouden muiden sektoreiden energiatehokkuuteen.

### Energiasuorituskykyindeksi EPI:

$$EPI = \frac{E_{toteutunut}}{E_{BAT}},$$

jossa  $E_{toteutunut}$  on rakennuksen toteutunut energiankulutus ja  $E_{BAT}$  on samanlaisen parhaalla saatavissa olevalla teknologialla (*best available technology, BAT*) toteutetun rakennuksen energian kulutus. Vertailuanalyysi eli benchmarking mahdollistaa säästö-potentiaalien arvioimisen tavalla, joka ei ilmene suoraan muista mittareista. EPI saa yhtä suurempia arvoja kun rakennuksessa on tehokkuuden parantamisvaraa. Mitä suuremman arvon EPI saa, sitä enemmän parantamisen varaa on.

## Rakennusten mallinnus

Kalasadaman alueen rakennukset mallinnettiin valitsemalla edustavat tyyppirakennukset alueelta ja yleistämällä näiden kulutukset koko aluetta koskeviksi:

- Asuinkerrostalot
- Pientalot
- Toimistot
- Päiväkodit ja koulut (julkiset palvelut)

Kukin tyyppitalo mallinnettiin dynaamisella simuloinnilla energiankäytön (lämmitys, sähkö ja jäähdytys) tuntitason tehovaihtelun kuvaamiseksi. Rakennusten energiatehokkuuden perusratkaisut olivat edellä kuvattujen skenaarioiden mukaiset.

Radikaali ja uudistava muutos -skenaariota varten mallinnettiin nettonollaenergiarakennuksia, joihin kuului integroitua uusiutuvan energian tuotantoa. Aurinkolämmitys ja -sähkö mitoitettiin maksimaalisesti, tavoitteena nollaenergiatase vuoden yli lasketuna. Mikäli rakennuksen tilavaraukset aurinkojärjestelmille eivät riittäneet, käytettiin maksimikeräinpinta-alan antamaa tuottoa. Ylituotanto aurinkojärjestelmistä siirrettiin verkkoon (kaukolämpö tai sähkö). Taulukossa 1 on nähtävissä mallinnuksen mukaiset energiankulutusluvut.

## Tulokset

Taulukossa 1 on esitetty mallinnuksen tulokset koskien nettokulutusta vuoden yli. Lähes nolla -tasolla on oletettu kaksisuuntaista energian siirtoa verkkoon.

*Taulukko 1. Rakennustyyppien energiankulutukset eri teknologioilla, kWh/m<sup>2</sup>/a.*

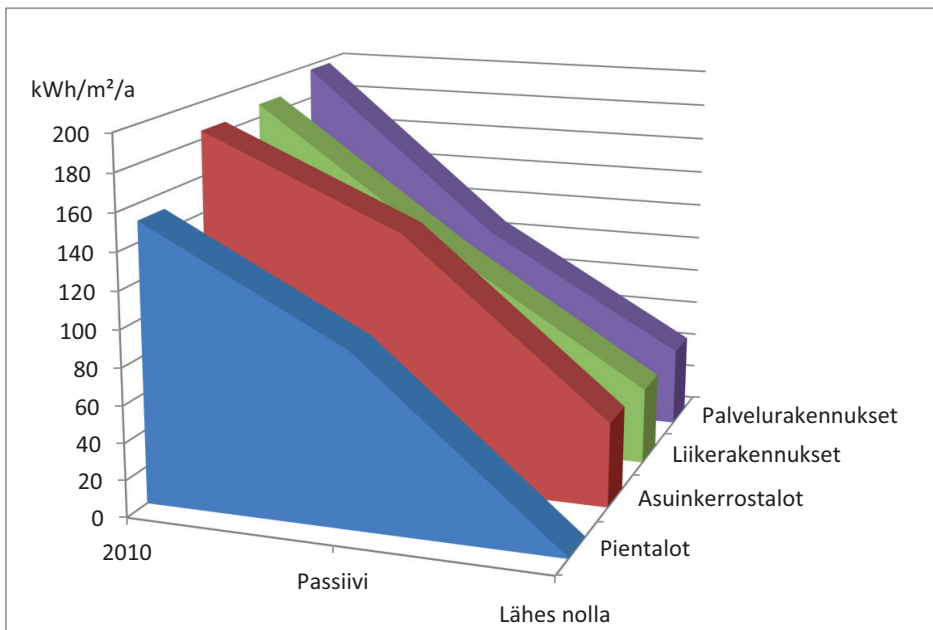
| Rakennustyyppi     | Skenaario   | Lämmitys | Sähkö | Jäähdytys | Primäärienergia |
|--------------------|-------------|----------|-------|-----------|-----------------|
| Pientalo           | 2010        | 110      | 35    | 3         | 151             |
|                    | Passiivi    | 54       | 28    | 0,5       | 94              |
|                    | Lähes nolla | 0        | 0     | 0,5       | 1               |
| Kerrostalo         | 2010        | 85       | 62    | 1         | 185             |
|                    | Passiivi    | 55       | 49    | 0         | 137             |
|                    | Lähes nolla | 0        | 23    | 0         | 46              |
| Toimistot          | 2010        | 84       | 58    | 10        | 188             |
|                    | Passiivi    | 27       | 44    | 3         | 110             |
|                    | Lähes nolla | 0        | 21    | 0         | 42              |
| Palvelurakennukset | 2010        | 121      | 51    | 8         | 197             |
|                    | Passiivi    | 37,5     | 38    | 3         | 106             |
|                    | Lähes nolla | 0        | 20,5  | 2         | 44              |

Yksi Grande Case -laskelman tavoitteista oli testata EPO-hankkeen aikaisemmassa vaiheessa kehitettyjä energiatehokkuuden mittareita. Sitä varten mallinnuksessa saadut kulutusluvut sijoitettiin mittareihin, jotka on määritelty tutkimusraportin osassa 3. Tulokset on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Energiatehokkuuden mittareiden saamat arvot. SEC on nykyisinkin laajasti käytetty energiantensiteetti (kWh/m<sup>2</sup>). Muut mittarit on kehitetty EPO-projektissa. SEC<sub>UR</sub> on SEC korjattuna käyttöasteella (kWh/m<sup>2</sup>). EIU on energiankulutus rakennuksessa vietettyjä henkilötunteja kohti (kWh/h<sub>pers</sub>). EEI on energiankulutus vuokraa tai laskennallista vuokraa kohti (kWh/€). EPI on vertailuluku parhaaseen mahdolliseen teknologiaan verrattuna. Tarkemmat määritelmät löytyvät laskentaosuuden kuvauksesta.

| Rakennustyyppi     | Skenaario   | SEC | SEC <sub>UR</sub> | EIU   | EEI   | EPI |
|--------------------|-------------|-----|-------------------|-------|-------|-----|
| Pientalo           | 2010        | 151 | 158               | 1,2   | 1,09  | 151 |
|                    | Passiivi    | 94  | 99                | 0,7   | 0,68  | 94  |
|                    | Lähes nolla | 1   | 1                 | 0,007 | 0,006 | 1   |
| Kerrostalo         | 2010        | 185 | 193               | 1,5   | 1,33  | 4   |
|                    | Passiivi    | 137 | 143               | 1,1   | 0,99  | 3   |
|                    | Lähes nolla | 46  | 46                | 0,3   | 0,33  | 1   |
| Toimistot          | 2010        | 188 | 319               | 5,7   | 1,12  | 4,5 |
|                    | Passiivi    | 110 | 187               | 3,4   | 0,66  | 2,6 |
|                    | Lähes nolla | 42  | 42                | 0,8   | 0,25  | 1   |
| Palvelurakennukset | 2010        | 197 | 217               | 2,2   | 1,17  | 4,5 |
|                    | Passiivi    | 106 | 117               | 1,2   | 0,63  | 2,5 |
|                    | Lähes nolla | 44  | 44                | 0,4   | 0,26  | 1   |

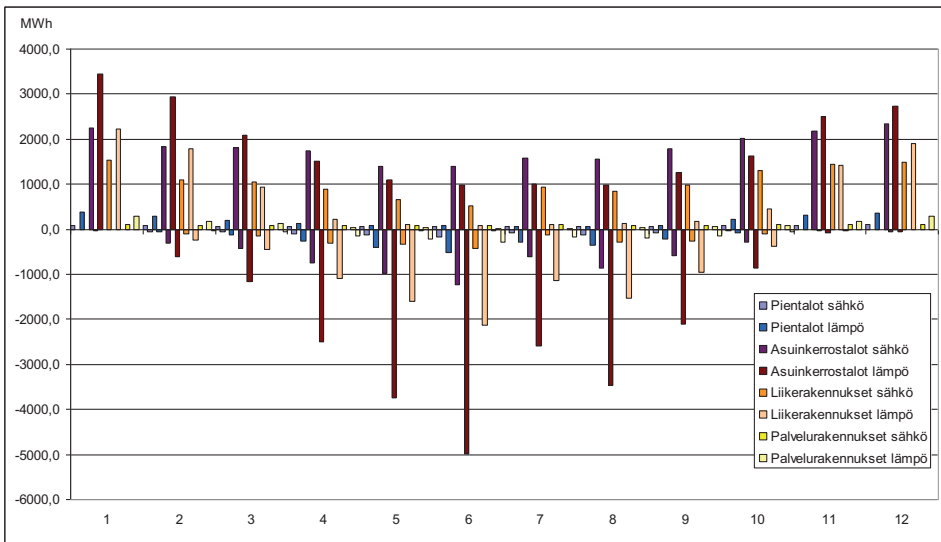
Kuva 4 näyttää SEC:n saamat arvot modifioidulla primäärienergiakertoimella kerrottuna. Kertoimeksi valittiin rakennusmääräysten D3 2012 E-luku (rakennuksen kokonaisenergiankulutus), koska tällä taattiin laskelmien yhdenmukaisuus voimaan tulevien säädösten ja siten vertailtavuus yleisesti käyttöön tulevan laskentatavan kanssa (Ympäristöministeriö 2011). Tutkimuksen energiantuotantoa ja yhdyskuntakokonaisuutta koskeissa osuuksissa rakennusten primäärienergiakertoimet muodostuvat alueen energiajärjestelmän ja energiantuotannon perusteella ja ovat siten erilaiset kuin tässä käytetyt keskimääräiset kertoimet.



Kuva 4. Eri rakennustyyppien energiankulutukset eri teknologioilla, kWh/m<sup>2</sup>/a primäärienergiaa.

Kuva 5 näyttää, miten lähes nollanergia -skenaariossa käytettävä rakennuksiin integroitu energiantuotanto vaikuttaa. Rakennuksissa on oletettu olevan aurinkolämpökeräimiä ja aurinkosähköpaneeleja. Kuvasta nähdään, että talvikuukausina niiden tuotanto ei riitä useimmilla rakennustyypeillä edes kattamaan omaa kulutusta, joten nettokulutus vaatii energian tuomista sähkö- ja lämpöverkosta rakennuksiin. Kesäkuukausina monilla rakennustyypeillä esiintyy runsasta oman kulutuksen ylittävää tuotantoa, joka näkyy suurena ulosvirtauksena.

Runsaasti energiaa kesällä tuottavat rakennustyyppit saavuttavat vuoden yli tarkasteltuna nettonollaenergiatason kuvassa 4 ja taulukossa 1. Jotta järjestelmä toimisi kokonaisuutena, on verkossa tapahtuvilla siirroilla ja varastoinnilla tasoitettava lyhytaikaista vaihtelua kulutuksessa eri rakennusten välillä. Vuoden yli tarkasteltuna vaaditaan, että Kalasataman ulkopuolella on kysyntää energian ylituotannolle kesällä ja talvella mahdollisuus tuottaa rakennusten kuluttama energia. On siis syytä huomata, että nettonollaenergiatase ei tarkoita, että rakennukset kaikkina hetkinä olisivat energiaomavaraisia.



Kuva 5. Eri rakennustyyppien energian kuukausittain summatut sisään- ja ulosvirrat (MWh) lähes nollaenergia -skenaariossa koko Kalasataman alueelta. Sisäänvirta esitetään positiivisena lukuna, ulosvirta negatiivisena.

## Johtopäätökset

### Käytönaikainen energiankulutus

Taulukossa 1 on esitetty rakennustyyppien energiankulutukset eri teknologioilla. Taulukosta nähdään, että passiivirakennukset ainakin puolittavat lämmitysenergiankulutuksen useimmissa rakennustyypeissä. Sähköenergian kulutuskin pienenee huomattavasti. Lähes nollaenergia -rakennukset todella saavuttavat nettonollakulutuksen vuoden yli pientalojen tapauksessa, ja vähintään puolittavat kulutuksen muiden rakennusten kohdalla verrattuna passiivitasoon.

Taulukossa 2 on esitetty eri energiatehokkuusmittarien tuottamat tunnusluvut eri skenaarioiden ja talotyyppien energiankulutuksesta. Indikaattorien laskentatavat on esitelty edellä.

SEC pelkkänä teknisenä indikaattorina näyttää energiankulutuksen muutoksen suhteessa kerrosalaan. EEI:n saamat arvot noudattelevat SEC:n saamia arvoja, koska muu-

toksia alueen vuokratasoon ei tässä oletettu. Samoin EPI:n, sillä se määritelmänsä puolesta on energiankulutus suhdelukuna ilmaistuna.

SEC<sub>UR</sub> ja EIU huomioivat myös käyttöasteiden muutokset, joita oletettiin tapahtuvan eri skenaarioissa. Näiden merkitys on suurimmillaan toimistorakennuksissa, joissa tehokkaamman tilan- ja ajankäytön merkitys energiatehokkuudelle voi olla yhtä suuri kuin teknisten parannusten.

## **Elinkaaren aikainen energiankulutus**

Sitoutuneesta energiasta (rakennusmateriaalien tuotannon edellyttämä energia) voidaan aikaisempien selvitysten perusteella arvioida, että sen osuus on normitalojen kohdalla 5 - 10 % elinkaaren energiankulutuksesta. Kun tarkastellaan passiivitaloja ja lähes nollaenergia -taloja, on niiden materiaaleihin sitoutuneen energian määrä mahdollisesti 10 - 20 % korkeampi kuin normitalojen. Absoluuttisesti ero ei siis ole suuri (0,5 - 2 %). Sitoutuneen energian suhteellinen merkitys elinkaaren energiankulutuksessa kasvaa kuitenkin huomattavasti siirryttäessä passiivi- ja lähes nollaenergia -taloihin, koska käytön aikainen energiankulutus pienenee niin paljon.

## **Kustannukset**

Vaikka varsinaista kustannuslaskelmaa ei tutkimukseen sisällynytkään, tehtiin suunta-antava arvio energiatehokkuusparannusten takaisinmaksuajasta perustuen kirjallisuuslähteisiin. Niiden perusteella voidaan arvioida, että passiivirakentamisen kustannukset ovat tavallisesti n. 4 - 8 % korkeammat ja lähes nollaenergia -talojen 7 - 15 % korkeammat kuin normitalojen (VTT 2011: Building the Future – Visions and technology opportunities in the built environment). Tällöin oletetaan, että kyseessä eivät enää ole koeluontoiset pilottihankkeet, vaan suunnittelu ja rakentaminen ovat sopeutuneet tehokkaampaan teknologiaan. Lisäksi on syytä huomata, että etenkin lähes nollaenergia -talojen kohdalla hinta-arviossa on epävarmuutta, koska uuden teknologian hintataso ei vielä ole vakiintunut. Esimerkiksi aurinkoenergiatekniikan hinta tehoyksikköä kohti on menneinä vuosina laskenut merkittävästi.

Olettaen, että lähteitä vastaava hintataso toteutuisi Kalasataman hankkeissa, pelkkä energiansäästö toisi lisäinvestointikustannuksen takaisin n. 30 vuoden kuluessa passiivirakentamisen tapauksessa ja n. 20 vuoden kuluessa lähes nollaenergia -rakentamisen



tapauksessa. Korkokantana laskelmissa oli 3 %:n reaalikorko, joka vastaa rakennus-hankkeille myönnettävien lainojen nykyistä korkotasoa. Energianhintojen oletettiin pysyvän nykyisellä tasolla. Tarkastelu on herkkä muutoksille korkotasossa ja energian hinnoissa. Jo 5 %:n reaalikorkotaso nostaa takaisinmaksuajat 40 - 50 vuoteen ja ylikin. Toisaalta energianhinnan nousu lyhentää takaisinmaksuaikoja. Tavallisesti nousu- ja korkeasuhdanteissa sekä energianhinnoilla että koroilla on nousupaineita, lasku- ja matalasuhdanteissa laskupaineita; näin ollen nämä tekijät jonkin verran kumoavat toistensa vaikutuksia. Jo pelkän energiansäästön valossa energiatehokkuusparannukset vaikuttavat nykyhintatasolla siis kannattavilta, joskin pääomaintensiivisiltä.

### **Arvio energiatehokkuudesta**

Taulukossa 2 esitettyjen tulosten perusteella eri energiatehokkuuden mittarit antavat samansuuntaisia tuloksia alueen rakennuksista. Tämä viittaa yksiselitteiseen energiatehokkuuden paranemiseen mittaamistavasta riippumatta, kun siirrytään normitaloista passiivitaloihin ja lähes nollaenergia -taloihin. Elinkaaren energiankulutuksesta käytönaikainen energiankulutus on tärkein komponentti, paitsi lähes nollaenergia -taloilla, joissa käytönaikainen nettoenergiankulutus on lähellä nollaa. Tällöin sitoutunut energia on merkittävin elinkaaren nettoenergiankulutuksen komponentti, vaikka onkin vain noin 10 - 20 % korkeampi kuin normitaloilla. Kokonaisuutena tarkasteltuna energiatehokkuuden parannukset ovat siis tuloksekkaita: passiivitalot ovat normirakennuksia tehokkaampia ja lähes nollaenergia -talot kaikkein tehokkaimpia kaikilla mittareilla. Rakennuksissa havaittiin merkittävä tehostamispotentiaali ja nollataso tai lähes nollataso oli saavutettavissa kaikilla rakennustyypeillä.

## 6. Energian siirto ja jakelu

### Kalasadaman alueen kaukolämmitys- ja jäähdytysjärjestelmä

Kalasadama kuuluu kiinteästi kaupunkirakenteeseen, joten sen liittäminen olemassa olevaan kaukolämpö- ja kaukojäähdytysjärjestelmään on lähtökohtaisesti järkevää ja taloudellista. Vaikka alue sijaitsee kaupunkirakenteen sisällä, lämmitys- ja jäähdytysverkkoja on seuraavassa käsitelty erillisinä järjestelminä eikä osana suurempaa järjestelmää. Käytännössä erillisverkon toteutuminen on hyvin epätodennäköistä, mutta oletus on laskennan rajaamiseksi välttämätön.

Alueen kaukolämmitys- ja kaukojäähdytysverkkojen rakenne on esitetty kuvassa 6. Punaiset pisteet kuvaavat kuluttajia ja tuotantolaitos on ympäröity sinisellä renkaalla. Kaukolämmitysverkon pituus on 13,3 km ja kuluttajia 167 kpl. Kaukojäähdytysverkolle vastaavat luvut ovat 4,0 km ja 39 kpl.

Tarkemmin tutkittuja tapauksia on yhteensä neljä:

- normaali kaukolämpöjärjestelmä 2010 rakennusmääräysten mukaisilla taloilla
- matalalämpötilaratkaisu passiivitaloilla
- normaali kaukojäähdytysjärjestelmä 2010 -taloilla
- eteläisen niemenkärjen asuinalueen lämmitysjärjestelmä ”lähes nolla” -taloilla

Normaali kaukolämpöjärjestelmä toimii ns. vertailutapauksena ja kuvaa myös suurella todennäköisyydellä alueelle käytännössä toteutettavaa lämmitysjärjestelmää. Matalalämpötilaratkaisulla haetaan verkolle lisää tehokkuutta vastaukseksi passiivitalojen tuoman pienemmän kulutuksen aiheuttamille kustannuspaineille. Normaali kaukojäähdytysjärjestelmä kuvaa myös hyvin toteuttamiskelpoista ratkaisua tutkitun tyyppiselle alueelle ja luo vertailukohtaan kiinteistökohtaisille alueen sähkön kulutusta kasvattaville jäähdytysjärjestelmille. Neljännessä vaihtoehdossa on pohdittu eteläisen niemenkärjen hyvin pienikulutuksellisen asuinalueen toteuttamista joko siten että verkko on täysin erillään muusta kaukolämpöverkosta tai siten että alueen rakennusten tuottama aurinkolämpö olisi siirrettävissä alueelta ja hyödynnettävissä sen välittömässä läheisyydessä. Erillisverkossa lämmönlähteenä toimisi merivesilämpöpumppu. Molemmissa vaihtoehdoissa rakennukset ovat toteutukseltaan ”lähes nolla” -tasoa (vuoden

nettokulutus nolla) ja toisessa rakennusten yhteydessä on aurinkolämpöön perustuvaa tuotantoa. Näiden lisäksi on sanallisesti käsitelty tapausta, jossa koko Kalasataman alueen rakennusmassa olisi toteutettu kiinteän kaupunkirakenteen ulkopuolelle haja-asutusalueelle lämmitysratkaisuna kaukolämpö tai jokin muu.



*Kuva 6. Kalasataman kaukolämmitys- (vas.) ja kaukojäähdytysverkot kulutuspiisteineen.*

## **Tutkimusmenetelmä ja käytetyt lähtötiedot**

Alueen lämmitys- ja jäähdytysverkot kulutuspiisteineen on muodostettu osayleiskaavaa, alueen havainnekuvaa ja erikseen muodostettua korttelijakoa sekä näille kortteliryhmille suunniteltuja rakennustyyppikohtaisia kerrosneliömetrilukuja hyödyntäen, jonka jälkeen muodostuneen verkon kulutuspiesteille on määritely lämmitys- tai jäähdytyskuorma käyttäen hyväksi erikseen vuoden ympäri simuloituja rakennusten tunneittaisia ominaisenergiankulutustietoja, kaukolämmityksen tapauksessa käyttövesi ja lämmitys eroteltuna. Tuloksena alueen kuluttajille on saatu realistiset vuoden mittaiset kulutusaikasarjat.

Alueen kaukolämmitys- ja kaukojäähdytysjärjestelmän tehokkuutta ja toimintaa on tutkittu tarkemmin verkkomallilla, jonka antamista tuloksista merkittävimmät ovat

lämpöhäviöt ja pumppausteho tuntitasolla vuoden tarkastelujakson aikana. Muiden mallin antamien tulosten, esimerkiksi lämpötilat ja paineet verkon eri pisteissä, perusteella on arvioitu järjestelmän toimintaa ja mitoitusperusteita. Verkko on kuvattu mallissa solmuina ja näiden välisinä putkina, siten että solmuille on määritelty tyyppi (tuottaja, kuluttaja tai välittävä solmu) ja putkille pituus, eristeluokka ja tyyppi sekä alku- ja päätesolmut. Korkeuserot ovat alueella melko pienet eikä niitä ole solmuille määritelty. Tuottajasolmulla eli laitoksella on tiedossa kaukolämmön menoveden lämpötila aikasarjana, itse kapasiteettia ei ole rajattu. Kuluttajasolmuille on annettu tunti-aikasarjana tehontarve käyttövedelle ja lämmitykselle sekä toisiopiirin meno- ja paluulämpötilat. Kuluttajan lämmönsiirtimet on mallinnettu logaritmisena lämpötilaeron menetelmällä asettamalla konduktanssi vakioksi, jonka jälkeen ainoa tuntematon eli kaukolämmön paluulämpötila voidaan ratkaista. Kun molemmat lämpötilat ja tehontarve ovat tiedossa, myös massavirta kaukolämpöverkon puolella voidaan laskea.

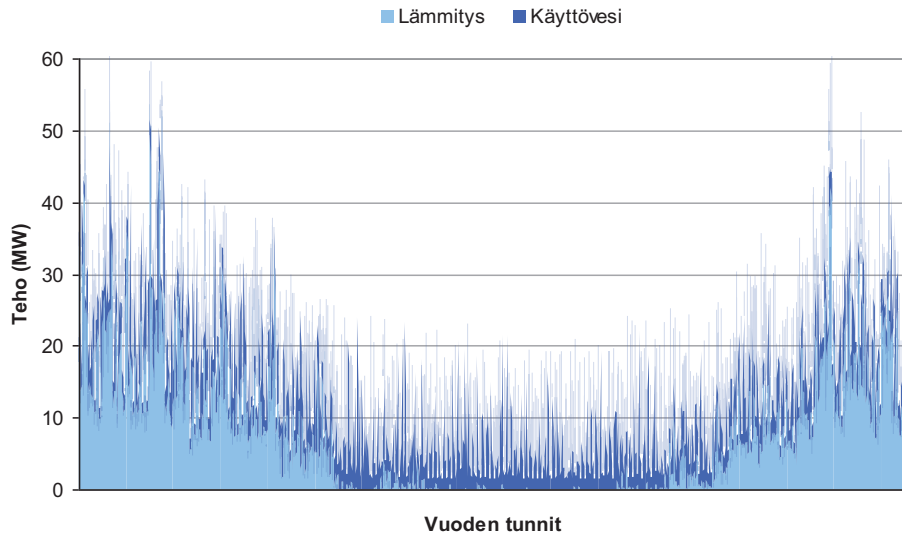
Normaalissa kaukolämpötilajärjestelmässä alueella on nykyiset rakennusmääräykset täyttävää rakennuskantaa. Kaukolämpöverkon menolämpötila säätyy ulkolämpötilan mukaan siten, että se kasvaa minimiarvostaan 75 °C lineaarisesti maksimiarvoonsa 115 °C kun ulkolämpötila laskee 5 °C:sta -26 °C:een. Matalalämpötilaratkaisussa menolämpötilaa pidetään vuoden ympäri vakiona 70 °C:ssa. Käytännössä lämpötilat eivät nykyisin ole näin korkeita, eivätkä seuraa mallinnetulla tarkkuudella ulkolämpötilaa. Periaate on kuitenkin oikea.

Kaukojäähdytysratkaisussa menolämpötila on 8 °C ja vesi lämpenee kuluttajan luona 16 °C:een.

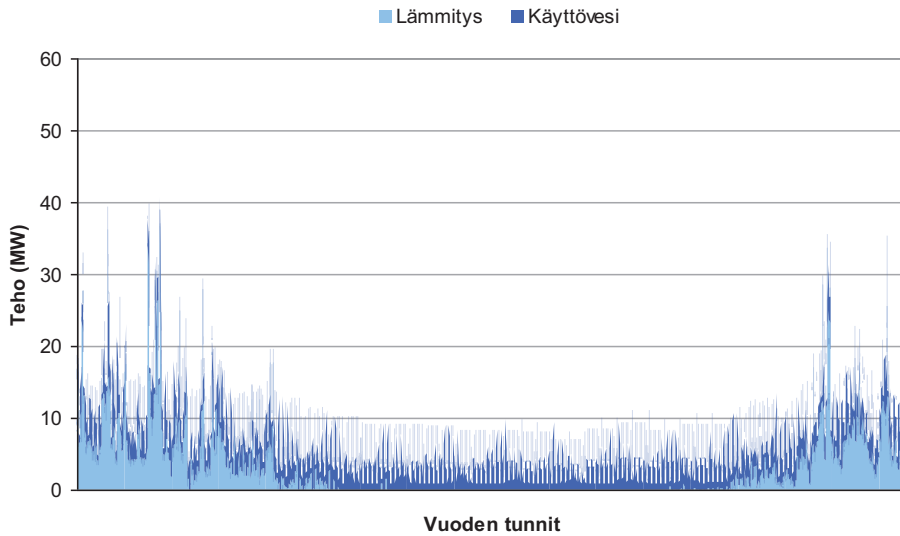
Molemmissa kaukolämmitystapauksissa kuluttajien lämmönsiirtimet on mitoitettu 80 % maksimitehosta, kaukojäähdytysmallinnuksessa on käytetty vakiolämpötilaeroa meno- ja paluuvirtausten välillä. Lämpöhäviöitä laskettaessa on maan lämpötila oletettu vuoden ympäri vakioksi (5 °C). Häviöissä on otettu huomioon putkien tyyppi ja eristeluokka. Suoritetuissa laskelmissa meno- ja paluuputket ovat erillisissä suojakuorisissa (2Mpuk) ja eristeluokka on 4.

Kuvissa 7, 8 ja 9 on esitetty alueen kulutusaikasarjat kaukolämpöjärjestelmässä 2010 -taloille ja passiivitaloille sekä 2010 -taloille kaukojäähdytysjärjestelmässä. Kuvassa 10 on taas esitetty energiankulutus kuukausittain kaikille kolmelle tapaukselle. Kuten on yleisesti oletettua, käyttöveden osuus kulutuksesta tulee kasvamaan tulevaisuudessa.

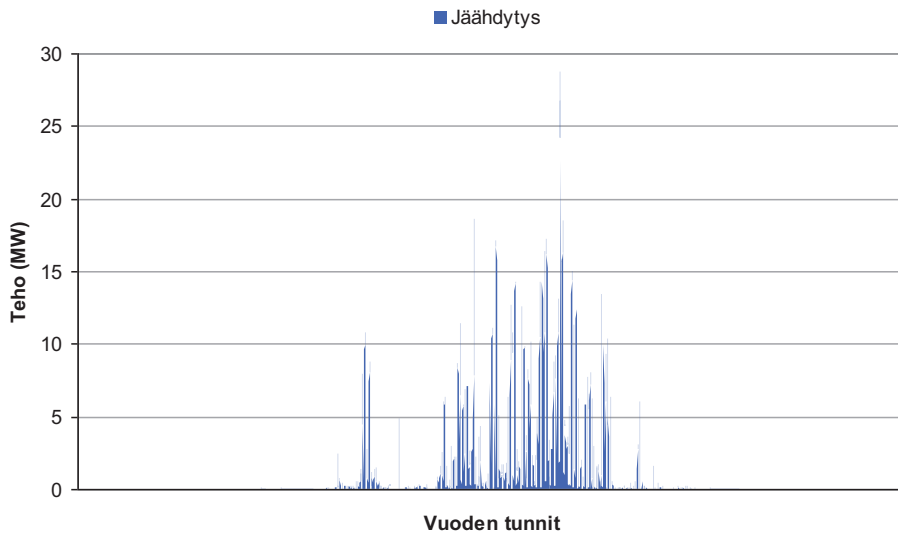
Uusilla 2010 rakennusmääräyksen mukaisilla taloilla osuus vuosikulutuksesta on 38 %, passiivitaloilla jo yli puolet eli 52 %.



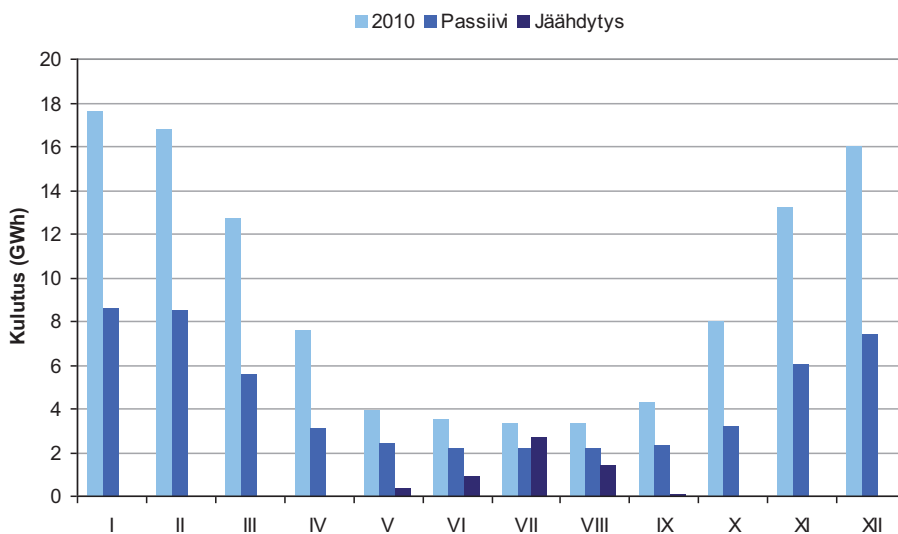
Kuva 7. Kaukolämmön kulutusaikasarja Kalasataman alueelle 2010 -taloilla.



Kuva 8. Kaukolämmön kulutusaikasarja Kalasataman alueelle passiivitaloilla.



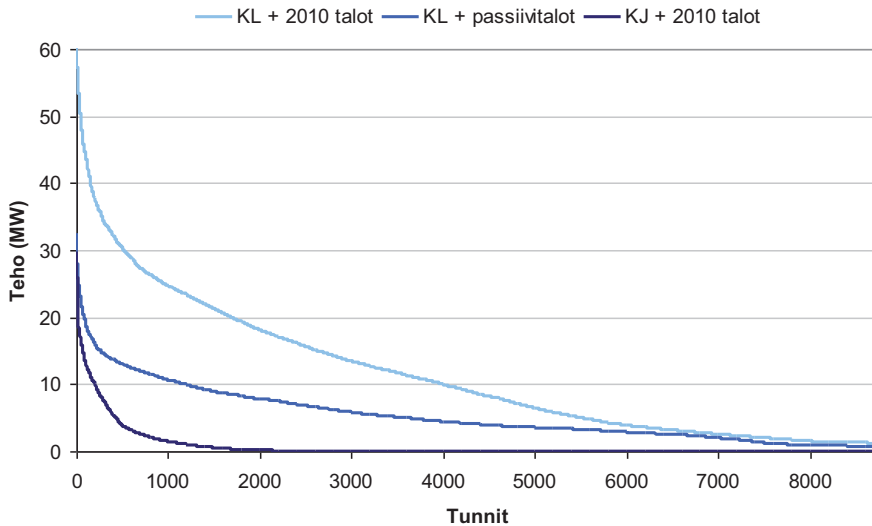
Kuva 9. Kaukojäähdytyksen kulutusaikasarja Kalasataman alueelle 2010 -taloilla.



Kuva 10. Kuukausittainen energiankulutus kolmessa laskentavaihtoehdossa.

Kulutusaikasarjoista huomionarvoista on passiivitapauksen kohtuullisen tasainen kuorma vuoden yli. Tämä näkyy erityisesti kuukausittaisia kulutuksia tarkasteltaessa.

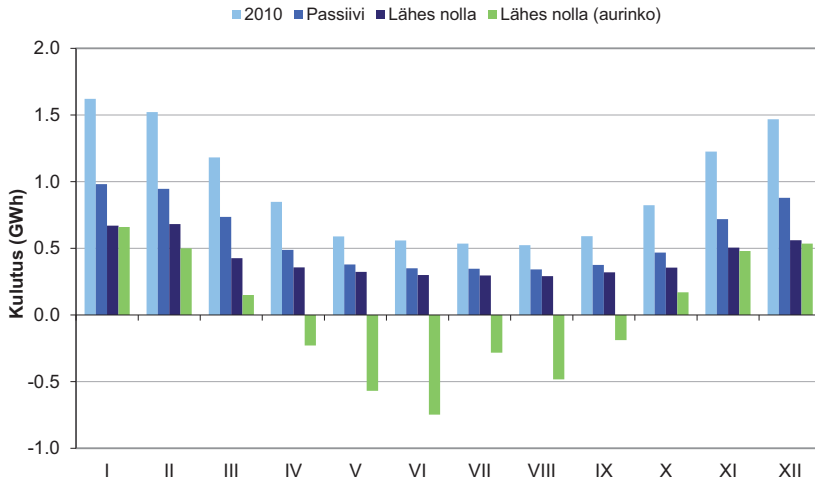
Tasaisen kulutuksen rikkoo muutama korkea piikki, joka tekee verkoston putkimitoituksen haasteelliseksi. Näyttää vahvasti siltä, ettei järjestelmää ole tarkoituksenmukaista mitoittaa näitä piikkejä silmällä pitäen, vaikka näin on simuloitussa verkkoratkaisussa tehtykin. Alla kuvassa 11 on esitetty kulutusaikasarjojen pysyvyyskäyrät kaikille tutkituille tapauksille. Kuvassa näkyy hyvin edellä käsitellyt passiivitalojen tehopiikkien ongelma. Korkein kulutuspiikki passiivitalojen tapauksessa on noin 40 MW. Pelkästään yhden tai kahden vuorokauden leikkaaminen suoristaa pysyvyyskäyrää huomattavasti.



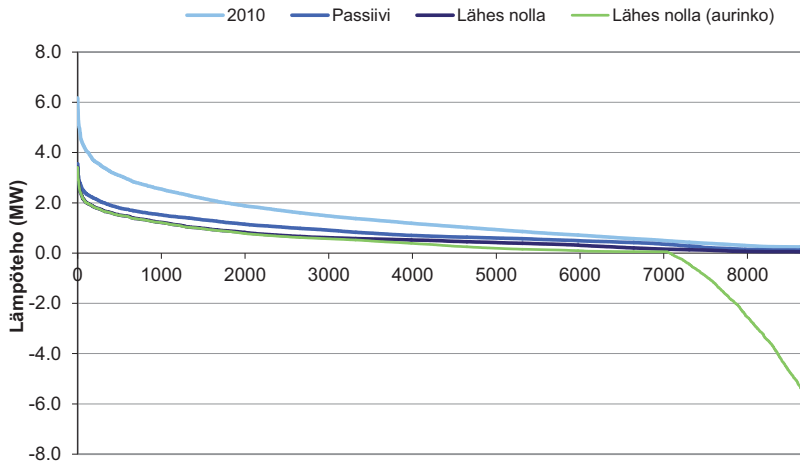
Kuva 11. Pysyvyyskäyrät tutkittujen koko alueen käsittämien tapausten kulutuksille.

Neljännessä vaihtoehdossa tutkittiin Kalasataman alueen eteläisimmän niemenkärjen (ks. kuva 6) muodostamalla asuinkerrostaloalueella erillistä pienverkkoa. Alueen talot olisivat passiivitapausta energiatehokkaampia ”lähes nolla” -taloja. Alueen lämmitysjärjestelmän lämmönlähteenä toimisi joko merivesilämpöpumppu tai aurinkolämpöjärjestelmä, missä tapauksessa alue olisi yhteydessä muuhun kaukolämpöverkkoon tai yksittäisiin kuluttajiin, joiden oletettiin kykenevän hyödyntämään rakennusten aurinkolämpöjärjestelmän tuottama ylimääräinen lämpö normaalia kaukolämpöverkkoa matalammassa lämpötilassa. Jakeluverkko, pituudeltaan noin 1500 m, olisi molemmissa tapauksissa lämpötilatasoltaan 65 °C.

Kuvassa 12 on esitetty molempien tapausten kuukausittainen lämmönkulutus verrattuna saman alueen 2010- ja passiivitalojen kulutuksiin. Kuvassa 13 on taas esitetty pysyvyuskäyrä alueen lämmöntarpeelle erityyppisillä taloilla.



Kuva 12. Eteläisen niemenkärjen lämmönkulutus eri talotyypeillä kuukausittain.



Kuva 13. Eteläisen niemenkärjen asuinkerrostalalueen lämmöntarpeen pysyvyyskäyrä.



Alueen kokonaiskulutukset 2010-, passiivi- ja ”lähes nolla” -taloille ovat 11,5 GWh, 7,0 GWh ja 5,1 GWh, aurinkolämpöjärjestelmällä ”lähes nolla” -talojen nettokulutus vuoden yli on 0 GWh ja ulkopuolinen energiatarve (ja oma tuotanto) noin 4,2 GWh. Alueen huipputeho on eri talotyypeillä 6,2 MW, 3,6 MW tai 3,4 MW. Energiatehokkaimmilla ”lähes nolla” -taloilla käyttöveden osuus kokonaiskulutuksesta on jo 77 %.

## Tulokset

Taulukkoon 3 on kerätty simuloitujen tapausten tuloksia; tarkemmin eriteltynä lämpöhäviöt, pumppauksen tarve ja suhteelliset lämpöhäviöt eli lämpöhäviöiden ja tarvittavan tuotannon välinen suhde.

Kaukojäähdytykselle lämpöhäviöitä ei ole määritelty lainkaan, sillä ne ovat hyvin pienet (~0,04 GWh) ja laskentatavasta johtuen eivät häviöitä lainkaan vaan viilentävät verkossa virtaavaa vettä edelleen. Pumppauksen kulutuslukuja tarkasteltaessa nousee esiin normaalin kaukolämpöjärjestelmän selvästi suurempi kulutus. Jonkin verran osuutta on normaalin kaukolämpöratkaisun verrattain tiukalla putkimitoituksella, mutta itse asiassa kyse on matalalämpötilaratkaisun väljästä mitoituksesta. Tämä johtuu passiivitalojen kulutuspiikeistä, joista selvittääkseen verkon putket on mitoitettava suuremmiksi kuin on järkevää koko vuotta ajatellen. Toki käytännössä järjestelmä selviää tilanteessa hyvin, koska piikit ovat luonteensa mukaisesti teräviä ja lyhytkestoisia. Hetkellinen tehovaje lämmityksessä korkeintaan laskee huonelämpötilaa lyhyellä aikavälillä, mutta ei käytännössä vaikuta rakennuksen toimintaan millään tavoin. Simuloinnista tätä ei tietoisesti ole otettu huomioon, minkä seurauksena putket olisivat todellisuudessa tarpeettoman suuria ja pumppaukseen vuodessa kuluva energiamäärä siksi simuloinnissa verrattain pieni. Molemmat eteläisen niemenkärjen rajaamalle alueella lasketut tapaukset muistuttavat hyvin pitkälle kahta laajempaa laskentatapausta. Vaikka alueella kulutus on vielä passiivitapausta pienempi, suhteelliset lämpöhäviöt jäävät alhaisiksi alueen korkean rakennustiheyden takia.

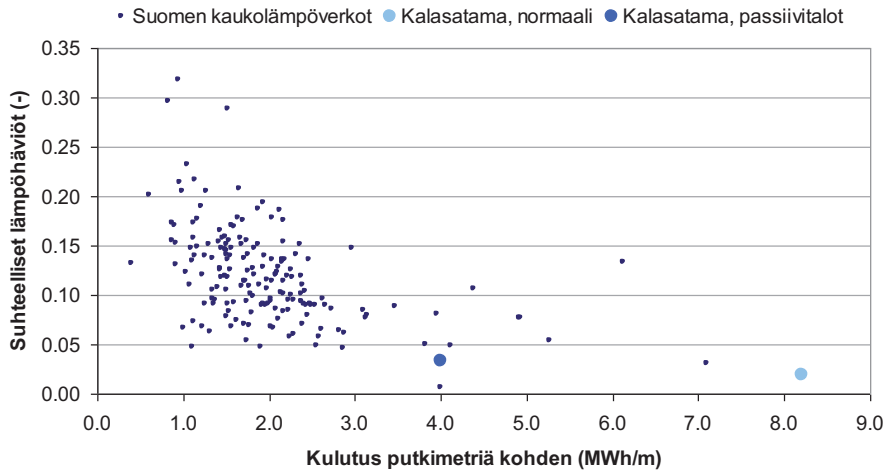
Suhteelliset lämpöhäviöt ovat kaikissa tarkemmin tutkituissa kaukolämmitystapauksissa hyvin pienet. Johtopäätöksenä voidaan todeta kaukolämmitysverkon olevan siis tehokas tapa jakaa lämpöenergiaa kaupunkialueella.

Taulukko 3. Absoluuttiset ja suhteelliset lämpöhäviöt sekä pumppauksen sähkönkulutus.

|                                | <b>Lämpöhäviöt</b> | <b>Suhteelliset lämpöhäviöt</b> | <b>Pumppaus</b>                 |
|--------------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| <b>Normaali kaukolämpö</b>     | 2,1 GWh            | 1,9 %                           | 253 MWh                         |
| <b>Matalalämpötilaratkaisu</b> | 1,8 GWh            | 3,3 %                           | 86 MWh                          |
| <b>Normaali kaukojäähdytys</b> | -                  | -                               | 95 MWh                          |
| <b>Niemenjärvi</b>             | 174 MWh            | 3,2 %                           | 2,1 MWh                         |
| <b>Niemenjärvi (aurinko)</b>   | 174 MWh            | 3,9 %                           | 1,8 MWh + 2,0 MWh <sup>1)</sup> |

<sup>1)</sup> Aurinkolämpöjärjestelmällä varustettujen kuluttaja/tuottajien pumppauksen tarve

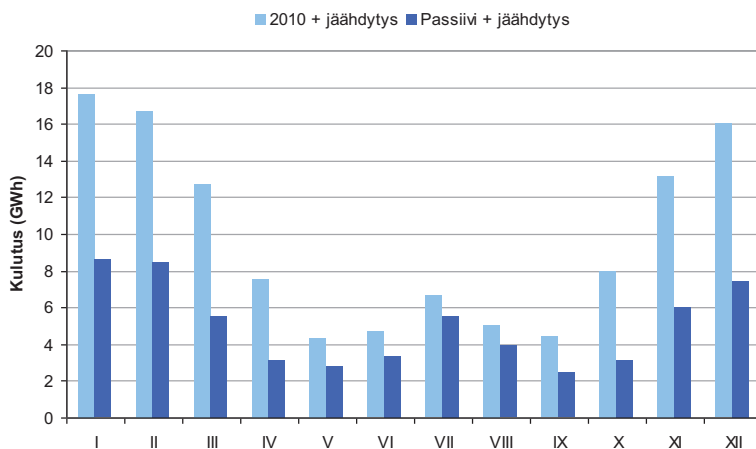
Kuvassa 14 on esitetty mihin tutkitut kaukolämpötapaukset sijoittuvat muihin tilastoituihin Suomen kaukolämpöverkkoihin nähden kun tarkastellaan kulutusta putkimetriä kohden ja suhteellisia lämpöhäviöitä. Kuvasta huomaa, että molemmat tapaukset edustavat odotetusti tehokasta kaukolämpöjärjestelmää. Syynä on sijainti tiheästi rakennetulla kaupunkialueella. Kuvasta saa myös hyvän kuvan siitä, kuinka jakeluverkon tehokkuus yleensä rapautuu kulutustiheyden laskiessa. Saman rakennusmassan sijoittaminen väljästi rakennetulle alueelle laskisi siis järjestelmän tehokkuutta selvästi nostan suhteelliset lämpöhäviöt vähintään tasolle 10 - 20 %. Näin suuret lämpöhäviöt vaikuttavat jo järjestelmän kokonaistehokkuuteen merkittävästi, minkä vuoksi esitetyn kaltaisen rakennusmassan lämmitystarpeen kattaminen kaukolämmöllä väljästi rakennetulla alueella täytyy tutkia tapauskohtaisesti. On joka tapauksessa epätodennäköistä, että se ainakaan kokonaisuudessaan liittyisi yhtenäiseen kaukolämpöjärjestelmään. Verkon pirstoutuminen vaikuttaa luonnollisesti myös tuotantolaitosten kokoon ja lukumäärään, joilla molemmilla on vaikutusta sekä investointi- että käyttökustannuksiin.



Kuva 14. Tutkittujen tapausten ja Suomen kaukolämpöverkkojen tunnuslukuja.

Tunnuslukuna kulutus putkimetriä kohden kertoo kulutustiheydestä, jolla on suora yhteys kaukolämpö- tai jäähdytysjärjestelmän kannattavuuteen investointina. Samaa tunnuslukua käyttäen voidaan myös arvioida kaukojäähdytysjärjestelmän toteuttamiskelpoisuutta. Kolmannessa tutkitussa tapauksessa, jossa rakennuskanta koostuu 2010 -taloista, kulutus putkimetriä kohden on 1,4 MWh/m. Passiivitaloilla tämä luku putoaa jo arvoon 0,36 MWh/m, minkä takia tapaus on jätetty tarkastelun ulkopuolelle.

Kuvassa 15 on yhdistetty kaukolämmityksen ja -jäähdytyksen kulutukset olettamalla, että jäähdytys tuotetaan absorptiojäähdytyksellä kaukolämpöä hyödyntäen käyttämällä kerrointa 0,8, eli yhtä kaukolämpöyksikköä kohden voidaan tuottaa 0,8 yksikköä jäähdytystä. Tarkoitus on tuoda esille passiivitalon positiivinen piirre eli kulutuksen tasaisuus, joka entisestään parantuu kun jäähdytys otetaan mukaan tarkasteluun. Tämä periaatteessa helpottaa tuotannon mitoittamista. Toki käytännössä todellisuus ei ole aivan yhtä ruusuinen, sillä kaukojäähdytyksen tarve vaihtelee hyvin voimakkaasti vuorokauden sisällä.



Kuva 15. Yhdistetyt kaukolämmityksen ja -jäähdytyksen kuukausittaiset kulutukset.

Eteläisen niemenkärjen verkkoa tarkasteltaessa nähdään, että alue on kulutustiheydel-  
tään myös melko korkea, hieman yli tai alle 3 MWh/m riippuen ovatko talot aurinko-  
lämpöjärjestelmällä varustettuja, ja myös simulointitulosten perusteella lasketut suhteelliset lämpöhäviöt (noin 3,2 % ja 3,9 %) ovat samaa tasoa kuin koko Kalasataman alueen verkolle lasketuissa tapauksissa. Tarkasteltu asuinalue on joka tapauksessa tiheimpiä rakennuskeskittymiä koko tutkitulla alueella, joten suhteellisten lämpöhäviöiden pysyminen kohtuullisina on odotettua.

Olettamalla meriveden lämpötilaksi varovaisesti 4 °C ja verkon lämpötilaksi 65 °C, saadaan yksivaiheiselle R134a-kylmäainetta käyttävälle lämpöpumpppuolosuhteelle COP luvuksi 2,0, jonka perusteella lämpöpumpun sähkönkulutukseksi saadaan noin 2600 MWh. Jos lämpöpumpun hyödyntämää ympäristön lämpöenergiaa voidaan pitää uusiutuvana, tässä käsitelty järjestelmä olisi vähintään 50 % uusiutuvaan energiaan perustuva riippuen tietysti pumpun kuluttaman sähkön oletetusta tuotantomuodosta.

## Johtopäätökset

Selkeimpänä johtopäätöksenä voidaan todeta kaikkien laskentatapausten edustavan tehokkaita jakelujärjestelmiä. Tiivis kaupunkirakenne näkyy suurena kulutustiheytenä ja sen seurauksena mahdollistaa häviöitä pienen järjestelmän. Tuotetusta lämpöenergiasta menetetään vain 1,9 % normaalilla kaukolämpöratkaisulla tai 3,3 % passiivitaloja matalammalla lämpötilatasolla palvelevalla kaukolämpöverkolla. Huomionar-

voista on, että kulutustiheys on myös passiivitaloilla kuvatulla Kalasataman alueella selkeästi riittävän korkea (4,0 MWh/m) taloudellisesti järkevän kaukolämpöjärjestelmän rakentamiselle. Väljästi rakennetulla alueella kaukolämmön tehokkuus on dramaattisesti heikompi. Riippuen alueen toteutuksesta häviöt nousevat tasolle 10 - 20 %, pientaloalueella häviöt voivat olla pahimmillaan kymmeniä prosentteja. Siirryttäessä tällaisille alueille kaukolämpöjärjestelmän tehokkuutta on arvioitava tapauskohtaisesti.

Kuten edellä annettiin ymmärtää, jo lähtötietojen perusteella voidaan sanoa, että jopa pelkästään passiivikerrostaloja sisältävän alueen energiankulutus on vielä riittävän suuri kaukolämpöjärjestelmän näkökulmasta. Järkevällä suunnittelulla sekä rakentajan ja energiapalvelua tarjoavan yrityksen välisellä vuoropuhelulla voidaan varmistaa jakeuverkon energia- ja kustannustehokkuus eli verkon järkevä mitoitus ja toimintavarmuus tehopiikkien osuessa kohdalle.

Kolmantena laskentatapauksena tarkasteltu Kalasataman alueen kaukojäähdytysjärjestelmä oli kulutustiheydeltään jo selkeästi alhaisempi (1,4 MWh/m). Kaukojäähdytysjärjestelmänä alue on kuitenkin toteuttamiskelpoinen. Alueelle on tulossa selkeä keskittymä ilmastoituja toimisto- ja palvelurakennuksia, joiden jäähdytys on kokonaisuutta tarkastellen järkevintä toteuttaa keskitetyllä järjestelmällä. Kaukojäähdytys absorptiojäähdytyksellä myös lisää yhteistuotantolaitoksen käyttötunteja tasoittaen kulutusta vuoden ympäri ja vaikuttaa näin positiivisesti koko tuotantolaitoksen tehokkuuteen. Käytännössä tehopiikkeihin ja vuorokausittaiseen kulutusvaihteluun varautuminen vaatii kuitenkin lisäkeinoja kuten varastoinnin hyödyntämistä. Pelkästään esimerkiksi kuukausittaisia energiamääriä tarkastelemalla kaukojäähdytyksestä voi saada turhankin hyvän kuvan.

Kiinteistökohtaista jäähdytysjärjestelmää kaukojäähdytyksellä korvattaessa saavutetaan myös muita etuja, kuten tuottavaan käyttöön vapautunut kerrosala, meluongelmien poistuminen ja vähäinen huollontarve. Nämä eivät kuitenkaan sinällään kuulu energiatehokkuuden piiriin, vaikka edistävätkin rakennetun tilan tehokasta käyttöä.

Yksi oletetuista kaukolämpöjärjestelmien muutoksista tulevaisuudessa on käyttöveden osuuden kasvaminen kokonaiskulutuksesta. Viimeisen kymmenen vuoden sisällä rakennettujen asuintalojen osalta puhutaan yleensä noin viidenneksen osuudesta. Tässä tutkimuksessa uusilla 2010 rakennusmääräysten mukaisilla taloilla käyttöveden osuus kokonaiskulutuksesta on 38 %, passiivitaloilla jo 53 %. Eteläisen niemenkärjen alueella

tutkittujen ”lähes nolla” -talojen kohdalla luku on jo 77 %. Pohjimmiltaan kyse on siitä, että energiakulutus laskee nopeammin kuin tehontarve. Muutos on selkeä ja vaikuttaa jonkin verran kaukolämpöverkon mitoittamiseen käyttöveden alkaessa vaikuttaa voimakkaammin käytettäviin putkikokoihin. Tuntitasolla verkkoa tarkasteltaessa Kalasataman kaltaisella alueella ongelmia ei kuitenkaan synny. Periaatteessa tunnin sisällä tilanne voi hetkittäin olla toinen, mikäli asiaa ei suunnitteluvaiheessa oteta huomioon.

Tiiveimmille eteläisen nimenkärjen asuinalueille toteutettu merivesilämpöpumppua lämmönlähteenä käyttävä pieni aluelämpöjärjestelmä vaikuttaa suoritetun tarkastelun perusteella varsin kilpailukykyiseltä ratkaisulta perinteisiin kaukolämpöjärjestelmiin nähden, erityisesti tarkastelussa käytetyille erittäin energiatehokkaille ”lähes nolla” -tyyppisille rakennuksille. Rakennusten kuukausittainen kulutusprofiili on passiivitaloja tasaisempi, mikä tekee järjestelmän mitoittamisen periaatteessa helpommaksi vaikkakin käyttöveden osuus hallitsee kulutusta. Valittu tiiviisti rakennettu alue varmistaa suhteellisen korkean kulutustiheyden, mikä puolestaan mahdollistaa jakeluverkon taloudellisen toteutuksen. Alustavan tarkastelun mukaan kuvatus kaltainen ratkaisu voisi olla mahdollinen samantyyppisille alueille. Ratkaisun etuna on myös korkea uusiutuvan energian osuus lämmityksen energiankulutuksesta. Sama alue aurinkolämpöjärjestelmällä varustettuna vaikutti myös toimivalta vaikkakin tarkastelussa tehtiin se oletamus, että kesäaikaan syntyvälle ylimääräiselle lämpöenergialle löytyisi lähiympäristöstä kuluttaja ja tämä pystyisi laskemaan paluulämpötilan normaalille 20 - 30 °C tasolle. Kesäaikaan kulutus koostuu käytännössä pelkästään luonteeltaan hetkittäisestä käyttöveden lämmityksestä, minkä takia paluulämpötilan pitäminen jatkuvasti halutulla tasolla on käytännössä mahdotonta ilman muuta kulutusta tai lämpövarastoa.

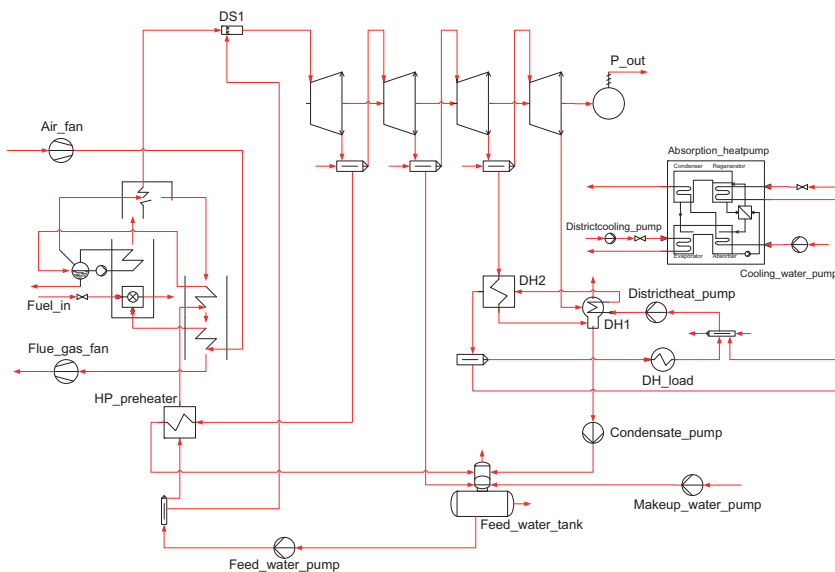
## 7. Energiantuotanto ja teollisuus

### Lähtökohdat

Teollisuusosiossa tutkittiin Kalasataman aluetta energiantuotannon ja teollisuuden energiatehokkuuden mittarein. Työn tarkoituksena oli laskea primäärienergiakertoimet ja CO<sub>2</sub>-päästöt eri energiantuotantovaihtoehdoille. Kertoimien ja päästöjen kohdentaminen sähkölle ja lämmölle tehtiin hyödynjakomenetelmällä. Laskennan perustana olevat kulutusluvut perustuvat rakennus- ja energiasektoreiden arvoihin sisältäen kaukolämpö- ja kaukokylmäverkon häviöt (ks. taulukko 4).

Laskentaa varten alueelle suunniteltiin erilaisia energiantuotantovaihtoehtoja. Koelaskennassa alueelle tuotiin myös biojalostamo, joka kytkettiin yhdyskunnan yhteyteen. Biojalostamon päätuote on biovaha ja sen sivutuotteita ovat kaukolämpö ja sähkö. Raaka-aineena biojalostamossa voidaan käyttää biomassaa erimuodoissa sekä mahdollisesti lajiteltua yhdyskuntajätettä.

Kalasataman energiantuotantoa tarkasteltiin yhteensä viiden eri vaihtoehdon avulla. Voimalaitokset suunniteltiin ja mallinnettiin käyttämällä Balas-simulointiohjelmaa, joka on tarkoitettu pääasiallisesti sellu- ja paperiprosessien mallintamiseen. Voimalaitokset mitoitettiin Kalasataman lämmön pysyvyyskäyrän mukaisesti, jolloin osa lämmöntarpeesta (huipputarve + kesäaika) oletetaan tuotettavan muualla. Kaukokylmän tuotannossa tarkasteltiin tavallista lämpöpumppua sekä absorptiolämpöpumppua. Oman kaukokylmän tuotannon oletetaan kattavan 50 % Kalasataman alueen tarpeesta. CHP-laitoksen (=Combined Heat and Power) minimikuorma oletetaan kaikissa tapauksissa olevan 30 %. Kuvassa 16 on esitetty Balas-ohjelmalla mallinnettu CHP-laitos ja absorptiolämpöpumppu. Kuvassa 16 DH1 ja DH2 ovat kaukolämmönvaihtimet 1 ja 2 sekä DS1 on tuorehöyrynlämpötilan säätö.



Kuva 16. Periaatekuva CHP-laitoksesta ja absorptiolämpöpumpusta.

Perusenergiantarpeen lisäksi tarvittava lisäenergia (lämpö, sähkö, kylmä) oletettiin tuotettavan kahdella eri tavalla. Ensimmäinen vaihtoehto perustuu tämän hetken oletettuun marginaalituotantotapaan, jossa lämpö oletetaan tuotettavan kevytöljykäyttöisessä lämpökattilassa ja sähkö tuotetaan hiiltä polttoaineenaan käyttävässä lauhdevoimalaitoksessa. Kylmä oletetaan tuotettavan talokohtaisella kompressorijäähdytyksellä. Toisessa vaihtoehdossa kaukolämpö- ja kylmä oletetaan tulevan Helsingin Energian olemassa olevista järjestelmistä. Lisäsähkö perustuu Suomen keskimääräisen tuotannon lukuihin, jotka on määritetty vuosien 2000 - 2008 keskiarvona (Keto 2010).

## Laskentavaihtoehtojen kuvaukset

Laskentavaihtoehdoissa 1a ja 1b oma lämmön- ja sähköntuotanto perustuu biomassaa polttoaineenaan käyttävään CHP-voimalaitokseen. CHP-laitoksen kaukolämpöteho on 15 MW ja vuotuinen käyntiaika 6 440 tuntia. Kaukokylmän tuotanto toteutetaan lämpöpumpulla kattava 50 % kulutuksesta. Lämpöpumppu tuottaa toimiessaan myös kaukolämpöä. Oma tuotanto kattaa 69 % lämmön- ja 40 % sähköntarpeesta. Vaihtoehdossa a. lisälämpö tuotetaan kevytöljyä polttoaineenaan käyttävällä lämpökattilalla, lisäsähkö hiililauhdevoimalaitoksessa ja lisäkylmä talokohtaisella kompressorilla. Vaihtoehdossa b. lisälämpö- ja kylmä perustuvat Helsingin Energian tuotantoon ja lisäsähkö markkinakeskiarvoon.



*Laskentavaihtoehdot 2a ja 2b* ovat muuten samat kuin kohdassa 1, mutta kaukokylmä tuotetaan yksivaiheisella absorptiolämpöpumpulla. Lämmön lähteenä käytetään CHP-laitoksen vastapainehöyryä. Koska lähes koko kylmän tarve esiintyy kesäaikana, jolloin CHP-laitos on normaalisti vuosihuollossa, laitos käy pidempään kuin vaihtoehdossa 1. Laitoksen vuosittainen käyntiaika on 8 520 tuntia. Tässä vaihtoehdossa 2 oletetaan myös, että tuottaessaan kaukokylmää laitos tuottaa samalla Kalasataman alueen tarvitseman lämmön. Tämä lisää laitoksen vuosittaista lämmön- ja sähköntuotantoa, mutta samalla lisäänty myös polttoaineen kulutus verrattuna vaihtoehtoon 1. Absorptiolämpöpumpun sähköntarve on erittäin pieni suhteessa tuotettuun kylmätehoon, joten sitä ei ole huomioitu laskelmissa. Kiertoaineena on oletettu vesi-litium-bromidi-seos ja vuosittainen kylmäntuotanto on sama kuin lämpöpumpuvaihtoehdoissa. Lisäenergiatuotanto toteutetaan kuten kohdissa 1a ja 1b.

*Laskentavaihtoehdoissa 3a ja 3b* Kalasataman alueelle tuotu biojalostamo tuottaa nk. biovaahtaa, joka voidaan jatkojalostaa nestemäisiksi liikennepolttoaineiksi esim. Nesteen Porvoon jalostamolla. Prosessi perustuu biomassan kaasutukseen ja Fischer-Tropsch-prosessiin (ks. kuva 17). Laitoksen tuottama lämpö käytetään sähkön ja kaukolämmön tuotantoon. Tässä vaihtoehdossa on oletettu sama kaukolämpöteho kuin vaihtoehdoissa 1 ja 2. Laitoksen vuotuinen käyntiaika on 8 000 tuntia. Turbiini on varustettu lauhdeperällä, koska yhdyskunnan kaukolämpötarve vaihtelee vuorokauden- ja vuodenajan mukaan, mutta FT-laitos tuottaa toimiessaan ilman häiriöitä lämpöä jatkuvasti saman määrän. Alhaisina kaukolämmöntarpeen aikoina ylimääräinen FT-prosessin lämpö johdetaan lauhdeperään sähkön tuottamiseksi. FT-prosessin tuottama poistokaasu (off-gas) sisältää lämpöarvoltaan hyviä hiilivetyjä, jotka poltetaan kaasukattilassa höyryn tuottamiseksi. Kaasukattilan tuottama höyry johdetaan samaan turbiiniin kuin FT-prosessin höyry. Varapolttoaineena kaasukattilassa voidaan käyttää maakaasua. Lisäenergian tuotanto kuten kohdissa 1a ja 1b.

*Laskentavaihtoehto 4* vastaa vaihtoehtoa 1 sillä erolla, että yhdyskunnan lämmön-, sähkön- ja kylmäntarve ovat alhaisempia ja kaukolämpömenoveden lämpötila on 70 °C kaikissa tilanteissa. Alueen alhaisempi energiankulutus johtuu passiivitaloista. Kaukokylmän tarve tässä tapauksessa on varsin pieni, joten omaa kaukokylmän tuotantoa ei ole otettu huomioon tarkasteluissa. CHP-tuotannossa on oletettu alhaisempi rakennusaste kuin muissa vaihtoehdoissa johtuen laitokseen pienenenemisestä. Lisäenergia tuotetaan kuten kohdassa 1b.

*Laskentavaihtoehdossa 5* Kalasataman alueen rakennukset ovat nettonollaenergiataloja, joissa lämmöntuotanto perustuu aurinkokeräimiin. Lisäksi aurinkopaneeleilla tuotetaan osa alueen sähkön tarpeesta ja osa perustuu Suomen keskimääräiseen tuotantoon. Kylmäenergia tuotetaan lämpöpumpulla.

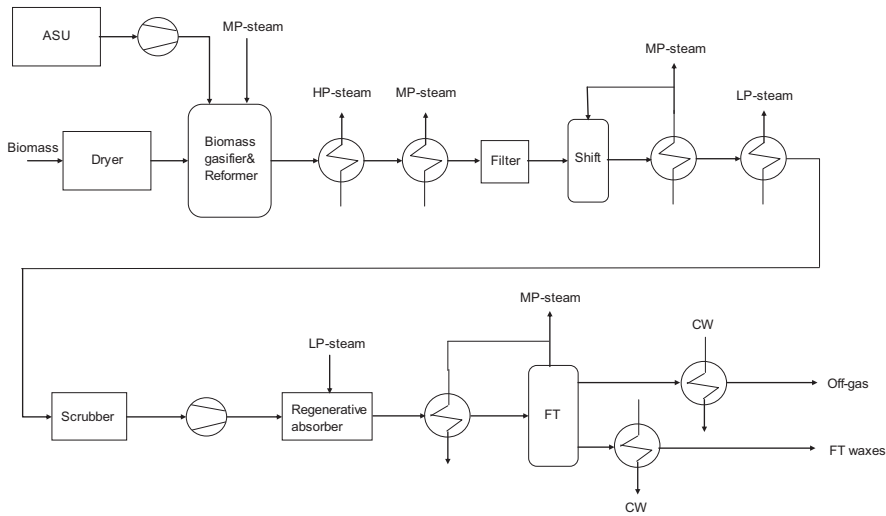
Lisäksi varsinaisten laskelmien ohien on tuotettu vertailuvaihtoehtoja. Ne edustavat kolmea tapaa tuottaa kaikki Kalasataman tarvitsema energia Kalasataman ulkopuolella ts. ilman Kalasataman omaa tuotantoa. Ensimmäisessä vaihtoehdossa kaikki lämpö- ja kylmäenergia oletetaan tulevan Helsingin Energian verkosta ja sähkö perustuu Suomen keskimääräiseen tuotantoon. Toisessa vaihtoehdossa lämmön- ja sähköntuotanto (kylmän tuotanto sis. sähkön osuuteen) perustuvat molemmat Suomen keskimääräisiin lukuihin. Kolmannessa vaihtoehdossa em. energiantarve katetaan tämän hetken marginaalituotannolla. Kaikissa vertailuvaihtoehdoissa energiantarve perustuu oletukseen, että rakennustapa vastaa tämän hetken rakennustapaa (normitalot; ei passiivi/nollaenergiataloja eli alennettua kaukolämpöverkon lämpötilaa).

## **Biovahan tuotantolaitos**

Biovahaa tuotetaan Fischer-Tropsch-menetelmällä biomassaa kaasuttamalla. Vahojen jatkojalostus polttoaineiksi tapahtuu muualla. Prosessissa biomassaa ensin murskataan ja kuivataan 15 %:n loppukosteuteen. Biomassan kuivauksessa käytetään lämmönlähteenä sekundäärilämpöä (kuumia vesiä ja lauheteita) ja matalapainehöyryä. Molempien osuudeksi on oletettu 50 % (todellisuudessa osuudet voivat vaihdella tarpeen mukaan).

Kaasutin on mallinnettu HSC-Chemistry-ohjelmalla, joka laskee synteetikaasun tasapainokoostumuksen minimoimalla ns. Gibbssin vapaan energian. Kaasuttimen hiilikonversion on oletettu olevan 100 %. Kaasuttimen jälkeen kevyet hiilivedyt (metaani, etaanini, propaani) reformoidaan höyryllä hiilimonoksidiksi CO ja vedyksi H<sub>2</sub>. Tervojen oletetaan hajoavan katalyyttisesti kaasuttimessa. Reformerin jälkeen synteetikaasu jäähdytetään tuottamalla korkeapaine- ja matalapainehöyryä. Tämän jälkeen kaasu johdetaan vaihtoreaktoriin, jossa höyryllä säädetään kaasun H<sub>2</sub>/CO-suhde sopivaksi FT-reaktoria varten (optimaalinen suhde kobolttikatalyytillä on 2,15). Vaihtoreaktori on mallinnettu myös HSC-Chemistry-ohjelmalla. Vaihtoreaktorin jälkeen synteetikaasu jäähdytetään ennen pesuria tuottaen välipaine- ja matalapainehöyryä.

Ennen FT-reaktoria synteetikaasun paine nostetaan 40 bariin ja kaasun sisältämät epäpuhtaudet poistetaan. FT-reaktori on matalalämpötilainen (240 °C) ja ns. lietetyypinen (slurry bed). Reaktorissa vedystä ja hiilimonoksidista muodostuu lyhyt- ja pitkäketjuisia hiilivetyjä. Hiilivedyt, jotka koostuvat viidestä tai useammasta hiiliatomista, ovat nk. vahamaisia tuotteita ja loput lyhyet hiilivedyt muodostavat nk. poistokaasun (off-gas). Reaktiossa vapautuu paljon lämpöä ja reaktorin lämpötilaa kontrolloidaan tuottamalla hieman tulistettua välipainehöyryä. Osa tästä höyrystä käytetään prosessissa ja loput voidaan tulistaa ja johtaa höyryturbiinille. Osa FT-prosessin poistokaasusta kierrätetään takaisin prosessiin konversion parantamiseksi. Loput kaasusta voidaan polttaa kattilassa tai kaasuturbiinissa energian tuottamiseksi. Kaasun takaisinkiertätyksen määrää voidaan muuttaa tilanteesta riippuen. Kuvassa 17 on esitetty periaatekuva tässä laskennassa käytetystä Fischer-Tropsch-prosessista.



Kuva 17. Periaatekuva Fischer-Tropsch-prosessista.

## Lähtötiedot

Taulukossa 4 on esitetty Kalasataman rakennusten vuotuiset kulutusarvot. Nämä luvut perustuvat rakennus- ja energiasektoreiden koelaskennassa tuottamiin arvoihin. Kaukolämpö- ja kaukokylmäverkoston häviöt sisältyvät arvoihin. Siirryttäessä passiivitaloihin lämmönkulutus laskee puoleen, mutta sähköntarve alenee vain jonkin verran. Kaukokylmän tarve putoaa reilusti alle puoleen. Nettonollaenergiataloissa lämmön ja kylmän tarve on olematon ja sähköntarve 35 % alkuperäisestä. Passiivitaloissa lämmitys on toteutettu alennetulla kaukolämpömenoveden lämpötilalla ja nettonollaenergiataloissa lämmitys hoidetaan pääasiallisesti aurinkokeräimillä.

*Taulukko 4. Kalasataman vuotuiset energiantarpeet eri tapauksissa.*

|            | Normitalot | Passiivitalot | Nollaenergiatalot |       |
|------------|------------|---------------|-------------------|-------|
| Kaukolämpö | 117        | 59            | 0                 | GWh/a |
| Jäähdytys  | 5,4        | 1,6           | 0,1               | GWh/a |
| Sähkö      | 78         | 60            | 28                | GWh/a |

## Tulokset

Taulukossa 5 on esitetty eri laskentavaihtoehtojen (ks. kappale 7.1) primäärienergiakerroimet ja CO<sub>2</sub>-päästöt. Lisäksi taulukossa on esitetty kolme vertailuvaihtoehtoa. Vertailuvaihtoehtojen heikointa ääripäätä edustaa se vaihtoehto, jossa koko energia oletetaan tuotettavan tämän hetken marginaalituotannon perusteella ("marginaali"). Keskimääräiset arvot edustavat Suomessa tuotetun sähkön ja kaukolämmön keskimääräisiä arvoja, jotka on laskettu vuosien 2000 - 2008 keskiarvona ("keskim."). CO<sub>2</sub>-kokonaispäästön laskennassa on käytetty kyseisen ajanjakson keskimääräisenä päästökertoimena lämmölle 216 g/kWh ja sähkölle 269 g/kWh (Keto 2010). Helsingin Energian tapauksessa ("Helen") vastaava kerroin lämmölle oli 104,5 g/kWh (Helsingin Energia, 2011) ja sähkölle sama kuin Suomen keskimääräinen luku. Helsingin Energian päästökerroin on laskettu vuosien 2009 ja 2010 keskiarvona. Taulukkoon 5 on merkitty lihavoinnilla vaihtoehdot, joita on hyödynnetty yhdyskuntatason vaikutusten laskennassa.

Taulukko 5. Lasketut primäärienergiakertoimet (PEK), primäärienergiankulutus (PE) ja CO<sub>2</sub>-päästöt eri vaihtoehdoille.

|  | LASKENTA CASE |              |       |       |       |              |              |             | VERTAILUARVOT |         |            |
|--|---------------|--------------|-------|-------|-------|--------------|--------------|-------------|---------------|---------|------------|
|  | 1a            | 1b           | 2a    | 2b    | 3a    | 3b           | 4            | 5           | Helen         | Keskim. | Marginaali |
| PEK(tot)   | 1.35          | <b>1.26</b>  | 1.36  | 1.28  | 1.35  | <b>1.30</b>  | <b>1.46</b>  | <b>0.85</b> | 1.13          | 1.40    | 1.67       |
| PEK(lämpö)   | 0.71          | <b>0.71</b>  | 0.75  | 0.75  | 0.23  | <b>0.09</b>  | <b>0.75</b>  | <b>0</b>    | 0.45          | 0.90    | 1.11       |
| PEK(sähkö)   | 2.40          | <b>2.17</b>  | 2.40  | 2.18  | 1.63  | <b>1.40</b>  | <b>2.17</b>  | <b>1.66</b> | 2.21          | 2.21    | 2.56       |
| PEK(kylmä)   | 0.56          | <b>0.52</b>  | 0.76  | 0.71  | 0.32  | <b>0.28</b>  | <b>0.55</b>  | <b>0.55</b> | 0.20          | 0.50    | 1.00       |
| PE(kulutus) [GWh/a]                                    | 300           | <b>250</b>   | 300   | 260   | 860   | <b>810</b>   | <b>180</b>   | <b>60</b>   | 230           | 280     | 340        |
| CO <sub>2</sub> -päästö [t/a]                          | 55660         | <b>17640</b> | 51340 | 16210 | 86070 | <b>26780</b> | <b>14620</b> | <b>7500</b> | 33500         | 46560   | 103750     |
| CO <sub>2</sub> -päästö [kg/MWh]<br>(tuotettu energia) | 278           | <b>88</b>    | 256   | 81    | 154   | <b>48</b>    | <b>121</b>   | <b>104</b>  | 167           | 233     | 310        |

Taulukossa 5 esiintyvät laskentavaihtoehdot:

Case 1a = Normitalot, oma CHP, lämpöpumppu, puuttuva energia marginaalituotannosta

Case 1b = Normitalot, oma CHP, lämpöpumppu, puuttuva energia Helen

Case 2a = Normitalot, oma CHP, absorptiolämpöpumppu, puuttuva energia marginaalituotannosta

Case 2b = Normitalot, oma CHP, absorptiolämpöpumppu, puuttuva energia Helen

Case 3a = Normitalot, FT, lämpöpumppu, puuttuva energia marginaalituotannosta

Case 3b = Normitalot, FT, lämpöpumppu, puuttuva energia Helen

Case 4 = Passiivitalot, oma CHP, puuttuva energia Helen

Case 5 = Nettonollaenergiatalot, aurinkokeräimet, puuttuva energia Helen

Helen = Lämpö- ja kylmäenergia Helsingin Energialta, sähköenergia Suomen keskimääräisestä tuotannosta

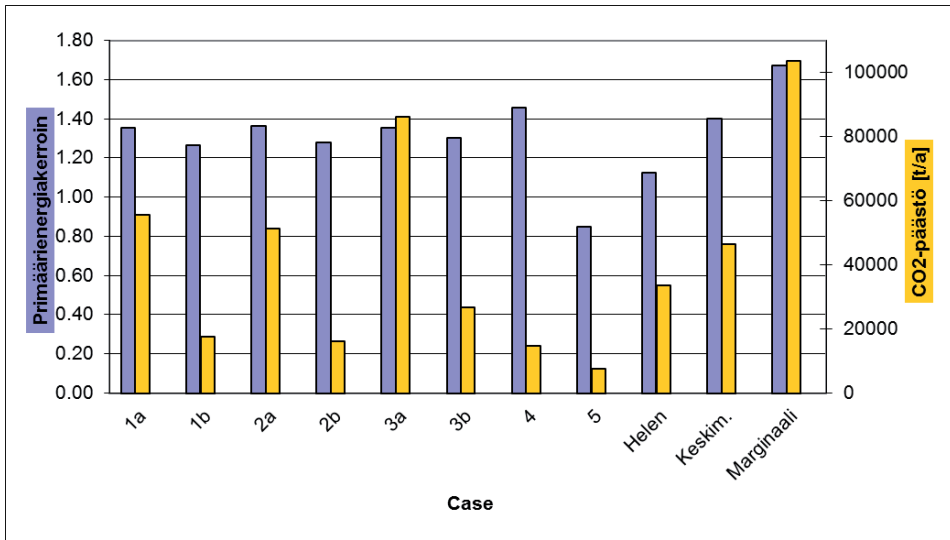
Keskim. = Lämpö- ja sähköenergia (kylmäenergia sisältyy sähkөөn) Suomen keskimääräisestä tuotannosta

Marginaali = Lämpö kevytöljykattilasta, sähkö hiililauhteella, kylmä kompressorijäähdytyksellä

Nettonollaenergiataloissa (vaihtoehto 5) päästöt ja primäärienergiankulutus ovat alhaisimmat. CO<sub>2</sub>-päästö tuotettua energiaa kohti (= ominaispäästö) ei ole kuitenkaan pienin ja se johtuu 1) suhteellisen suuresta ulkopuolisen sähkön osuudesta (suuri päästökerroin) verrattuna ko. vaihtoehdon omaan aurinkopaneelin tuottamaan lämpöön ja sähkөөn sekä 2) biomassan suuresta osuudesta muissa alhaisen CO<sub>2</sub>-ominaispäästön

vaihtoehdossa. Oman tuotannon CO<sub>2</sub>-päästöt ovat pienimmät vaihtoehdossa 4, jossa on oletettu oma bio-CHP sekä alennettu kaukolämpöverkon lämpötila. Ero ei ole kovin suuri verrattuna vaihtoehtoon 2b (normaali kaukolämpö), jossa absorptiolla tuotetaan kesäaikana kylmää mahdollistaen samalla suuremman kaukolämmön ja sähkön tuotannon kuin vaihtoehdossa 1b. Eron pienuus johtuu siitä, että siirryttäessä normitaloista passiivitaloihin oman voimalaitoksen sähköntuotanto alenee enemmän kuin rakennusten sähköntarve, mikä lisää sähkön ostoa ulkopuolelta (sähkö tuotettava muualla). Kaukolämpövoimalaitos mitoitetaan lämpökuorman mukaan ja siirryttäessä passiivitaloihin lämmöntarve alenee puoleen normitaloihin verrattuna. Oman laitoksen sähköntuotanto alenee enemmän kuin puolella, koska tarkastelussa on oletettu rakennusasteen pienenevän laitoksen pienentyessä.

FT-laitoksen (vaihtoehdot 3a ja 3b) korkeat päästöt selittyvät lisääntyneellä sähkön kulutuksella. FT-laitoksella syntyvälle sähkölle ja kaukolämmölle ei ole kohdennettu primäärienergiaa, koska laskennassa on oletettu vahan olevan päätuote ja lämmön syntyvän prosessissa joka tapauksessa vahan tuotannon seurauksena. Prosessissa syntyvä lämmöllä (=höyryä) tuotetaan sähköä ja kaukolämpöä. Tässä vaihtoehdossa on alhaisin CO<sub>2</sub>-päästö tuotettua energiaa kohti, mikä johtuu biomassan suuresta osuudesta kokonaisprimäärienergiankulutuksessa. Kuvassa 18 on esitetty taulukon 5 eri vaihtoehtojen (ks. 7.1) energiantuotannon kokonaisprimäärienergiakertoimet ja CO<sub>2</sub>-päästöt. Yhdyskuntatason tarkastelussa (luku 9) Kaupunkitehdas-vaihtoehdossa eivät ole mukana FT-laitoksen vahan tuotannon edellyttämän nettosähkönkulutuksen vaikutukset.



Kuva 18. Lasketut energiantuotannon primäärienergiakertoimet ja CO<sub>2</sub>-päästöt.

## Johtopäätökset

Laskenta (taulukko 5) vahvisti ne seikat, jotka yleensä ilmenevät siirryttäessä fossiilista vaihtoehdoista biomassapohjaisiin vaihtoehtoihin: CO<sub>2</sub>-päästöt (t/a) pienenevät ja samalla kokonaisprimäärienergiankulutus (MWh/MWh) lisääntyy. Primäärienergiankulutuksen kasvu johtuu mm. biomassan alemmasta energiatihedystä. Lisäksi taulukon 5 kaikista laskentavaihtoehtojen a- ja b-kohdista havaitaan, että oletetulla lisäenergian tuotantotavalla on suuri merkitys CO<sub>2</sub>-päästöön.

Tuloksista (taulukko 5) nähdään myös, että primäärienergiankulutusta suhteessa tuotettuun energiaan voidaan pienentää laitospkkoa kasvattamalla. Tämä johtuu siitä, että laitteiden suhteelliset häviöt ovat pienemmät suurissa laitoksissa. Lisäksi suuremmissa laitoksissa laitteiden kustannukset suhteessa niiden kokoon on pienempi. CO<sub>2</sub>-päästöt tuotettua energiaa kohti määräytyvät sen mukaan 1) paljonko biomassaa suhteessa muuhun polttoaineeseen käytetään, 2) paljonko tuotetaan yhteistuotannolla suhteessa marginaalituotantoon sekä 3) mikä on laitoksen koko. Helsingin Energian vaihtoehdossa primäärienergiankulutus on alhainen verrattuna muihin vaihtoehtoihin. Tämä selittyy sillä, että lasketut primäärienergiakertoimet edustavat korkean hyötysuhteen omaavan yhteistuotannon arvoja ja ison kokoluokan tuotantolaitoksien arvoja, jolloin myös mittakaavaetu tulee esiin. CO<sub>2</sub>-päästö ei ole kuitenkaan pienin. Tämä johtuu yhteistuotannossa käytettävistä fossiilisista polttoaineista kivihiilestä ja maakaasusta.

Taulukon 5 arvot on laskettu tämän hetken päästökertoimien perusteella. CO<sub>2</sub>-päästövähennyspotentiaalın laskennan lähtökohdaksi voidaan olettaa, että kaikki Kalasataman alueen energia tuotetaan joko Helsingin Energian vaihtoehdolla tai Suomen keskimääräisen tuotantoon perustuen (korkeimmat CO<sub>2</sub> päästöarvot taulukossa 5). Laskentavaihtoehtojen CO<sub>2</sub>-päästöjä on verrattu näihin päästöihin. CO<sub>2</sub>-päästövähennyspotentiaaliksi saadaan vertailukohdasta riippuen 52...65 % normitaloille laskettuna.

Siirtymällä normitaloista passiivitaloihin CO<sub>2</sub>-päästövähennyspotentiaaliksi tulee 56...69 % riippuen valitusta vertailuarvosta. Siirtymällä passiivitaloista nollaenergiataloihin potentiaaliksi saadaan 78...84 %. Tulevaisuudessa on tavoitteena lisätä Suomessa uusiutuvien energialähteiden osuutta sähkön ja lämmön tuotannossa. Tällöin päästövähennemä on edellä laskettuja lukuja suurempi, jos vertailu tehdään samoihin lukuarvoihin.

Energiatehokkuuden lisäksi alueen viihtyisyys ja asumismukavuus ovat huomionarvoisia asioita, kun suunnitellaan tietyn alueen energiantuotantovaihtoehtoja. Biovahan tuotantolaitoksen tulisi sijaita kaupungin laidalla, jotta rekka-autoliikenteellä ei olisi haitallista vaikutusta asumisviihtyvyyteen.

Biovahan tuotantolaitoksen integrointi energiantuotannon kanssa alentaa primäärienergiankulutusta verrattuna integroimattomaan tuotantoon. Lisäksi CO<sub>2</sub>-päästö on pienempi integroidussa tuotannossa. Jos tarkastellaan tilannetta, jossa biovaha tuotetaan erikseen omassa laitoksessa ja Kalasataman tarvitsema energia Helsingin Energian vaihtoehdolla, saadaan kokonaisprimäärienergian-kulutukseksi 833 GWh/a ja CO<sub>2</sub>-kokonaispäästöksi 35 300 t/a. Integroinnin seurauksena primäärienergiankulutus pienenee 23 GWh/a ja CO<sub>2</sub>-kokonaispäästö vastaavasti 8 500 t/a. (vrt. case 3b).



## 8. Liikenne

### Taustaa ja tutkimusmenetelmä

Yhdyskuntarakenteen vaikutusta liikkumisen energiatehokkuuteen on tutkittu vertailemalla Kalasataman suunniteltua sijaintia asukkaiden sijoittumiseen muualle Helsingin seudulle. Asuinalueen yhdyskuntarakenteellisen sijainnin ja erityisesti sen etäisyyden kaupunkikeskustasta ja alakeskuksista on havaittu vaikuttavan liikkumistottumuksiin. Keskustaetäisyyden ja asukkaiden päivittäisen liikennesuoritteen välillä on havaittu yhteys, jossa kaupunkiseutujen reunamilla asuvien päivittäinen liikennesuorite on huomattavasti suurempi kuin kaupunkien tiiviisti rakennetuilla alueilla asuvilla (esimerkiksi Hartoft-Nielsen 2001a, Hartoft-Nielsen 2001b, Christensen 2001, Naess 2006, Kitamura et al. 1999).

Tässä tutkimuksessa asukkaiden liikkumistottumuksia Kalasataman alueella on arvioitu soveltaen yhdyskuntarakenteen vyöhykemenetelmää (Ristimäki et al. 2011, Kalenoja et al. 2008). Vyöhykeanalyysissä kaupunkiseutu jaetaan 250 metrin ruutuina erityyppiin vyöhykkeisiin ruudun yhdyskuntarakenteellisen sijainnin ja joukkoliikennetarjonnan perusteella kuvan 19 mukaisesti. Yhdyskuntarakennetta on analysoitu vyöhykkeinä, joissa alueryhmät on jaettu joukkoliikenteen kannalta edullisiin vyöhykkeisiin, autovyöhykkeisiin sekä vyöhykkeisiin, joilla jalankulun ja pyöräilyn edellytykset ovat hyvät. Vyöhykekohtaiset liikkumistottumuksia kuvaavat tunnusluvut on vyöhykemenetelmässä määritetty Helsingin seudun laajan liikennetutkimusaineiston perusteella. (HSL 2007–2008)

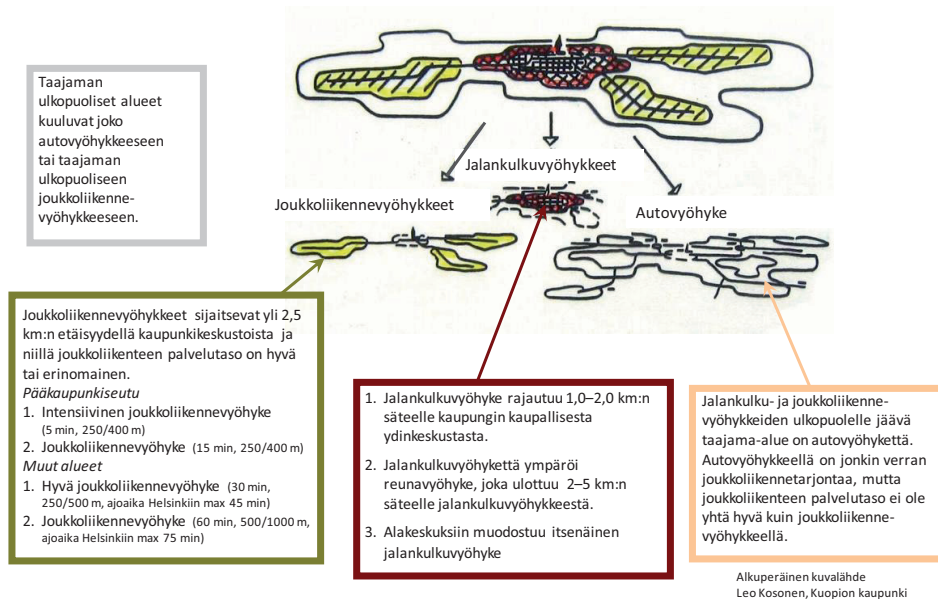
Keskustan jalankulkuvyöhyke on rajattu ulottumaan 1 - 2 kilometrin laajuiselle alueelle ja jalankulun reunavyöhyke 2 - 3 kilometrin etäisyydelle keskustasta. Pääkaupunkiseudun jalankulkuvyöhykkeen ympärille on lisäksi rajattu laaja noin 5 kilometrin etäisyydelle ulottuva reunavyöhyke. (Ristimäki et al. 2011)

Joukkoliikennevyöhyke on vyöhykemenetelmässä jaettu pääkaupunkiseudulla kahteen vyöhykkeeseen vuorotiheyden perusteella – intensiivisen joukkoliikennevyöhykkeen vuoroväli on enintään 5 minuuttia ja joukkoliikennevyöhykkeen enintään 15 minuuttia. Joukkoliikennevyöhykkeillä etäisyys bussi- tai raitiovaununpysäkille on enimmillään

250 metriä ja metro- ja junaliikenteen pysäkillä enintään 400 metriä. (Ristimäki et al. 2011)

Pääkaupunkiseudun ulkopuolella kehysalueilla taajamien hyvän joukkoliikennevyöhykkeen vuoroväli on vähintään 30 minuuttia ja etäisyys pysäkillä on enintään 250 metriä. Jos joukkoliikenne on luonteeltaan seudullista, etäisyydeksi pysäkillä on sallittu enintään 500 metriä, jos joukkoliikenteen ajoaika Helsingin keskustaan on korkeintaan 45 minuuttia. Joukkoliikennevyöhykkeellä vuoroväli on vähintään 60 minuuttia ja etäisyys bussipysäkillä on enintään 500 metriä ja asemanseudulle enintään 1 000 metriä. Lisäksi ajoaika Helsingin keskustaan on enimmillään 75 minuuttia. (Ristimäki et al. 2011)

Muut taajamaruudut kuuluvat autovyöhykkeeseen, jolla joukkoliikenteen palvelutaso ei täytä joukkoliikennevyöhykkeen kriteerejä.



Kuva 19. Yhdyskuntarakenteen vyöhykkeiden yleispiirteinen kuvaus. (Ristimäki et al. 2011)

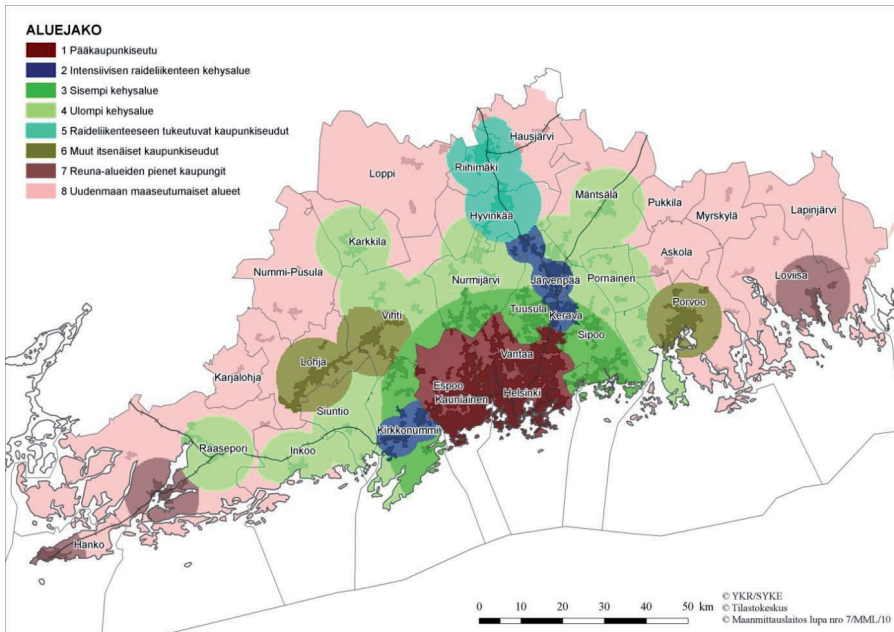
## Tutkitut vaihtoehdot

Laskennassa on vertailtu keskenään kolmea erilaista sijaintivaihtoehtoa, joissa kaikissa asukkaiden määrä on 18 000:

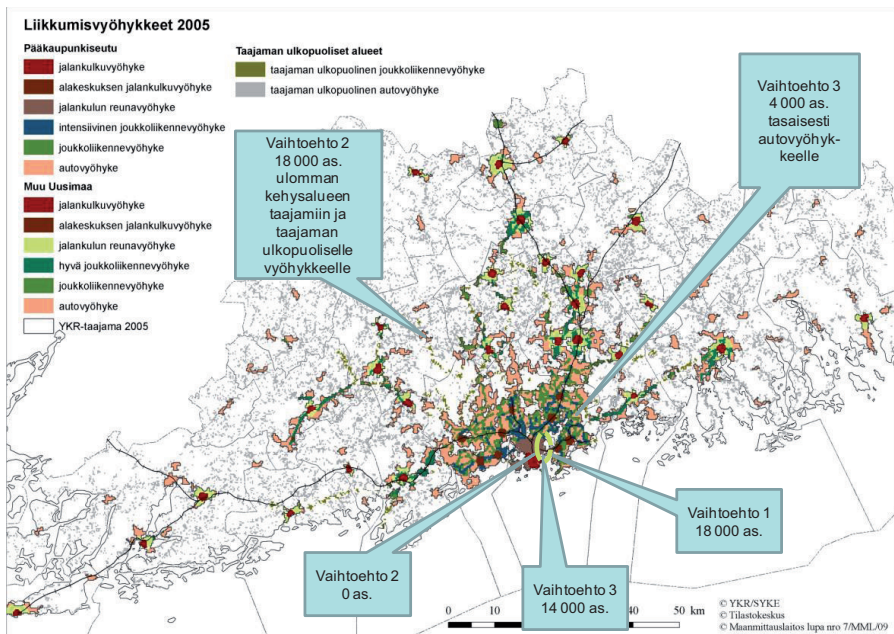
- Vaihtoehto 1. Kalasataman alueelle sijoittuu 18 000 asukasta.
- Vaihtoehto 2. Kalasataman asuntoaluetta ei toteuteta, asukkaista 12 000 sijoittuu uloimman kehysalueen taajama-alueille ja 6 000 ulommalle kehysalueelle taajaman ulkopuolelle.
- Vaihtoehto 3. Kalasataman asuntoalue rakentuu suunniteltua aluetehokkuutta pienempänä: alueelle sijoittuu 14 000 asukasta ja 4 000 asukasta sijoittuu pääkaupunkiseudun autovyöhykkeelle.

Vaihtoehdossa 1 Kalasataman alue toteutuu suunnitelmien mukaisesti suhteellisen tiiviinä jalankulun reunavyöhykkeen täydennysalueena. Vaihtoehdossa 2 Kalasataman asuntoalue ei toteudu, vaan asukkaat sijoittuvat kuvassa 20 esitetyle pääkaupunkiseudun ulommalle kehysalueelle. Vaihtoehdossa 3 Kalasataman asuntoalue toteutuu suunniteltua aluetehokkuutta pienempänä, jolloin osa uudistuotannosta sijoittuu pääkaupunkiseudun autovyöhykkeelle. Tarkasteluvuotena on vuosi 2030.

Vaihtoehtojen tiivistetty kuvaus ja yhdyskuntarakenteen vyöhykejako pääkaupunkiseudulla ja sen kehysalueilla on esitetty kuvassa 21.



Kuva 20. Yhdyskuntarakenteen aluejako ja pääkaupunkiseudun kehysalueiden sijainti. (Ristimäki et al. 2011)



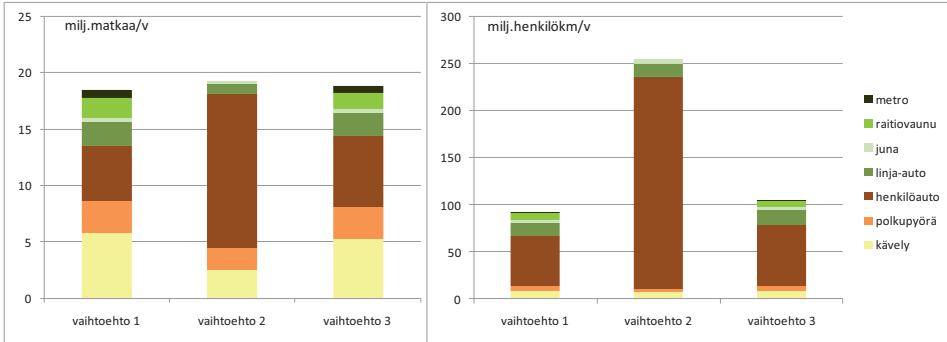
Kuva 21. Asukkaiden sijainti yhdyskuntarakenteen eri osissa tutkituissa vaihtoehtoisissa.

## Vaikutukset kulkutapajakaumaan ja liikennesuoritteeseen

Kalasadama sijoittuu jalankulun reunavyöhykkeelle, jossa on erinomainen joukkoliikenteen palvelutaso ja etäisyys keskustaan on lyhyt. Jalankulun reunavyöhykkeellä asuvat tekevät yli kolmanneksen matkoistaan joukkoliikenteellä ja jalankulun ja pyöräilyn osuus on lähes 40 prosenttia. Henkilöauton osuus jää liikkumismahdollisuuksiltaan monipuolisella jalankulun reunavyöhykkeellä noin neljännekseen asukkaiden tekemistä matkoista. Myös matkojen pituus on jalankulun reunavyöhykkeellä selvästi lyhyempi kuin autovyöhykkeellä. Henkilöautosuoritteiden määrä henkilökilometreinä asukasta kohti mitattuna on alle puolet autovyöhykkeellä asuvien henkilökilometriä verrattuna. (Ristimäki et al. 2011)

Ulomman kehysalueen sijaintivaihtoehdossa kulkutapajakauma muodostuu hyvin erilaiseksi, sillä ulomman kehysalueen autovyöhykkeillä yli 70 prosenttia matkoista tehdään henkilöautolla ja joukkoliikenteen osuus jää muutamaan prosenttiin. Lisäksi matkojen pituus on ulommalla kehysalueella suurempi kuin pääkaupunkiseudun tiiviisti rakennetuilla alueilla. Ulomman kehysalueen autovyöhykkeellä asukkaiden päivittäin henkilöautolla liikkumien kilometrien määrä on yli kaksinkertainen pääkaupunkiseudun autovyöhykkeeseen verrattuna. Vertailutilanteessa sekä henkilöauton suurempi kulkutapaosuus että matkojen suurempi pituus kasvattavat henkilöautoliikenteen ja lanjälkeä vaihtoehdossa 2.

Kuvassa 22 on esitetty tutkittavana olevien 18 000 asukkaan liikkumisesta aiheutuva liikennesuorite eri sijaintivaihtoehdoissa. Matkojen määrä on kaikissa vaihtoehdoissa melko samansuuruinen, sillä keskimääräinen matkaluku vaihtelee vain vähän yhdyskuntarakenteen eri sijainneissa. Sen sijaan matkojen kulkutapajakauma ja matkojen pituus ovat erilaisia. Vaihtoehdossa 1 vuosittainen henkilöautolla tehtävien henkilökilometriä määrä on 52 miljoonaa, kun vaihtoehdossa 2 henkilöautosuorite on 65 miljoonaa henkilökm ja vaihtoehdossa 3 yhteensä 225 miljoonaa henkilökm. Vaihtoehdossa 2 liikennesuorite on yli kaksinkertainen vaihtoehdoihin 1 ja 3 verrattuna. Vastaavasti kävelysuorite on vaihtoehdossa 2 noin 15 prosenttia ja pyöräilyosuus noin 40 prosenttia pienempi kuin vaihtoehdossa 1.

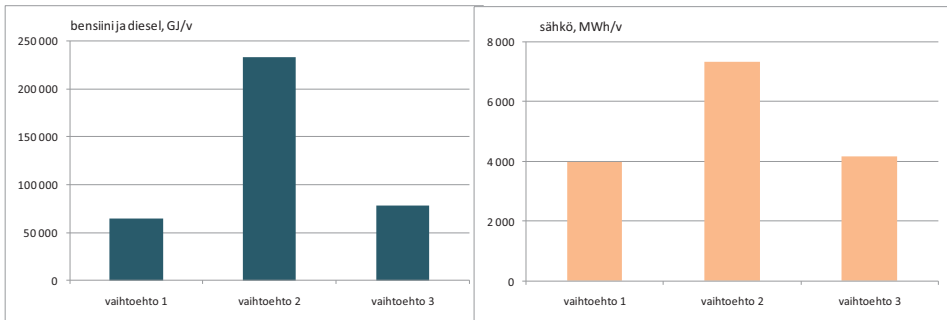


Kuva 22. Vuosittainen matkojen määrä ja liikennesuorite (henkilökilometriä) kulkutavoittain eri vaihtoehdoissa vuonna 2030.

## Vaikutukset liikenteen energiankulutukseen ja kasvihuonekaasupäästöihin

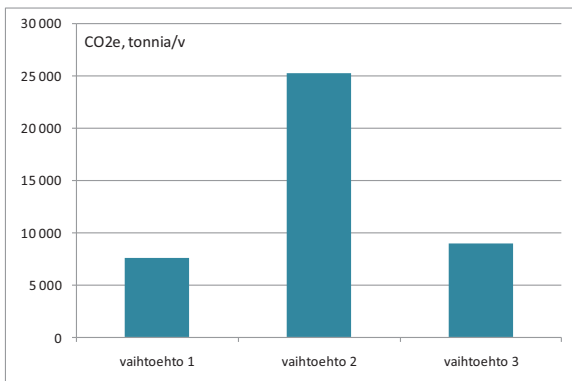
Liikenteen energiankulutusta ja kasvihuonekaasupäästöjen määrää on arvioitu liikennesuoritteiden sekä suoritekohtaisten yksikköpäästöjen perusteella. Yksikköpäästökerroimet perustuvat VTT:n Lipasto-järjestelmän mukaisiin kertoiimiin. Ajoneuvokannan energiatehokkuuden on ennakoitu paranevan noin 1,0 prosenttia vuodessa ja ajoneuvokannan kasvihuonekaasupäästöjen vähenevän 0,5 prosenttia vuodessa vuosina 2010 - 2030. Lisäksi sähköhybridiajoneuvojen ja sähkökäyttöisten ajoneuvojen on ennakoitu yleistävän siten, että noin 15 prosenttia henkilöautojen liikennesuoritteesta tehdään sähköllä.

Kuvassa 23 on esitetty tutkittavana olleen 18 000 asukkaan liikenteeseen kuluttaman bensiinin, dieselpolttonesteen ja sähkön vuosittainen määrä eri vaihtoehdoissa. Liikenteeseen kuluu yli nelinkertainen määrä energiaa vaihtoehdossa 2 Kalasataman vaihtoehtoihin verrattuna. Vaihtoehdossa 3 energiankulutus on noin viidenneksen suurempi kuin vaihtoehdossa 1.



Kuva 23. Vuosittainen asukkaiden liikkumiseen kuluva energia (bensini ja diesel (GJ) ja sähkö (MWh)).

Kuvassa 24 on esitetty vuosittainen liikkumisen aiheuttama kasvihuonekaasupäästöjen määrä eri vaihtoehdoissa. Liikkumisesta aiheutuu vaihtoehdossa 2 yli kolminkertainen määrä kasvihuonekaasupäästöjä Kalasataman sijaintivaihtoehtoihin nähden. Vaihtoehdossa 3, jossa Kalasataman alue toteutuu suunniteltua pienempänä, kasvihuonekaasupäästöjen määrä on 18 prosenttia suurempi kuin vaihtoehdossa 1.



Kuva 24. Vuosittainen asukkaiden liikkumisesta aiheutuva kasvihuonekaasupäästöjen määrä (tonnia).

## 9. Yhdyskunnat ja kokonaisarvio

### Lähtökohdat

Yhdyskuntatason tarkastelussa on yhdistetty kaikkien viiden tutkimussektorin tarkastelut yhdeksi kokonaisuudeksi: yhdyskunnat, liikenne, rakennukset, energian siirto ja jakelu, energiantuotanto ja teollisuus. Tarkastelun kohteena ovat Helsingin Kalasataman osayleiskaava-alueen suunnitelmat ja virtuaaliset ratkaisut. Tutkimuksessa on arvioitu primäärienergiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt erilaisissa vaihtoehtoissa. Arvioinnin perusteella tarkastellaan energiatehokkuuspotentiaaleja ja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämispotentiaaleja.

Laskennan pohjaksi on määritelty rakennusten, verkostojen ja muiden rakenteiden muodostama kokonaisuus. Arviointiin sisältyvät seuraavat tekijät:

- Perusrakenteeseen sitoutunut energia
  - Alueen rakenne – verkostojen ja muiden rakenteiden määrä – rakennusmateriaalien määrä – materiaalien tuotannon primäärienergiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt
- Rakennuksiin sitoutunut energia
  - Rakennusten sisältämien materiaalien määrä – materiaalien tuotannon primäärienergiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt
- Rakenteiden käytön aikainen energiankulutus
  - Lämmitys, lämmin vesi, jäähdytys, sähkön käyttö – primäärienergiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt (sisältää energian siirron, jakelun ja tuotannon)
- Liikenteen energiankulutus
  - Polttoaineiden ja sähkön kulutus – primäärienergiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt

Rakenteisiin sitoutuneella energialla tarkoitetaan tässä rakennusmateriaalien tuotannon edellyttämää primäärienergiankulutusta ja siitä aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä. Rakenteisiin sisältyvät materiaalimäärät on arvioitu yleispiirteisesti. Rakennusmateriaalien tuotannon primäärienergiankulutuksen ja kasvihuonekaasupäästöjen arvioinnissa on hyödynnetty VTT:n EcoBalance-mallia (Wahlgren 2009). Rakenteiden



elinkaareen sisältyvän tuotantovaiheen vaikutukset on muunnettu vuotuisiksi vaikutuksiksi jakamalla ne 50 vuoden ajalle.

Rakennusten, verkostojen ja muiden rakenteiden käytön aikainen primäärienergiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt on arvioitu yhdistämällä eri sektorien arvioinnin tulokset. Alueen toimintojen edellyttämä liikennetarve, matkatuotokset ja ajoneuvosuoritteet sekä niiden perusteella liikenteen energiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt on arvioitu liikenneryhmän arvioinnin tulosten perusteella.

Arvioinnin tuloksia tarkastellaan absoluuttisina (GWh/a, CO<sub>2</sub>-ekv.t/a), kerrosalaa kohden laskettuina (kWh/k-m<sup>2</sup>/a, CO<sub>2</sub>-ekv.t/k-m<sup>2</sup>/a) ja asukas- ja työpaikkamäärää kohden laskettuina (MWh/(as+tp)/a, CO<sub>2</sub>-ekv.t/(as+tp)/a). Nämä suhteelliset luvut vastaavat yhdyskuntien energiatehokkuusmittareita (EPO-tutkimusraportin osa 3).

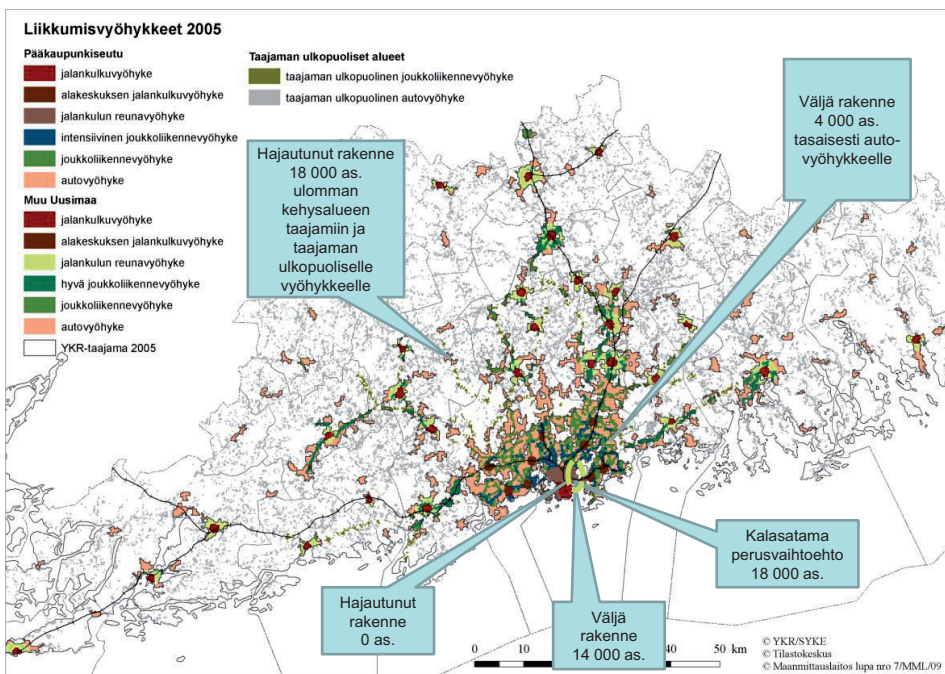
## Laskentavaihtoehdot

Yhdyskuntatason tarkastelussa on yhdistetty kaikkien sektoreiden käyttämät oletukset ja laskentatulokset. Tarkastellut vaihtoehdot ovat seuraavat:

- *Hajautunut yhdyskuntarakenne:* Kalasataman asuntoaluetta ei toteuteta, asukkaista 12 000 sijoittuu seudun uloimman kehysalueen taajama-alueille ja 6 000 ulommalle kehysalueelle taajaman ulkopuolelle (liikenne-osuuden vaihtoehto 2). Kalasataman toimitilat toteutuvat suunnitellusti. Muualle sijoittuvat asunnot: 2010 rakennustapa, talokohtainen lämmitys maalämmöllä ja sähköllä.
- *Väljä rakenne:* Kalasataman alue rakentuu suunniteltua aluetehokkuutta pienempänä: alueelle sijoittuu 14 000 asukasta ja 4 000 asukasta sijoittuu pääkaupunkiseudun autovyöhykkeelle (liikenne-osuuden vaihtoehto 3). Kalasataman toimitilat toteutuvat suunnitellusti. Kalasatamaan sijoittuvat asunnot kuten perusvaihtoehdossa, muualle sijoittuvat asunnot: 2010 rakennustapa, talokohtainen lämmitys maalämmöllä ja sähköllä.
- *Kalasatama, perusvaihtoehto:* Kalasatama toteutetaan suunnitelman mukaan. Alueelle sijoittuu 18 000 asukasta ja 10 000 työpaikkaa (liikenne-osuuden vaihtoehto 1). Rakennukset 2010 rakentamistapa, kaukolämpö ja kaukojäähdytys, energiantuotanto biomassaa polttoaineenaan käyttävällä CHP-voimalaitoksella (energiantuotanto- ja teollisuusosuuden vaihtoehto 1b).

- *Kalatatama, passiivitalot*: Rakennukset passiivitaloluokkaa, matalalämpöverkko, energiantuotanto biomassaa polttoaineenaan käyttävällä CHP-voimalaitoksella (energiantuotanto- ja teollisuusosuuden vaihtoehto 4).
- *Kalatatama, lähes nollaenergia -talot*: Rakennukset aurinkoenergiakonseptilla (nettonollaenergiatalot), lämpö aurinkokeräimillä, osa sähköstä aurinkopaneelilla, osa Suomen keskimääräisellä tuotannolla. Kylmäenergia lämpöpumpulla (energiantuotanto- ja teollisuusosuuden vaihtoehto 5).
- *Kalatatama, kaupunkitehdas*: Rakennukset 2010 rakentamistapa, kaukolämpö ja kaukojäähdytys. Kalatataman alueelle tuotu biojalostamo tuottaa biovaa, ylimääräinen lämpö hyödynnetään Fischer-Tropsch-menetelmällä (energiantuotanto- ja teollisuusosuuden vaihtoehto 3b), rakennusten sähkö Suomen keskimääräisellä tuotannolla.

Yhdyskuntarakenteelliset vaihtoehdot esitetään kuvassa 25.



Kuva 25. Yhdyskuntarakenteelliset vaihtoehdot.

## Arviointiperiaatteet ja lähtötiedot

### Rakennukset

Kuvassa 26 esitetään Kalasataman asunto- ja toimitilakerrosalan jakautuminen osa-alueille. Vastaavat tiedot olivat käytettävissä asukasmäärän kehitymisestä osa-alueittain.



Kuva 26. Kalasataman asunto- ja toimitilakerrosalan jakautuminen osa-alueille. (Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto)

Arvioinnin pohjana ovat Kalasataman alueen osalta seuraavat rakennusten kerrosalämäärät:

|                                       |                                  |
|---------------------------------------|----------------------------------|
| Kaupunkipientalot                     | 58 000 k-m <sup>2</sup>          |
| Asuinkerrostalot                      | 692 000 k-m <sup>2</sup>         |
| <i>Asunnot yhteensä</i>               | <i>750 000 k-m<sup>2</sup></i>   |
| Liike- ja toimistorakennukset         | 525 400 k-m <sup>2</sup>         |
| Palvelutilat                          | 45 000 k-m <sup>2</sup>          |
| <i>Toimitilat yhteensä</i>            | <i>570 400 k-m<sup>2</sup></i>   |
| <i>Rakennusten kerrosala yhteensä</i> | <i>1 320 400 k-m<sup>2</sup></i> |

Tarkastelun kohteena olevalle Kalasataman alueelle sijoittuu 18 000 asukasta ja 10 000 työpaikkaa. Kalasataman suunnitelmien mukainen asumisväljyys on keskimäärin noin 42 k-m<sup>2</sup>/asukas.

Muissa yhdyskuntarakenteellisissa vaihtoehdoissa toimitilojen oletetaan sijoittuvan suunnitelmien mukaisesti Kalasataman alueelle ja erot rakennusten osalta koskevat vain asuinrakennusten tyyppiä ja sijaintia. *Hajautuneen rakenteen* vaihtoehdossa kaikki 18 000 asukasta sijoittuvat Helsingin seudun ulommalle kehysalueelle. *Väljän rakenteen* vaihtoehdossa 14 000 asukasta sijoittuu Kalasataman alueelle ja 4 000 asukasta sijoittuu pääkaupunkiseudun autovyöhykkeelle.

Hajautuneen rakenteen vaihtoehdossa asuinrakennukset ovat omakotitaloja ja keskimääräinen asumisväljyys on 80 k-m<sup>2</sup>/asukas. Asuinrakennusten kerrosala on kaikkiaan 1 440 000 k-m<sup>2</sup> ja kokonaiskerrosala 2 010 400 k-m<sup>2</sup>.

Väljän rakenteen vaihtoehdossa Kalasataman ulkopuolelle sijoittuvat asuinrakennukset ovat omakotialoja. Asuinrakennusten kerrosala on yhteensä 903 300 k-m<sup>2</sup> ja kokonaiskerrosala 1 473 700 k-m<sup>2</sup>. Keskimääräinen asumisväljyys on 50,2 k-m<sup>2</sup>/asukas.

Rakennusten käytön aikainen primäärienergiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt on arvioitu ottaen huomioon rakennusten vuotuinen nettoenergiankulutus, energian siirron ja jakelun hyötysuhteet ja energiantuotannon hyötysuhteet ja ominaispäästöt eri vaihtoehdoissa. Rakennusten nettoenergiankulutusta koskevat tiedot perustuvat rakennuksia koskevan arvioinnin tuloksiin (luku 5). Kalasataman energian siirtoa ja jake-

lua koskevat tiedot perustuvat energiaryhmän arvioinnin tuloksiin (luku 6). Kalasataman energiantuotantoa koskevat arvioinnit perustuvat teollisuusryhmän arvioinnin tuloksiin (luku 7). Kalasataman alueen ulkopuolelle sijoittuvien asuntojen lämmitystavoiksi on oletettu 70 % maalämmitys ja 30 % sähkö.

## **Perusrakenne**

Perusrakenteeseen sisältyvät liikennealueet, kaukolämpö- ja kaukojäähdytysverkko, sähköverkko, vesihuoltoverkko ja tietoliikenneverkko sekä puistoalueet. Perusrakenteen osalta tarkastellaan vain materiaalien tuotannon edellyttämää primäärienergiankulutusta ja kasvihuonekaasupäästöjä. Verkostohäviöt ym. sisältyvät rakennusten energiankäyttöön. Rakenteiden laajuus on arvioitu Kalasataman osayleiskaavan illustraation, alueen asemakaavojen ja energiaryhmän laatimien kaukolämmitys- ja kaukojäähdytysverkkosuunnitelmien perusteella.

Kalasataman alueen verkostojen laajuutta arvioitaessa osa verkoista on oletettu jo rakennetuiksi. Näin on pyritty ottamaan huomioon täydennysrakentamisen merkitystä. Yhdyskuntarakennevaihtoehdoissa alueiden sisäisten verkostojen ja muiden rakenteiden laajuus on arvioitu keskimääräisen aluetehokkuuden perusteella. Hajautuvan rakenteen vaihtoehdossa Kalasataman alueen ulkopuolisen asutuksen osalta on käytetty aluetehokkuutta  $ea = 0,03$  ja väljän rakenteen vaihtoehdossa aluetehokkuutta  $ea = 0,1$ . Kytkentäverkkoja ei ole otettu huomioon.

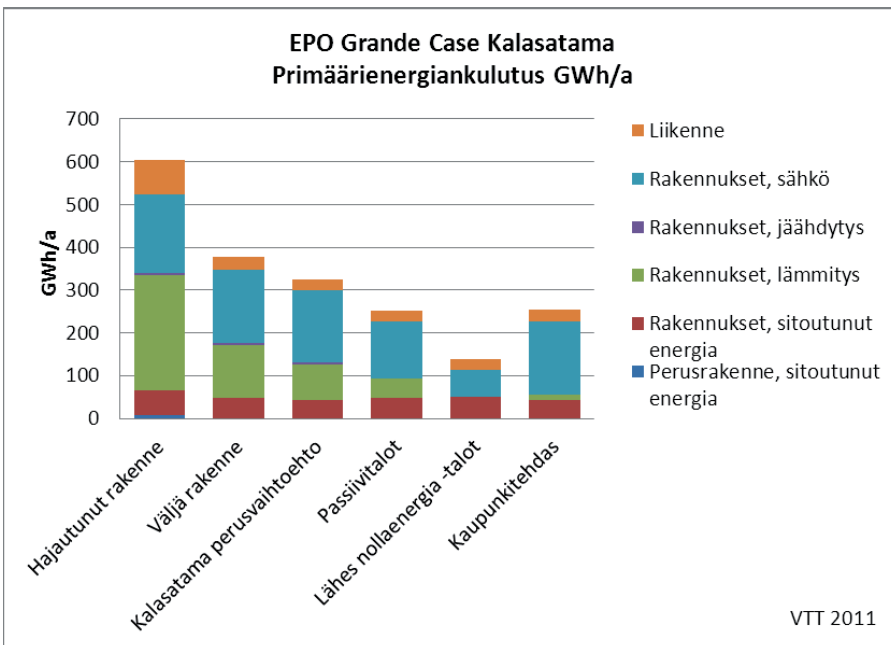
## **Liikenne**

Liikenteen osalta arviointimenetelmät ja tulokset on esitetty edellä luvussa 8. Näiden tietojen perusteella on laskettu liikenteestä aiheutuva vuotuinen primäärienergiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt, jotka on yhdistetty rakenteista aiheutuviin vaikutuksiin eri vaihtoehdoissa.

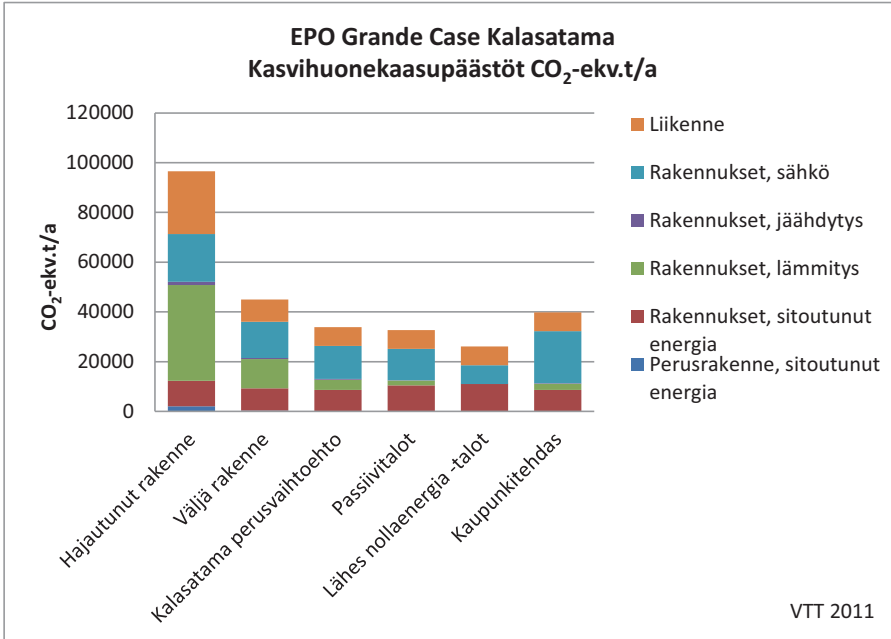
## Tulokset

Arvioinnin tuloksena esitetään tutkituista vaihtoehdoista aiheutuva vuotuinen primäärienergiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt. Näiden avulla voidaan tarkastella energiatehokkuuden parantamisen ja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen potentiaalia ja eri tekijöiden vaikutusta niihin. Laskentatulokset esitetään liitteen 1 taulukoissa ja kuvissa 27 – 32. Kaupunkitehdas-vaihtoehdossa tarkastelun ulkopuolelle on jätetty kaupunkitehtaan (FT-laitoksen, ks. luku 7) biovahan tuotannon nettosähkönkulutuksen vaikutukset, ja tarkastelussa ovat mukana rakennusten, perusrakenteen ja liikenteen vaikutukset samoin kuin muissa vaihtoehdoissa.

Kuvassa 27 esitetään tutkittujen vaihtoehtojen vuotuinen primäärienergiankulutus ja kuvassa 28 vuotuiset kasvihuonekaasupäästöt eri vaihtoehdoissa.



Kuva 27. Vuotuinen primäärienergiankulutus eri vaihtoehdoissa.



Kuva 28. Vuotuiset kasvihuonekaasupäästöt eri vaihtoehdoissa.

Tutkituista vaihtoehdoista aiheutuu vuosittain primäärienergiankulutusta 140 – 600 GWh ja kasvihuonekaasupäästöjä 26 000 – 96 000 CO<sub>2</sub>-ekv.tonnia. Hajautunut rakenne -vaihtoehto aiheuttaa eniten ja lähes nollaenergiatalot -vaihtoehto vähiten primäärienergiankulutusta ja kasvihuonekaasupäästöjä. Ero näiden vaihtoehtojen välillä on primäärienergiankulutuksen osalta 4,3-kertainen ja kasvihuonekaasupäästöjen osalta 3,7-kertainen. Tätä vertailua voidaan pitää energiatehokkuuden parantamispotentiaalin maksimina tässä Grande Case -laskennassa. Vähiten energiaa kuluttavan vaihtoehdon (lähes nollaenergiatalot) primäärienergiankulutus on vain 23 % eniten kuluttavasta (hajautunut rakenne), eli parantamispotentiaali on 77 %. Kasvihuonekaasupäästöjen osalta vähentämispotentiaali on vastaavasti 73 %.

Vaihtoehtoja voidaan vertailla niin, että kaikki vaihtoehdot ovat mukana, jolloin nähdään kokonaiset primäärienergiankulutuksessa ja kasvihuonekaasupäästöissä vaihtoehtojen välillä. Erilaisten tekijöiden merkitystä arvioitaessa vertailu voidaan jakaa yhdyskuntarakenteellisiin valintoihin (asutuksen ominaisuudet ja liikenteellinen sijainti) ja alueen sisäisiin ratkaisuihin (tässä erot Kalasataman rakennusten rakentamisvassa ja energiantuotannossa). Yhdyskuntarakennevaihtoehtojen tarkastelussa vertailaan hajautunutta rakennetta, väljää rakennetta ja Kalasataman perusvaihtoehtoa. Vertailukohteena on Kalasataman perusvaihtoehto. Hajautuneen rakenteen vaihtoehto

kuluttaa 86 % enemmän ja väljän rakenteen vaihtoehto 16 % enemmän primäärienergiaa kuin Kalasataman perusvaihtoehto. Kasvihuonekaasupäästöjen osalta suhteelliset erot ovat suuremmat: hajautuneen rakenteen vaihtoehto aiheuttaa 183 % enemmän ja väljän rakenteen vaihtoehto 32 % enemmän kasvihuonekaasupäästöjä kuin Kalasataman perusvaihtoehto. Erot näiden vaihtoehtojen välillä aiheutuvat liikenteestä, talotyypeistä, asumisväljyydestä, aluetehokkuudesta, lämmitysjärjestelmistä ja energiantuotantotavoista.

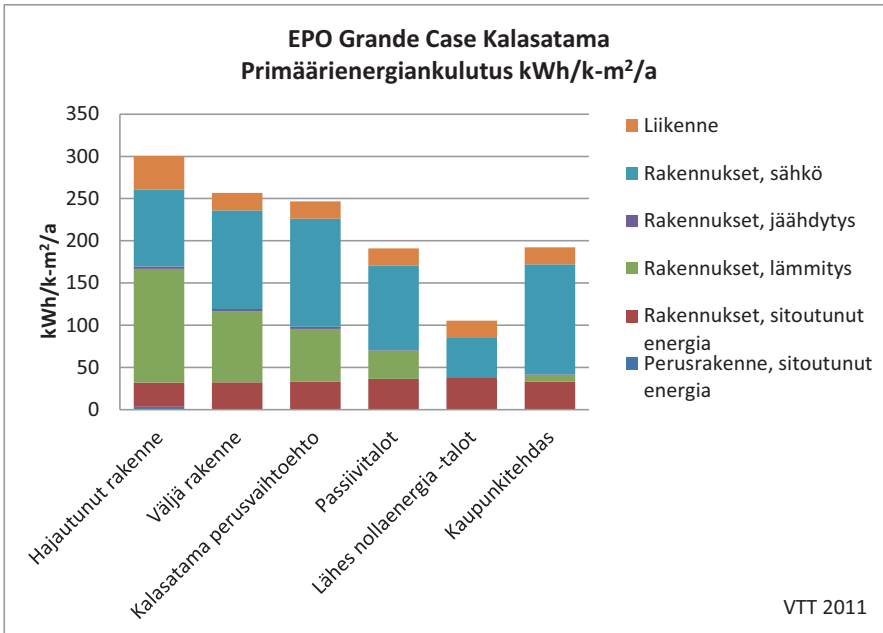
Kalasataman alueen sisäisten vaihtoehtojen tarkastelussa verrataan perusvaihtoehtoa, passiivitalovaihtoehtoa ja lähes nollaenergia -talovaihtoehtoa sekä energiantuotantoon liittyen kaupunkitehdasvaihtoehtoa. Passiivitalovaihtoehdosta aiheutuu primäärienergiankulutusta 23 % vähemmän ja lähes nollaenergia -talovaihtoehdosta 57 % vähemmän primäärienergiankulutusta kuin perusvaihtoehdosta. Passiivitalovaihtoehdon kasvihuonekaasupäästöt ovat 4 % pienemmät ja lähes nollaenergia -talovaihtoehdon kasvihuonekaasupäästöt 23 % pienemmät kuin perusvaihtoehdossa.

Kaupunkitehdasvaihtoehdon primäärienergiankulutus on 22 % perusvaihtoehtoa pienempi. Vaihtoehdosta aiheutuu kasvihuonekaasupäästöjä 17 % enemmän kuin perusvaihtoehdosta. Primäärienergiankulutuksen vähäisyys johtuu siitä, että kaukolämpö ja -kylmä saadaan FT-laitoksen tuotannon yhteydessä. Kasvihuonekaasupäästöt taas ovat Kalasataman perusvaihtoehtoa suuremmat, koska rakennuksissa käytetty sähkö tuotetaan alueen ulkopuolella ja sen vaikutukset on arvioitu Suomen keskimääräisen tuotannon mukaan (ks. luku 7). Tässä laskennassa ei ole mukana biovahan tuottamisen edellyttämä nettösähkönkäyttö.

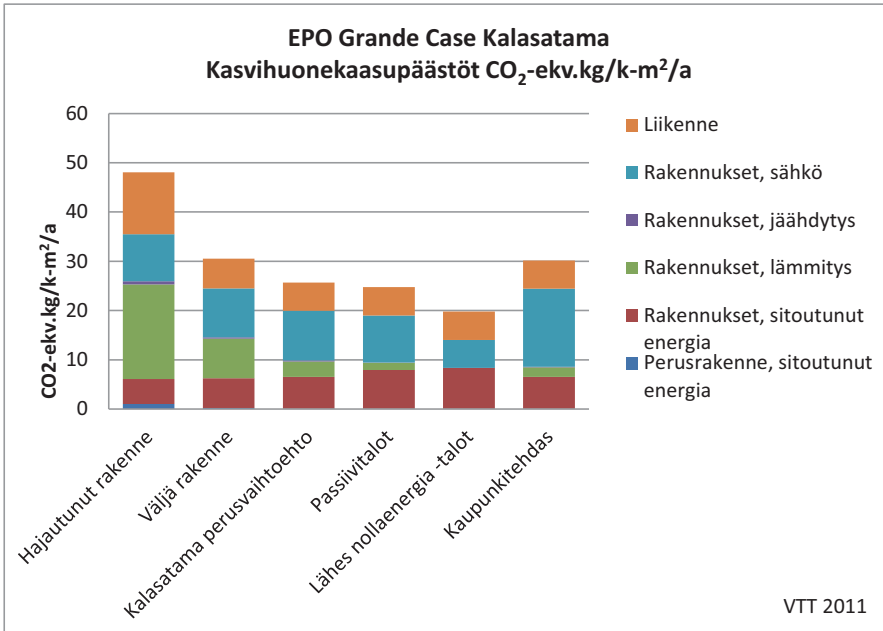
Kuvassa 29 esitetään vaihtoehtoista aiheutuva vuotuinen primäärienergiankulutus kerrosneliometriä kohden ja kuvassa 30 vuotuiset kasvihuonekaasupäästöt kerrosneliometriä kohden.

Kuvassa 31 esitetään vuotuinen primäärienergiankulutus ja kuvassa 32 vuotuiset kasvihuonekaasupäästöt asukas- ja työpaikkamäärää kohden laskettuna.

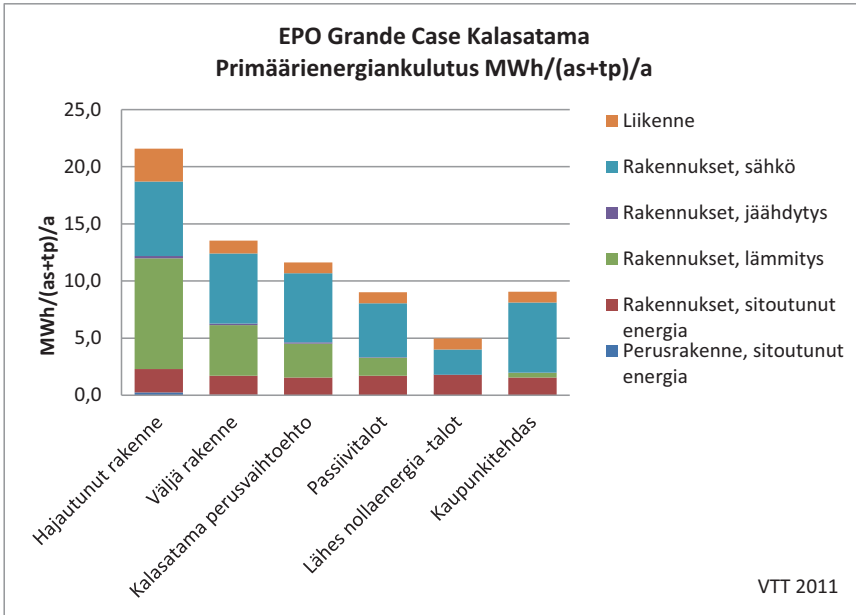




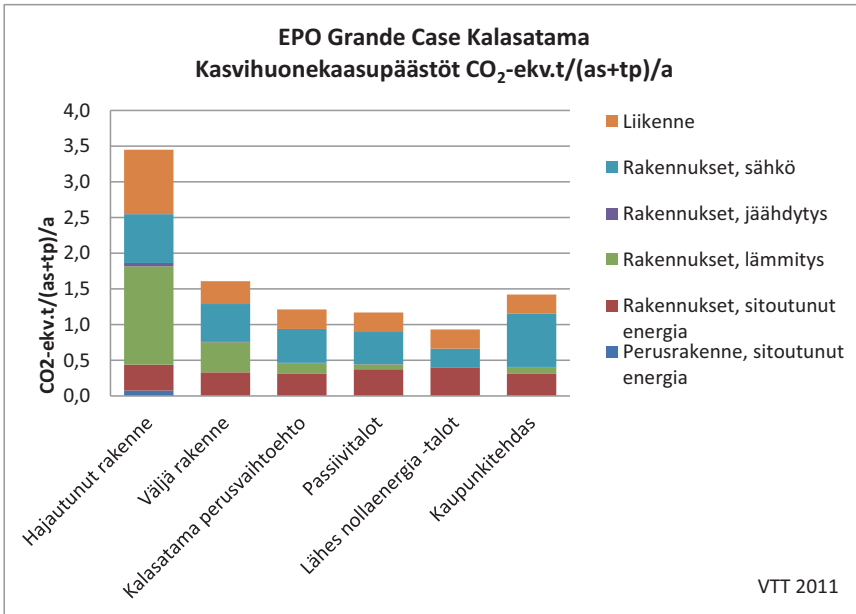
Kuva 29. Vuotuinen primäärienergiankulutus kerrosneliometriä kohden eri vaihtoehtoissa.



Kuva 30. Vuotuiset kasvihuonekaasupäästöt kerrosneliometriä kohden eri vaihtoehtoissa.



Kuva 31. Primäärienergiankulutus asukas- ja työpaikkamäärää kohden eri vaihtoehdoissa.



Kuva 32. Kasvihuonekaasupäästöt asukas- ja työpaikkamäärää kohden eri vaihtoehdoissa.

Kerrosalaa kohden laskettu vuotuinen primäärienergiankulutus on eri vaihtoehdoissa 105 – 301 kWh/k-m<sup>2</sup>/a ja kasvihuonekaasupäästöt 20 – 48 CO<sub>2</sub>-ekv.kg/k-m<sup>2</sup>/a. Suurin primäärienergiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt ovat hajautuneen rakenteen vaihtoehdossa ja pienin lähes nollaenergia -talovaihtoehdossa.

Asukas- ja työpaikkamäärää kohden laskettu vuotuinen primäärienergiankulutus on eri vaihtoehdoissa 5 - 22 MWh/(as+tp)/a ja kasvihuonekaasupäästöt 0,9 – 3,4 CO<sub>2</sub>-ekv.t/(as+tp)/a. Suurin primäärienergiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt ovat hajautuneen rakenteen vaihtoehdossa ja pienin lähes nollaenergia -talovaihtoehdossa.

Kerrosalaa kohden lasketuissa tuloksissa eivät näy asumisväljyyden erot vaihtoehtojen välillä. Tämä tarkastelu on perusteltua erityisesti, kun tarkastellaan rakennusten energiatehokkuutta. Vaihtoehtojen väliset suhteelliset erot ovat samat absoluuttisten ja asukas- ja työpaikkamäärää kohden laskettujen tulosten osalta, koska asukas- ja työpaikkamäärä on kaikissa vaihtoehdoissa sama. Asukas- ja työpaikkamäärää kohden laskettuja tuloksia voidaan hyödyntää vertailtaessa muita tutkimuskohteita tässä arviointiin. Lisäksi asukasta kohden lasketut tulokset olisivat perusteltuja liikenteen energiatehokkuutta tarkasteltaessa, koska arvioinnin kohteena on asukkaiden henkilöliikenne.

Yhdyskunnan primäärienergiankulutus jakautuu rakenteiden ja liikenteen osalta eri vaihtoehdoissa seuraavasti: perusrakenne 0,1 – 1,2 %, rakennukset 22 – 55 % ja liikenne 8 – 19 %. Kasvihuonekaasupäästöt jakautuvat seuraavasti: perusrakenne 0,2 – 2,2 %, rakennukset 28 – 52 % ja liikenne 19 – 29 %. Perusrakenteen osuus on pieni. Rakennukset aiheuttavat suurimman osan primäärienergiankulutuksesta ja kasvihuonekaasupäästöistä. Nykyrakentamistavalla rakennusten lämmityksellä on merkittävä osuus energiankäytöstä ja kasvihuonekaasupäästöistä, erityisesti talokohtaisen lämmityksen alueilla. Kalasataman alueella kaukolämpöjärjestelmä on hyvin energiatehokas. Passiivitalo- ja erityisesti lähes nollaenergia -talovaihtoehdoissa lämmitysenergian tarve saadaan pieneksi. Tällöin rakennusten tuotantovaiheen energian osuus kasvaa keskeiseksi. Rakennusten sähkönkäytöllä on merkittävä vaikutus kaikissa vaihtoehdoissa. Liikenteen primäärienergiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt ovat hajautuneen rakenteen vaihtoehdossa yli kolminkertaiset Kalasataman vaihtoehtoihin verrattuna. Myös liikenteen osuus alueen vaikutuksista kasvaa rakennusten energiatehokkuuden parantuessa. Liikenteen osuus on suurin hajautuneen rakenteen ja lähes nollaenergia -talovaihtoehdoissa.

## Yhdyskuntia ja kokonaisarviota koskevat johtopäätökset

Arvioinnin perusteella yhdyskunnan energiatehokkuuteen vaikuttavat oleellisesti sekä alueen yhdyskuntarakenteellinen ja liikenteellinen sijainti että sen sisäiset ratkaisut.

Yhdyskuntarakennevalinnoilla on keskeinen merkitys aiheutuviin vaikutuksiin. Alueiden sijainti vaikuttaa erityisesti liikenteeseen ja lisäksi asutuksen tyypillisiin ominaisuuksiin. Erot liikenteen energiankäytössä ja kasvihuonekaasupäästöissä voivat olla moninkertaiset eri tavoin sijaitsevien alueiden välillä.

Alueiden sisäisillä valinnoilla, kuten asumisväljyys (asuinpinta-ala asukasta kohden), aluetehtävyys (rakennusten kerrosala alueen maapinta-alaa kohden) ja lämmitysjärjestelmät, voidaan vaikuttaa energiatehokkuuteen ja kasvihuonekaasupäästöihin merkittävästi.

Rakennusten energiatehokkuuden parantamisella on suuri merkitys. Passiivitalo- ja lähes nollaenergia -vaihtoehtoissa rakennuksiin sitoutuneen energian merkitys kasvaa huomattavasti käytön aikaisen energiankulutuksen vähentyessä.

Energiantuotantojärjestelmän ominaisuuksilla (mm. mitoitus) ja polttoainevalinnoilla on suuri merkitys aiheutuviin vaikutuksiin.

Laskettujen vaihtoehtojen ääripäiden välinen potentiaali on noin 77 % energiankulutuksessa ja noin 73 % kasvihuonekaasupäästöjen osalta. Lasketuissa vaihtoehtoissa yhdyskuntarakennevalinnoilla voitiin saavuttaa noin 46 %:n vähennys energiankulutuksessa ja noin 65 %:n vähennys kasvihuonekaasupäästöissä. Rakennusten energiatehokkuuden parantamisella voidaan saavuttaa noin 57 %:n vähennys energiankulutukseen ja noin 23 %:n vähennys kasvihuonekaasupäästöihin.

Tutkimuksen mukaan yhdyskuntia kehitettäessä tulee kiinnittää huomiota sekä alueiden sijaintiin että niiden sisäisiin ratkaisuihin. Potentiaali tutkittujen vaihtoehtojen ääripäillä oli noin 77 % energiankulutuksessa, mikä on lähellä ilmasto- ja energiatavoitteiden mukaista vähentämistä.

## 10. Johtopäätökset

### Grande Case -laskennan päätulokset

Kalasadama sijaitsee erinomaisesti yhdyskuntarakenteessa. Alueella on tehokas ja vähän päästöjä aiheuttava liikennejärjestelmä. Liikenteen energiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt olivat laskentatulosten mukaan vain noin 30 % hajanaiseen yhdyskuntarakenteeseen verrattuna ja 85 % väljempään rakenteeseen verrattuna. Kalasataman toteuttaminen täydentää ja eheyttää yhdyskuntarakennetta. Alueella on suhteellisen suuri rakentamistehokkuus.

Kalasadaman perusrakenteen (verkot ja muut rakenteet) tarve on suhteellisen pieni johtuen suhteellisen suuresta rakentamistehokkuudesta (aluetehokkuudesta) ja siitä, että osa verkoista on valmiina.

Rakennusten primäärienergiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt ovat Kalasadaman perusvaihtoehdossa pienemmät kuin vaihtoehtoisissa yhdyskuntarakenteellisissa sijainneissa johtuen pienemmästä asumisväljyydestä ja edullisemmasta energiantuotantotavasta.

Passiivitalo- ja lähes nollaenergia -talaratkaisut parantavat energiatehokkuutta ja hillitsevät kasvihuonekaasupäästöjen lisäystä merkittävästi. Kalasadaman alueella on hyvät mahdollisuudet kehittyneisiin energiatehokkaisiin ja päästöjä hillitseviin energijärjestelmiin. Kaukolämpö- ja kaukojäähdytysverkon siirtohäviöt ovat erittäin pienet ja verkko on tehokas myös pienemmällä lämpöenergiatarpeella.

Rakenteisiin sitoutuneen energian määrä on suhteellisen pieni nykyisellä rakentamistavalla rakennettuna. Kun talot rakennetaan lähes nollaenergia -taloina, rakennusmateriaalien tuotannon edellyttämän energian suhteellinen osuus (ratkaisusta riippuen myös kokonaismäärä) kasvaa ja materiaalien tuotannon energiatehokkuuden haasteet kasvavat. Samoin alueen sijainnin merkitys korostuu.

Energiantuotannon primäärienergiankulutus ja hiilidioksidipäästöt vaihtelevat eri laskelmissa suuresti. Suuret laitokset ovat tuotantohyötysuhteeltaan keskimäärin pa-

permpia kuin pienet laitokset. Kasvihuonekaasujen määrään voidaan vaikuttaa etenkin polttoainevalinnoilla.

Yhdyskuntatason tarkastelussa alueen yhdyskuntarakenteellinen ja liikenteellinen sijainti on keskeinen energiankäytön ja kasvihuonekaasupäästöjen aiheutumisen kannalta. Erot liikenteen energiankäytössä ja kasvihuonekaasupäästöissä voivat olla moninkertaiset eri tavoin sijaitsevien alueiden välillä.

Alueiden sisäisillä ratkaisulla, kuten rakennusten rakentamistavalla ja energiajärjestelmillä, on merkittävä vaikutus yhdyskuntien energiatehokkuuteen ja aiheutuviin kasvihuonekaasupäästöihin. Rakennusten käytön aikainen energiankulutus (erityisesti lämmityksen osalta) voidaan saada vähennettyä vuositasolla lähes nollaan. Tällöin rakennuksiin sitoutuneen energian merkitys kasvaa, ja koko alueen energiatehokkuus ja aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt määräytyvät paljolti alueen sijainnin ja liikenteellisten olosuhteiden mukaan. Rakennusten edellyttämän energiankäytön vaikutukset määräytyvät keskeisesti energiantuotantotapojen perusteella.

Primäärienergiankulutuksen vähentämismahdollisuudet eri vaihtoehtoissa:

- 77 %:n vähennys eniten kuluttavasta vähiten kuluttavaan vaihtoehtoon
- 46 %:n vähennys hajautuneesta rakenteesta perusvaihtoehtoon
- 57 %:n vähennys perusvaihtoehdosta lähes nollaenergia -talovaihtoehtoon

Potentiaalit sektoreittain, energiansäästömahdollisuus:

- Henkilöliikenne 67 %
- Perusrakenne 96 %
- Rakennukset 63 %

Grande Case -osuus EPO-tutkimuksesta osoittaa, että on mahdollista tarkastella eri sektorien energiatehokkuutta yhteisessä kohteessa. EPO-tutkimuksen ensimmäisessä osassa kehitettyjä energiatehokkuuden mittareita voidaan hyödyntää hyvin kokonaisvaltaisessa energiatehokkuustarkastelussa.

EPO-tutkimuksessa kehitetyt mittarit ja laskentaperiaatteet soveltuvat yhteisessä kohteessa käytettäväksi ja yhdistettäväksi. Energiatehokkuuden parantamiseen ja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen liittyvät tavoitteet on mahdollista saavuttaa.

Kehitettyjä menetelmiä kannattaa hyödyntää koko Suomea koskeissa arvioinneissa. Koko Suomen energiatehokkuuden parantamispotentiaaleja voidaan arvioida, sekä sektoreittain (yhdyskunnat, rakennukset, energiajärjestelmät, teollisuus (tuotantoprosessit), liikenne ja logistiikka) että yhdistäen sektorikohtaisia tuloksia vastaavalla tavalla kuin tässä tutkimuksessa. Arvioinnin perusteella on mahdollista tuoda esiin erilaisten energiatehokkuutta edistävien toimien suuruusluokkia. Energiatehokkuuteen eniten vaikuttavia tekijöitä ovat yhdyskuntarakenteellinen sijainti, rakennusten energiatehokkuus ja energiajärjestelmän tehokkuus.

## **Sektorikohtaiset suositukset**

### **Rakennukset**

Rakennuksissa on saavutettavissa huomattavaa energiatehokkuuden paranemista suhteellisen pienillä lisäinvestoinneissa rakennusvaiheessa. Tarkastellussa tapauksessa passiivirakennukset ainakin puolittavat lämmitysenergiankulutuksen ja sähköenergiankin kulutus pienenee huomattavasti. Lähes nollaenergiarakennukset todella saavuttavat nettonollakulutuksen vuoden yli pientalojen tapauksessa, ja vähintään puolittavat nettokulutuksen muiden rakennusten kohdalla verrattuna passiivitasoon. Passiivirakentamisen kustannukset ovat tavallisesti n. 4–8 % korkeammat ja lähes nollaenergiatalojen 7–15 % korkeammat kuin normitalojen, mikä on erittäin kohtuullinen muutos suhteessa rakennusprojekteissa normaalistikin esiintyvään vaihteluun.

Passiivitaso on saavutettavissa ilman muutoksia nykyisen energiatuotantotavan ja jakeluverkkojen toimintamalliin. Myös kaukolämmön kulutus pysyy tiiviisti rakennetulla alueella tasolla, jossa nykyisen kaltaisen verkon ylläpito on järkevää. Nettonollaenergiatasoa tavoiteltaessa täytyy lämmön ja sähkön ajoittainen paikallinen ylituotanto pystyä siirtämään varastoon tai kulutuskohteisiin, mikäli sitä ei haluta hukata. Tämä edellyttää energiajärjestelmän sopeuttamista kaksisuuntaiseen energiansiirtoon ja tarvittaessa energian varastointiin.

## **Energian siirto ja jakelu**

Tutkimuksen tuloksena voidaan todeta, että tiivis kaupunkirakenne mahdollistaa tehokkaan, häviöiltään pienen kaukolämpöjärjestelmän toteuttamisen passiivirakentamisen yleistymisestä huolimatta.

Tulevaisuudessa lämmöntarpeen pysyvyyssäyrän huippu voi olla erittäin jyrkkä ja käyttöveden osuus kulutuksesta nousee selkeästi, mikä näkyy haasteina verkon ja koko järjestelmän mitoittamisessa. Tämä voi mahdollisesti näkyä muospaineina perinteiseen kaukolämpöhinnotteluun, sillä vähentyneestä kulutuksesta huolimatta järjestelmää täytyy ylläpitää. Erityisesti tilanne korostuu ns. kaksisuuntaisissa verkoissa, joissa kuluttajilla on mahdollisuus myydä ylimääräinen lämpöenergia kaukolämpöverkkoon päivän hintaan. Vähentyneestä energiankulutuksesta saadut säästöt eivät näin voi täysimääräisinä siirtyä kuluttajien hyödyksi jos nykyinen palvelutaso verkon osalta halutaan säilyttää. Kaukolämmön yksi kilpailuetu on luotettavuus, mistä tinkiminen voi olla teollisuudenalalle vahingollista. Kaukolämpö mahdollistaa myös tehokkaan sähkön ja lämmön yhteistuotannon, jolloin sähkö ja lämpö voidaan tuottaa pienemmällä polttoainemäärällä verrattuna erillistuotantoon ja vastaavasti vähennetään päästöjä.

## **Energiantuotanto ja teollisuus**

Bioenergian osuuden kasvattaminen energiantuotannossa pienentää laitoksen hiilidioksidipäästöä, kun bioenergia lasketaan hiilidioksidivapaaksi polttoaineeksi. Saman tuotannon aikaansaamiseksi tarvitaan suhteessa suuremmat polttoainevirrat. Polttoaineen kulutuksen kasvu johtuu mm. bioenergian alhaisemmasta energiatihedystä ja sen laadun epähomogeenisuudesta sekä biovoimalaitoksien keskimäärin alhaisemmasta hyötysuhteesta. Bioenergiatuotannon päästöihin, kuten kaiken energiantuotannon päästöihin, tulisi laskea lisäksi myös polttoaineen kuljetuksen aiheuttamat päästöt. Tämän vuoksi bioenergia pitää käyttää siellä missä kokonaisuus on edullisin. Näin tulee tehdä niin kauan kunnes kaikki Suomen energiantuotanto perustuu kokonaan uusiutuviin tuotantomuotoihin.

Energiantuotantoa ja -käyttöä on tarkasteltava yhtenä kokonaisuutena niin yhdyskunnissa kuin teollisuudessakin. Energiantuotantojärjestelmä on suunniteltava niin, että energian kulutus vastaa tuotantojärjestelmän osien yhteistä hyötysuhteen optimia joka hetki. Tämän vuoksi energiatehokkuuslaskelmissakin tulisi tehdä primääriener-



giamuunnos perustuen todelliseen energiantuotantojärjestelmään, joka koostuu erilaisista osista (sähkö, lämmitys, jäähdytys; huippukaudet). Yleisien primäärienergiaker toimien käyttö johtaa helposti vääriin tuloksiin. Tämän vuoksi niitä ei tulisi käyttää laskelmissa.

## **Liikenne**

Asuinalueen yhdyskuntarakenteellinen sijainti vaikuttaa laskentatulosten perusteella olennaisesti liikenteen energiankulutukseen ja kasvihuonekaasupäästöjen määrään. Vaikka matkojen määrässä ei ole havaittavissa suuria eroja yhdyskuntarakenteen eri osissa, matkojen kulkutapajakauma ja pituus muodostuvat erilaisissa sijaintikohteissa erilaiseksi. Saman asukasmäärän asuinalueen henkilöautolla tehty liikennesuorite voi kaupunkiseutujen kehysalueiden autovyöhykkeisiin perustuvissa sijaintivaihtoehtoissa olla moninkertainen taajamien joukkoliikennevyöhykkeisiin verrattuna. Mahdollisuudet joukkoliikennepalvelujen järjestämiseen ovat taajamien tiiviisti rakennetuilla palvelutarjonnaltaan hyvillä alueilla monipuoliset. Hyvä lähipalvelujen tarjonta antaa myös mahdollisuuksia lyhyisiin jalan tai pyörällä tehtäviin matkoihin. Yhdyskuntarakenteellinen sijainti ratkaisee pitkälti jalankulun, pyöräilyn ja joukkoliikenteen käytön mahdollisuudet arkiliikkumisessa.

## **Yhdyskunnat ja kokonaisarvio**

Yhdyskuntatason tarkastelu kokoaa yhteen eri sektorien energiatehokkuuden mittaamisen. Tarkastelussa ovat mukana alueen yhdyskuntarakenteellinen sijainti ja siitä aiheutuvat liikenteelliset vaikutukset ja erot asumisväljyydessä ja lämmitystavoissa sekä perusrakenteessa; alueen rakennukset ja niiden energiatehokkuutta parantavat ratkaisut; alueen energian siirron ja jakelun järjestelmät sekä alueen energiantuotannon vaihtoehtoiset tavat.

Alueen edullinen yhdyskuntarakenteellinen sijainti ja energiatehokkaat sisäiset ratkaisut yhdessä mahdollistavat energiatehokkaan yhdyskunnan muodostamisen. Yhdyskuntarakenteellisilla valinnoilla voidaan vähentää alueen primäärienergiankulutusta noin puoleen. Rakennusten energiatehokkuutta parantamalla voidaan vähentää alueen primäärienergiankulutusta edelleen noin puoleen. Jos alue sijaitsee yhdyskuntarakenteellisesti edullisesti ja sen sisällä tehdään edullisia ratkaisuja, kokonaisprimääriener-

giankulutusta ja aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä voidaan vähentää kaikkiaan noin 80 %. Alueen energiatehokkuutta arvioitaessa tulee ottaa huomioon sekä alueen sisäiset ratkaisut että alueen sijainnista aiheutuvat vaikutukset. Pelkästään alueen rakennusten energiankäyttöä ja energiajärjestelmiä tarkasteltaessa ei saada riittävää kokonaiskuvaa alueen vaikutuksista.

Yhdyskunnan energiatehokkuutta arvioitaessa tulee ottaa huomioon sekä alueen sijainti että sisäiset ratkaisut.

## Lähdeluettelo

Ahtila, P., Tuomaala, M., Siitonen, S., Kalenoja, H., Rantala, J., Kallionpää, E., Sipilä, K., Wahlgren, I., Shemeikka, J., Forsström, J., Tuominen, P., Halonen, M., Rämä, M., Pursiheimo, E. & Lahti, P. (2009). Measuring and potentials of energy efficiency (EPO). Energiatehokkuuden mittarit ja potentiaalit. In Veijonen, K., Holviala, N. & Seilo, M. (eds.) ClimBus – Business Opportunities in the Mitigation of Climate Change 2004-2008. Final Report. Tekes Programme Report 4/2009. Helsinki 2009. Pp. 386-399.

Christensen, L. 2001. Bystruktur og transportadfærd. Hvad siger Transportvaneundersøgelsen? Danmarks Miljøundersøgelser. DMU nr. 382. København.

Forsström, J., Lahti, P., Pursiheimo, E., Rämä, M., Shemeikka, J., Sipilä, K., Tuominen, P. and Wahlgren, I. 2011. Measuring energy efficiency. Indicators and potentials in buildings, communities and energy systems. VTT Research Notes 2581, Espoo, Finland. 107 p. + app. 5 p. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2011/T2581.pdf>

Hartoft-Nielsen, P. 2001a. Arbejdspladslokalisering og transportadfærd. Miljøministeriet. By- og landsplanserien Nr. 16-2001.

Hartoft-Nielsen, P. 2001b. Boliglokalisering og transportadfærd. Miljøministeriet. By- og landsplanserien Nr. 15-2001.

Helsingin Energia. <http://www.helen.fi>

Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto. Kalasataman aluetta koskevat aineistot. 2010.

HSL 2007–2008. Helsingin seudun laaja liikennetutkimus 2007–2008. Helsingin seudun liikenne HSL.

Kalenoja, H., Vihanti, K., Voltti, V., Korhonen, A. & Karasmaa, N. 2008. Liikennetarpeiden arviointi maankäytön suunnittelussa. Ympäristöministeriö. Suomen ympäristö 27/2008. Helsinki.

Keto, M. 2010. Energiamuotojen kertoimet rakennusten energiatehokkuuden määrittämiseksi. Diplomityö. Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu.

Kitamura, R., Yamamoto, T. & Kamio, R. 1999. Effectiveness of Land Use Policies in Densely Developed Urban Areas: An Energy Conservation Perspective. Urban Transport Systems: 2nd KFB Research Conference, Lund, Sweden. 17 p.

Naess, P. 2006. Accessibility, activity participation and location of activities: Exploring links between residential location and travel behaviour. Urban Studies, Vol. 43, No. 3. p. 627–652.

RIL 216-2001 -standardi.

Ristimäki, M., Kalenoja, H. & Tiitu, M. 2011. Yhdyskuntarakenteen vyöhykkeet. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 15/2011. Helsinki.

Tuomaala, M. (toim.) 2010. Energiatohokkuuden mittarit ja potentiaalit. Tutkimuksen väliraportti sisältäen sektorikohtaiset kirjallisuuskatsaukset. Aalto-yliopisto, VTT, Tampereen teknillinen yliopisto. 170 s.

Wahlgren, I. 2009. Assessing ecological sustainability in urban planning – EcoBalance model. In Koukkari, H. and Nors, M. (eds.) Life Cycle Assessment of products and Technologies. LCA Symposium. VTT Symposium 262, pp. 106-121.

<http://www.vtt.fi/inf/pdf/symposiums/2009/S262.pdf>

Wahlgren, I. 2011. Measuring energy efficiency in urban and regional planning. SB11 Helsinki, World Sustainable Building Conference, October 18-21, 2011. Abstract, Proceedings, Vol. 2, pp. 446 – 447. Full papers, Theme 4, Sustainable processes and eco-efficient technologies, pp. 621 – 628.

VTT 2011. Building the Future – Visions and technology opportunities in the built environment.

VTT. LIPASTO - Suomen liikenteen pakokaasupäästöjen ja energiankulutuksen laskentajärjestelmä. Liikenteen päästöt. Liikenteen yksikköpäästöt. VTT.

<http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/index.htm>

Ympäristöministeriö 2011. Rakennetun ympäristön osasto. D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012. Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta 2/11.

# Liite 1. Taulukot luvun 9 laskentatuloksista

Liite 1 - Taulukko 1. Vuotuinen primäärienergiankulutus

| <b>Primäärienergiankulutus GWh/a</b>   |                    |               |                            |               |                            |                |
|--|--------------------|---------------|----------------------------|---------------|----------------------------|----------------|
|  | Hajautunut rakenne | Väljä rakenne | Kalasadama perusvaihtoehto | Passiivitalot | Lähes nollaenergia - talot | Kaupunkitehdas |
| Perusrakenne, sitoutunut energia   | 7,0                | 1,1           | 0,3                        | 0,3           | 0,3                        | 0,3            |
| Rakennukset, sitoutunut energia  | 57                 | 47            | 43                         | 48            | 50                         | 43             |
| Rakennukset, lämmitys  | 271                | 124           | 83                         | 44            | 0                          | 11             |
| Rakennukset, jäähdytys   | 5,7                | 3,5           | 3,5                        | 0,9           | 0,04                       | 0,7            |
| Rakennukset, sähkö   | 183                | 172           | 169                        | 132           | 62                         | 172            |
| Liikenne   | 81                 | 31            | 27                         | 27            | 27                         | 27             |
| <b>Yhteensä</b>  | <b>604</b>         | <b>379</b>    | <b>326</b>                 | <b>252</b>    | <b>139</b>                 | <b>254</b>     |
| <b>Primäärienergiankulutus kerrosneliometriä kohden kWh/k-m<sup>2</sup>/a</b>  |                    |               |                            |               |                            |                |
|  | Hajautunut rakenne | Väljä rakenne | Kalasadama perusvaihtoehto | Passiivitalot | Lähes nollaenergia - talot | Kaupunkitehdas |
| Perusrakenne, sitoutunut energia   | 3,5                | 0,8           | 0,2                        | 0,2           | 0,2                        | 0,2            |
| Rakennukset, sitoutunut energia  | 29                 | 32            | 33                         | 36            | 38                         | 33             |
| Rakennukset, lämmitys  | 135                | 84            | 63                         | 33            | 0                          | 8              |
| Rakennukset, jäähdytys   | 2,8                | 2,4           | 2,6                        | 0,7           | 0,03                       | 0,6            |
| Rakennukset, sähkö   | 91                 | 117           | 128                        | 100           | 47                         | 130            |
| Liikenne   | 40                 | 21            | 20                         | 20            | 20                         | 20             |
| <b>Yhteensä</b>  | <b>301</b>         | <b>257</b>    | <b>247</b>                 | <b>191</b>    | <b>105</b>                 | <b>192</b>     |
| <b>Primäärienergiankulutus asukas- ja työpaikkamäärää kohden MWh/(as+tp)/a</b> |                    |               |                            |               |                            |                |
|  | Hajautunut rakenne | Väljä rakenne | Kalasadama perusvaihtoehto | Passiivitalot | Lähes nollaenergia - talot | Kaupunkitehdas |
| Perusrakenne, sitoutunut energia   | 0,2                | 0,04          | 0,01                       | 0,01          | 0,01                       | 0,01           |
| Rakennukset, sitoutunut energia  | 2,0                | 1,7           | 1,6                        | 1,7           | 1,8                        | 1,6            |
| Rakennukset, lämmitys  | 9,7                | 4,4           | 3,0                        | 1,6           | 0,0                        | 0,4            |
| Rakennukset, jäähdytys   | 0,2                | 0,1           | 0,1                        | 0,03          | 0,01                       | 0,03           |
| Rakennukset, sähkö   | 6,5                | 6,1           | 6,0                        | 4,7           | 2,2                        | 6,1            |
| Liikenne   | 2,9                | 1,1           | 1,0                        | 1,0           | 1,0                        | 1,0            |
| <b>Yhteensä</b>  | <b>21,6</b>        | <b>13,5</b>   | <b>11,6</b>                | <b>9,0</b>    | <b>5,0</b>                 | <b>9,1</b>     |

Liite 1 - Taulukko 2. Vuotuiset kasvihuonekaasupäästöt

| <b>Kasvihuonekaasupäästöt CO<sub>2</sub>-ekv. t/a</b>   |                    |               |                            |               |                            |                |
|---|--------------------|---------------|----------------------------|---------------|----------------------------|----------------|
|   | Hajautunut rakenne | Väljä rakenne | Kalasadama perusvaihtoehto | Passiivitalot | Lähes nollaenergia - talot | Kaupunkitehdas |
| Perusrakenne, sitoutunut energia  | 2097               | 337           | 82                         | 82            | 82                         | 82             |
| Rakennukset, sitoutunut energia   | 10185              | 8900          | 8543                       | 10404         | 10949                      | 8543           |
| Rakennukset, lämmitys   | 38546              | 11801         | 4160                       | 1900          | 0                          | 2529           |
| Rakennukset, jäähdytys  | 1332               | 447           | 243                        | 110           | 5                          | 181            |
| Rakennukset, sähkö  | 19164              | 14599         | 13295                      | 12608         | 7498                       | 20902          |
| Liikenne  | 25281              | 8945          | 7583                       | 7583          | 7583                       | 7583           |
| Yhteensä  | 96605              | 45030         | 33906                      | 32687         | 26116                      | 39820          |
| <b>Kasvihuonekaasupäästöt kerrosneliometriä kohden CO<sub>2</sub>-ekv. kg/k-m<sup>2</sup>/a</b> |                    |               |                            |               |                            |                |
|   | Hajautunut rakenne | Väljä rakenne | Kalasadama perusvaihtoehto | Passiivitalot | Lähes nollaenergia - talot | Kaupunkitehdas |
| Perusrakenne, sitoutunut energia  | 1,0                | 0,2           | 0,1                        | 0,1           | 0,1                        | 0,1            |
| Rakennukset, sitoutunut energia   | 5,1                | 6,0           | 6,5                        | 7,9           | 8,3                        | 6,5            |
| Rakennukset, lämmitys   | 19,2               | 8,0           | 3,2                        | 1,4           | 0,0                        | 1,9            |
| Rakennukset, jäähdytys  | 0,7                | 0,3           | 0,2                        | 0,1           | 0,004                      | 0,1            |
| Rakennukset, sähkö  | 9,5                | 9,9           | 10,1                       | 9,5           | 5,7                        | 15,8           |
| Liikenne  | 12,6               | 6,1           | 5,7                        | 5,7           | 5,7                        | 5,7            |
| Yhteensä  | 48,1               | 30,6          | 25,7                       | 24,8          | 19,8                       | 30,2           |
|   |                    |               |                            |               |                            |                |
| <b>Kasvihuonekaasupäästöt asukas- ja työpaikkamäärää kohden CO<sub>2</sub>-ekv.t/(as+tp)/a</b>  |                    |               |                            |               |                            |                |
|   | Hajautunut rakenne | Väljä rakenne | Kalasadama perusvaihtoehto | Passiivitalot | Lähes nollaenergia - talot | Kaupunkitehdas |
| Perusrakenne, sitoutunut energia  | 0,1                | 0,01          | 0,003                      | 0,003         | 0,003                      | 0,003          |
| Rakennukset, sitoutunut energia   | 0,4                | 0,3           | 0,3                        | 0,4           | 0,4                        | 0,3            |
| Rakennukset, lämmitys   | 1,4                | 0,4           | 0,1                        | 0,1           | 0,0                        | 0,1            |
| Rakennukset, jäähdytys  | 0,05               | 0,02          | 0,01                       | 0,004         | 0,0002                     | 0,006          |
| Rakennukset, sähkö  | 0,7                | 0,5           | 0,5                        | 0,5           | 0,3                        | 0,7            |
| Liikenne  | 0,9                | 0,3           | 0,3                        | 0,3           | 0,3                        | 0,3            |
| Yhteensä  | 3,5                | 1,6           | 1,2                        | 1,2           | 0,9                        | 1,4            |

Liite 1 - Taulukko 3. Vaihtoehtojen vertailua

| <b>Suhteelliset erot (Kalasatama perusvaihtoehto = 100)</b>  |   |  |  |  |  |                |
|--|---|--|--|--|--|----------------|
|  | Hajautunut rakenne  | Väljä rakenne  | Kalasatama perusvaihtoehto                               | Passiivitalot  | Lähes nollaenergia - talot                                   | Kaupunkitehdas |
| GWh/a  | 186   | 116  | 100  | 77   | 43   | 78             |
| kWh/k-m <sup>2</sup> /a  | 122   | 104  | 100  | 77   | 43   | 78             |
| MWh/(as+tp)/a  | 186   | 116  | 100  | 77   | 43   | 78             |
| 1000 CO <sub>2</sub> -ekv.t/a  | 285   | 133  | 100  | 96   | 77   | 117            |
| CO <sub>2</sub> -ekv.kg/k-m <sup>2</sup> /a  | 187   | 119  | 100  | 96   | 77   | 117            |
| CO <sub>2</sub> -ekv.t/(as+tp)/a   | 285   | 133  | 100  | 96   | 77   | 117            |
| <b>Energiansäästöpotentiaali ja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämispotentiaali (vaihtoehtojen suhde)</b> |   |  |  |  |  |                |
|  | Suurin/pienin (Hajautunut rakenne/ Lähes nollaenergiatalot) | Pienin/suurin (Lähes nollaenergiatalot/Hajautunut rakenne) | Sijainti (Kalasatama perusvaihtoehto/Hajautunut rakenne) | Rakennustapa (Lähes nollaenergiatalot/ Kalasatama perusvaihtoehto) | Energiantuotanto (Kaupunkitehdas/Kalasatama perusvaihtoehto) |                |
| GWh/a  | 4,347   | 0,23   | 0,54   | 0,43   | 0,78   |                |
| kWh/k-m <sup>2</sup> /a  | 2,855   | 0,35   | 0,82   | 0,43   | 0,78   |                |
| MWh/(as+tp)/a  | 4,347   | 0,23   | 0,54   | 0,43   | 0,78   |                |
| 1000 CO <sub>2</sub> -ekv.t/a  | 3,699   | 0,27   | 0,35   | 0,77   | 1,17   |                |
| CO <sub>2</sub> -ekv.kg/k-m <sup>2</sup> /a  | 2,429   | 0,41   | 0,53   | 0,77   | 1,17   |                |
| CO <sub>2</sub> -ekv.t/(as+tp)/a   | 3,699   | 0,27   | 0,35   | 0,77   | 1,17   |                |





# **Osa 3**

## **Sektorikohtaiset loppuraportit**



# Kirjoittajat

## **Kappale 1: Energiantuotanto**

Juha Forsström, Esa Pursiheimo, Miika Rämä ja Kari Sipilä

VTT Energiajärjestelmät

## **Kappale 2: Yhdyskunnat**

Irmeli Wahlgren ja Pekka Lahti

VTT Rakennusten teknologiat ja palvelut

## **Kappale 3: Rakennukset**

Pekka Tuominen ja Jari Shemeikka

VTT Rakennusten teknologiat ja palvelut

## **Kappale 4: Logistiikka**

Hanna Kalenoja, Erika Kallionpää ja Jarkko Rantala

TTY Tiedonhallinnan ja logistiikan laitos

## **Kappale 5: Prosessiteollisuus**

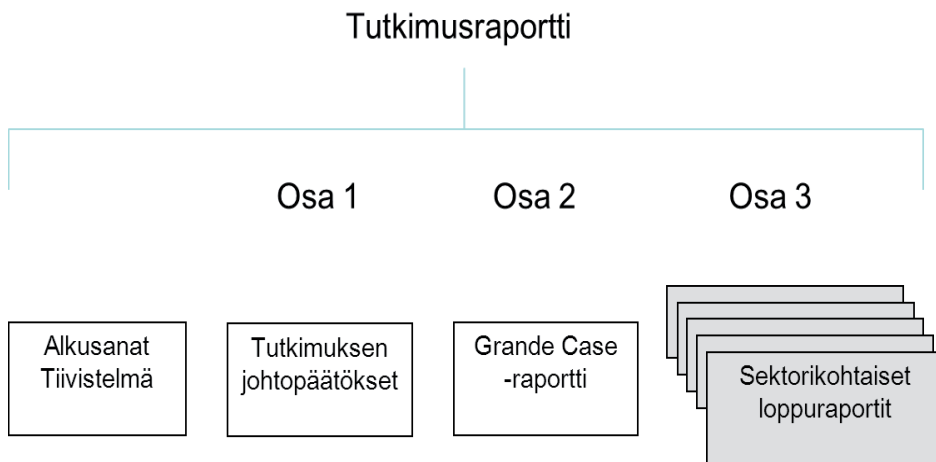
Mari Tuomaala ja Pekka Ahtila

Aalto-yliopisto Energiatekniikan laitos

# Alkusanat

Tutkimuksen raportointi jakaantuu kolmeen osaan: 1) tutkimuksen johtopäätökset, 2) ns. Grande-case raportti ja 3) sektorikohtaiset loppuraportit. Tämä raporttiosa 3 sisältää eri tutkimusryhmien töiden tulokset ja käsittelee energiatehokkuuden mittaamista ja potentiaalien laskentaa viidellä eri sektorilla (ks. kuva).

Sektorikohtainen tutkimustyö sisälsi kirjallisuuskatsaukset kyseiseltä sektorilta sekä tutkimusryhmäkohtaisia aihetta konkretisoivia koelaskentoja ja/tai syventäviä teoriatarkasteluita. Samanaikaisesti em. työn aikana järjestettiin työpajoja, joiden avulla pyrittiin tunnistamaan kaikille sektoreille yhteisiä energiatehokkuuden mittaamiseen ja potentiaalien laskentaan liittyviä teemoja. Joitakin teemoja käsiteltiin useissa työpajoissa. Yhteiset teemat jäsenyivät sisällysluetteloksi, joka näin ollen on kaikissa raporteissa yhtenäinen.



# Sisällysluettelo

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Energiantuotanto</b> .....  | <b>9</b>  |
| Tiivistelmä .....   | 10        |
| Abstract .....  | 12        |
| Symboliluettelo ja lyhenteiden selitykset .....                         | 14        |
| 1.1 Johdanto .....  | 15        |
| Tavoite15   |           |
| Kohteen kuvaus ja rajaukset.....  | 16        |
| Menetelmät .....  | 18        |
| 1.2 Taserajat.....  | 19        |
| Taserajat energian tuotantoketjun energiatehokkuuden mittaamisessa..... | 19        |
| Energian tuotannon taserajat .....                                      | 19        |
| Taserajojen liittymäkohdat muihin ryhmiin .....                         | 20        |
| 1.3 Energiatehokkuuden mittarit.....                                    | 22        |
| Mittareiden määrittelyn periaatteet.....                                | 22        |
| Energiantuotantoketjun mittarit.....                                    | 24        |
| Mittarit ja elinkaari .....   | 27        |
| Energian arvo mittaamisessa .....                                       | 30        |
| Käyttöasteen merkitys .....   | 32        |
| 1.4 Potentiaalilaskennan periaatteet.....                               | 34        |
| 1.5 Johtopäätökset.....   | 41        |
| Päähavainnot .....  | 41        |
| Toimenpide-ehtotuksia .....   | 42        |
| Tutkimustarpeita.....   | 42        |
| Lähdeluettelo .....   | 44        |
| Liite A. Lista energiatehokkuuteen liittyvistä direktiiveistä.....      | 45        |
| <b>2. Yhdyskunnat</b> .....   | <b>47</b> |
| Tiivistelmä .....   | 48        |
| Abstract .....  | 49        |
| Lyhenteiden selitykset .....  | 50        |
| 2.1 Johdanto .....  | 51        |
| Tutkimuksen tausta ja tavoite.....                                      | 51        |
| Kohteen kuvaus ja rajaukset.....  | 51        |
| Menetelmät .....  | 56        |
| 2.2 Taserajat.....  | 57        |
| Taserajat yhdyskuntien energiatehokkuuden mittaamisessa .....           | 57        |
| Yhdyskuntien taserajat .....  | 57        |
| Taserajojen liittymäkohdat muihin ryhmiin .....                         | 60        |
| 2.3 Energiatehokkuuden mittarit.....                                    | 62        |

|  |           |
|--|-----------|
| Mittareiden määrittelyn periaatteet.....                           | 62        |
| Yhdyskuntien mittarit.....   | 69        |
| Mittarit ja elinkaari.....   | 73        |
| Energian arvo mittaamisessa.....                                   | 77        |
| Käyttöasteen merkitys.....   | 77        |
| 2.4 Potentiaalilaskennan periaatteet.....                          | 78        |
| Yhdyskuntien energiatehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä.....        | 78        |
| Potentiaalilaskentakokeilu.....                                    | 79        |
| 2.5 Johtopäätökset.....  | 82        |
| Päähavainnot.....  | 82        |
| Toimenpide-ehdotuksia.....   | 82        |
| Tutkimustarpeita.....  | 83        |
| Lähdeluettelo.....   | 84        |
| <b>3. Rakennukset.....</b>   | <b>87</b> |
| Tiivistelmä.....   | 88        |
| Abstract.....  | 89        |
| Lyhenteiden selitykset.....  | 90        |
| 3.1. Johdanto.....   | 91        |
| Tavoite.....   | 91        |
| Kohteen kuvaus ja rajaukset.....                                   | 91        |
| Menetelmät.....  | 95        |
| 3.2 Taserajat.....   | 96        |
| Taserajat rakennusten energiatehokkuuden mittaamisessa.....        | 96        |
| Rakennuksen taserajat.....   | 96        |
| Taserajojen liittymäkohdat muihin ryhmiin.....                     | 97        |
| 3.3 Energiatehokkuuden mittarit.....                               | 100       |
| Mittareiden määrittelyn periaatteet.....                           | 100       |
| Rakennusten mittarit.....  | 104       |
| Mittarit ja elinkaari.....   | 112       |
| Energian arvo mittaamisessa.....                                   | 114       |
| Käyttöasteen merkitys.....   | 114       |
| 3.4 Potentiaalilaskennan periaatteet.....                          | 116       |
| 3.5 Johtopäätökset.....  | 119       |
| Päähavainnot.....  | 119       |
| Toimenpide-ehdotuksia.....   | 119       |
| Tutkimustarpeita.....  | 120       |
| Lähdeluettelo.....   | 121       |
| Liite B: Lista energiatehokkuuteen liittyvistä direktiiveistä..... | 123       |
| Liite C: Rakennuksen pinta-alan mittaaminen.....                   | 124       |

|   |            |
|---|------------|
| <b>4. Logistiikka.....</b>                                    | <b>125</b> |
| Tiivistelmä .....   | 126        |
| Abstract .....  | 127        |
| Symboliluettelo ja lyhenteiden selitykset .....               | 128        |
| 4.1 Johdanto .....  | 129        |
| Tavoite 129   |            |
| Kohteen kuvaus ja rajaukset.....                              | 130        |
| Menetelmät .....  | 131        |
| 4.2 Taserajat.....  | 132        |
| Taserajat logistiikan energiatehokkuuden mittaamisessa.....   | 132        |
| Logistiikan taserajat .....                                   | 133        |
| Taserajojen liittymäkohdat muihin ryhmiin .....               | 135        |
| 4.3 Energiatehokkuuden mittarit.....                          | 137        |
| Mittareiden määrittelyn periaatteet.....                      | 137        |
| Logistiikan energiatehokkuuden mittarit.....                  | 140        |
| Mittarit ja elinkaari .....                                   | 144        |
| Energian arvo mittaamisessa .....                             | 145        |
| Käyttöasteen merkitys .....                                   | 146        |
| 4.4 Potentiaalilaskennan periaatteet.....                     | 147        |
| 4.5 Johtopäätökset.....                                       | 151        |
| Päähavainnot .....  | 151        |
| Toimenpide-ehdotuksia .....                                   | 152        |
| Tutkimustarpeita.....   | 153        |
| Lähdeluettelo .....   | 154        |
| Logistiikan tutkimusosion julkaisut.....                      | 156        |
| <br>  |            |
| <b>5. Prosessiteollisuus .....</b>                            | <b>157</b> |
| Tiivistelmä .....   | 158        |
| Abstract .....  | 159        |
| Symboliluettelo ja lyhenteiden selitykset .....               | 160        |
| 5.1 Johdanto .....  | 161        |
| Tutkimuksen tausta ja tavoitteet.....                         | 161        |
| Prosessiteollisuussektorin tutkimus.....                      | 162        |
| Kohteen kuvaus ja rajaukset.....                              | 162        |
| Menetelmät .....  | 163        |
| 5.2 Taserajat.....  | 164        |
| Taserajat teollisuuden energiatehokkuuden mittaamisessa ..... | 164        |
| Teollisuuden taserajat.....                                   | 165        |
| Taserajojen liittymäkohdat muihin ryhmiin .....               | 166        |
| 5.3 Energiatehokkuuden mittarit.....                          | 168        |
| Mittareiden määrittelyn periaatteet.....                      | 168        |
| Prosessiteollisuuden mittarit.....                            | 169        |

|  |     |
|--|-----|
| Mittarit ja elinkaari .....                | 172 |
| Energian arvo mittaamisessa .....          | 174 |
| Käyttöasteen merkitys .....                | 176 |
| 5.4 Potentiaalilaskennan periaatteet.....  | 177 |
| 5.5 Johtopäätökset.....                    | 182 |
| Päähavainnot .....                         | 182 |
| Toimenpide-ehdotuksia .....                | 183 |
| Tutkimustarpeita.....                      | 184 |
| Lähdeluettelo .....                        | 185 |
| Teollisuuden tutkimusosion julkaisut ..... | 187 |



# 1. Energiantuotanto

Juha Forsström, Esa Pursiheimo, Miika Rämä ja Kari Sipilä

VTT Energiajärjestelmät

## Tiivistelmä

Energiajärjestelmä sisältää monilukuisen määrän ns. energiaketjuja eli reittejä, joiden varrella energialähteenä käytettävä raaka-aine kulkee mm. läpi jalostus- ja tuotantoprosessien loppukäyttöön lämpönä, sähkönä tai näiden yhdistelmänä. Lähes jokaisella energiaraaka-aineella on vaihtoehtoisia reittejä, jotka voivat jakautua ja liittyä toisiinsa uudestaan matkallaan kohti loppukäyttöä.

Energiaketjut ovat havainnollinen tapa tarkastella energiatehokkuutta ja vertailla eri vaihtoehtoja. Vertailu täytyy tehdä riittävän kattavasti, jotta kaikki vaikutukset tulevat huomioonotetuiksi. Eri tuotanto- ja kulutussektorit ovat tehokkaasti integroituneet keskenään, joten myös eri kulutussektorien väliset vaikutuksen täytyy tarkastella. Energia- ja tehokkuuden parantaminen vaatii investointeja ja kustannukset usein estävät monien teknisten parannusten toteutumisen.

Energian tuotannon taustakartoituksessa selvitetään miten energiatehokkuus esitetään määriteltäväksi eri energiaketjuissa. Säästöpotentiaalin laskemiseksi arvioidaan energiaketjujen tekniikan tuomat mahdollisuudet tulevaisuudessa vaihtoehtoisina skenaarioina. Tutkimuksessa arvioidaan myös muiden sektoreiden tehostamistoimien vaikutuksia primäärienergian tarpeeseen. Eri tuotantomuotojen aiheuttamien päästöjen laskennan perusteella arvioidaan ko. energian tuotantomuodon välittömät ympäristövaikutukset ja edelleen energiaketjun tehostamisen vaikutukset. Hankkeessa kehitetään ”laskentatyökalu” EPOEN- malli, jolla voidaan skenaariotekniikalla analyttisesti arvioida eri tehostamistoimenpiteiden vaikutuksia kansallisissa energiaketjuissa tavoitteena löytää tehokkaimmat toteutustavat.

Energian tuotantoketjuun liittyy monia mittareita, jotka voidaan ilmaista kulutuksena/MWh eli tuotettua energiayksikköä kohden kuten käytetty polttoaine, kuljetukset, huolto ja ihmistyömäärä sekä syntyvät siirtohäviöt, päästöt ja jätteet. Tuotteen laatu, käytettävyys, luotettavuus ja huipun käyttöaika täytyy ilmaista muulla tavoin. Rakennusaikaiset mittarit kuten kulutukset/MW eli rakennettua tehoa kohden ilmaisevat yhden keskimääräisen tehoyksikön rakennustehokkuutta kuten kulutettua betonia, terästä, kuparia, muovia, lasia, jne. Rakennusaikana kuluu myös energiaa. Käytön ja rakentamisen aikaisia mittareita voidaan verrata keskenään eri energian tuotantovaih-

toehdoissa tai ”bench markata” vastaavanlaiseen ja ikäiseen energian tuotantoon muualla.

Kulutuksessa säästetty energia on yleensä paras tapa säästää, koska se vaikuttaa läpi koko energiaketjun aina primäärienergiälähteeseen saakka. Säästetty energia ei kuitenkaan aina vaikuta suoraviivaisesti päästöjen vähentämiseen, vaan on syytä tarkastella loppukulutuksen kokonaisvaikutusta energiajärjestelmään.

Ympäristön kannalta päästötön ja luonnonmukainen energiantuotanto olisi paras vaihtoehto eli ei polteta mitään. Energian laadun huomioiminen (exergia) energiaketjussa pitäisi korostua enemmän. Sähkön säästö loppukulutuksessa on kannattavampaa kuin lämmön säästö, koska sen exergia-arvo on suurempi.

Energian tuotannossa pitäisi pyrkiä sulkemaan kaikki energiahukkavirrat ja palauttaa ne prosessiin tai käyttää toisen prosessin energialähteenä. Teoreettinen lämpötilaraja on ympäristön lämpötila. Suomessa on myös hyvät mahdollisuudet hyödyntää matalia lämpötiloja, koska lämmityskaudella ulkolämpötila on suurimmaksi osaksi pakkasen puolella.

CHP-laitosten mitoitusta pitäisi muuttaa vastaamaan paremmin tulevaa kaukolämmön lämpötilatarvetta. CHP-laitoksen turpiinin paisunta voitaisiin pidentää alentaen vastapainetta (rakennusasteen nosto) ja laskea kaukolämmön lämpötilaa sekä mitoittaa kaukolämpöverkko tarkemmin kulutustarpeen mukaan ja tehdä riittävä lämpöeristys sekä loppukuluttajilla pitää turvata riittävä lämpötilan pudotus.

## Abstract

Energy system consists of numerous alternative energy chains or routes, including the processing of raw materials, energy conversion, distribution and end use as electricity or heat or a combination of them. Almost all the energy raw materials have alternative routes, which can be divided and joined together again on the route to the end use.

Energy chain is an illustrative way to look at the energy efficiency and compare different alternatives. The comparing work has to be included all the possibilities, which have impact to the results. Different production and consumption sectors are effectively integrated to each other, so interfaces have to be taken care of between them. In some cases, high investment required to attain higher energy efficiency can prevent the improvements to be carried out.

Energy efficiency in different energy chains was investigated. Technical possibilities in energy chain have been evaluated for scenario calculation of energy saving potential in the future. Efficiency impacts in other sectors to primary energy demand were also evaluated. Emissions of different energy production methods give the value for environmental impacts and further the impacts of making more effective energy chains. A calculation model was made called "EPOLA", which was used in scenario calculations to analyse impacts more efficient national energy chains and to find out the most efficient ways to realise them.

Energy production chain has many indicators, e.g. efficiency, which can be formulated by consumption / produced unit of energy. Every consumed energy unit needs fuel, transportation, service and human resources and causes transfer losses, emissions and wastes. Indicator of quality of products, availability, reliability and peak load period has to be present in other way. Indicators during construction like material/produced-MW i.e. one built power unit needs materials like concrete, steel, copper, plastic, glass, etc. Energy is also required when constructing. The indicators of operating and building can be compared to each other in different energy production alternatives or to make bench-marketed with same type and age energy production somewhere else.

The best way to save energy is in consumption, because it has an impact through the whole energy chain all the way to the primary energy source. Saved energy does not al-

ways have impacts to decreasing of the emissions. That is why the total impacts through the whole energy chains and cross-impacts to other sectors have to be evaluated.

Environmental point of view the natural energy (solar, wind, hydro, tidal, wave, etc.) i.e. incombustible production would be the best alternative. Also if renewable fuels like wood are possible the carbon dioxide balance is not disturbed. The quality of energy (exergy) should be underlined in the energy chains. Saving electricity is more efficient than saving heat because of higher exergy content of electricity.

All the residual flows in energy production should be cut and returned to the process or used energy source for other process if possible. The theoretical limit for temperature is outdoor temperature. In Nordic countries utilising low temperature systems have good possibilities because of low outdoor temperature ( $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) in winter heating seasons.

The design of CHP (combined heat and power production) should be changed to correspond better to supply district heating temperature in future. The steam expansion in the CHP turbine could be prolonged to give lower temperature for district heating and lowering the pressure. Higher power-to-heat ratio of CHP gives more electricity. The district heating network should be designed “tighter” and insulated appropriately as well as guarantee high enough drop in temperature at consumer.

## Symboliluettelo ja lyhenteiden selitykset

|                 |  |
|-----------------|--|
| EPOLA           | Energiapolitiikan analyysit (Energy Policy Analysis)   |
| EPOEN           | EPOLA mallista kehitetty laskentatyökalu EPO – projektin laskentaan                              |
| Primäärienergia | Alkuperäinen energialähde  |
| CHP             | Yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto (Combined Heat and Power )                                  |
| BAT             | Parasta saatavissa olevaa tekniikkaa (Best Available Technique)                                  |
| M               | Muuntaja   |
| LS              | Lämmönsiirrin  |
| KL              | Kaukolämpö   |
| KJ              | Kaukojäähdytys   |
| FC              | Polttokenno (Fuel Cell)  |
| $\eta$          | Hyötysuhde   |
| U, f            | Sähkön jännite (V) ja taajuus (Hz)   |
| T, p            | Nesteen tai höyryn lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ tai K) ja paine (Pa= N/m <sup>2</sup> tai Bar) |

## 1.1 Johdanto

### Tavoite

Euroopan komission strategian yhtenä tavoitteena on parantaa energiatehokkuutta EU:ssa. Sen mittaamiseksi ja sen avulla saavutettavissa olevien säästöjen arvioimiseksi ei kuitenkaan ole yhtenäistä menetelmää. Kehityksen edistämiseksi tällä alueella käynnistettiin tammikuussa 2008 tutkimus 'Energiatehokkuuden mittarit ja potentiaalit'. Tutkimuksen päätavoitteeksi asetettiin energiatehokkuuden mittaamiseen ja tehostamispotentiaalin laskemiseen soveltuvan lähestymistavan kehittäminen. Tulosten tavoiteltiin edesauttavan energiatehokkuusteknologioiden ja -palveluiden tunnistamista sekä energiatehokkuuteen liittyvän tutkimustarpeen määrittämistä. Tutkimus kattoi sektorit: energiantuotanto, teollisuus, rakennukset, yhdyskunnat, liikenne ja logistiikka.

Tässä osahankkeessa tutkittiin energiatehokkuuden edistämistä energian tuotannossa. Hankkeen tavoitteena on: 1) Kehittää yhdenmukainen, koko energiaketjua käsittelevä energiatehokkuuden käsitteistö ja mittaristo 2) arvioida kehitetyn mittariston tukemana saavutettavat kokonaistehostamispotentiaalit ja löytää niitä tukevat uudet keinot ja teknologiat eri toimialoilla (teollisuus, logistiikka, liikenne, energiantuotanto, rakentaminen ja yhdyskunnat) 3) esittää tulevaisuuden kansalliset energiatehokkuuden painopistealueet ja kehittää perusta uusille koko energiaketjua palveleville liiketoimintamalleille.

Energian tuotannon ketjussa (polttoaine - konversio – jakelu - loppukulutus) energiatehokkuutta voidaan parantaa erilaisin teknisin ratkaisuin. Taustakartoituksessa selvitetään miten energiatehokkuus esitetään määriteltäväksi eri energiaketjuissa. Säästöpotentiaalin laskemiseksi arvioidaan energiaketjujen tekniikan tuomat mahdollisuudet tulevaisuudessa vaihtoehtoisina skenaarioina. Tutkimuksessa arvioidaan myös muiden sektoreiden tehostamistoimien vaikutuksia primäärienergian tarpeeseen. Tutkimukseen liittyy myös eri tuotantomuotojen aiheuttamien ilmapäästöjen laskenta (esim. tn/MWh), jonka perusteella arvotetaan ko. energian tuotantomuodon välittömät ympäristövaikutukset ja edelleen energiaketjun tehostamisen vaikutukset. Käytettävissä olevan ajan puitteissa kehitetään ”laskentatyökalua” EPOEN- mallia, jolla voidaan skenaariotekniikalla analyttisesti arvioida eri tehostamistoimenpiteiden vaikutuksia kansallisissa energiaketjuissa tavoitteena löytää tehokkaimmat toteutustavat.

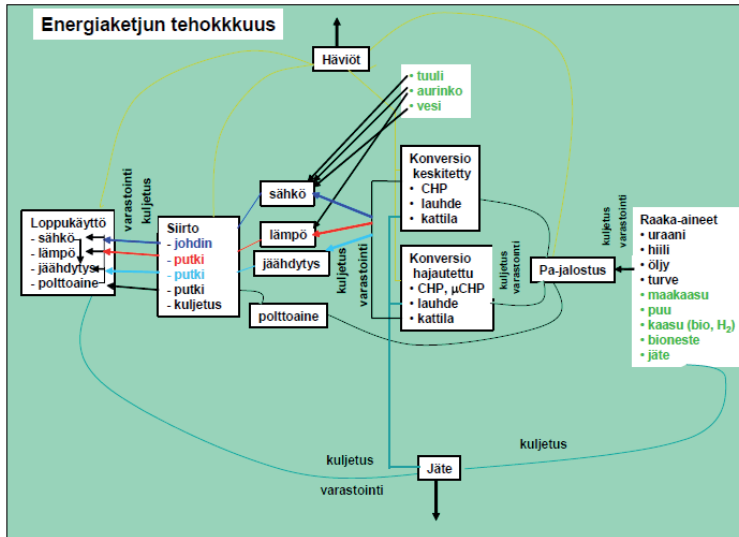
Kuljetusta vaativien polttoaineiden arvioidaan yhteistyössä logistiikkaosion (TTY) kanssa. Rakennusten ja yhdyskuntarakenteen (kaupungit ja maaseutu) vaikutuksia energian kulutukseen ja jakeluun (sähkö, lämpö) arvioidaan yhteistyössä rakennus- ja yhdyskuntaosioden (VTT) kanssa. Teollisuuden energiakysymyksiä tarkastellaan yhdessä teollisuusosion (TKK) kanssa.

## **Kohteen kuvaus ja rajaukset**

Energian tuotannon energiaketju alkaa polttoaineen tuotannosta tai luonnonlähteen suorasta hyödyntämisestä, esim. tuuli, aurinko, jne. Polttoaineen esille saanti vaatii koneita ja rakenteita sekä kuljetuksia, varastointia ja energiaa. Polttoaineen konversio ja siinä tapahtuvat häviöt käyttökelpoiseksi energiaksi riippuu muuntotavasta. Muuntoprosessi kuluttaa energiaa ja vaatii asianmukaiset laitteet. Muuntoprosessin tuotteet (sähkö, lämpö, kylmä, jne.) riippuen tuotantopaikasta vaativat kuljetusta ja varastointia. Loppukulutus tapahtuu kuluttajalla (asuminen, palvelut, teollisuusprosessi, liikenne, jne.), jossa energian ”lopputuote” voi vielä muuttua toiseksi energiamuodoksi ennen lopullista hyötykäyttöä.

Sähkön ja lämmön yhteistuotantoprosessissa (CHP) kuluttajalle tuotetun sähkö- ja lämpö-energiayksikön tuottamiseen tarvittava energiamäärä polttoainelähteestä ilman välivarastointeja on noin 1,25-kertainen, kun vastaavan energian tuottaminen sähkön ja lämmön erillisprosesseissa vaatii noin 1,65-kertaisen energiamäärän. Vastaavien energiaketjujen hyötysuhteet ovat noin 80 ja 60 %. Sähkön ja lämmön erillistuotanto kuluttaa energialähteitä n. 30 - 35 % enemmän verrattuna CHP -tuotantoon. Pelkästään sähkön lauhdetuotannon kautta kuluttajalle päätyvä sähköyksikkö kuluttaa polttoaineen alkulähdettä noin 2,2-kertaisen määrän eli energiaketjun hyötysuhde on noin 45 %. Energiatehokkuutta energiantuotannossa, siirrossa ja jakelussa on havainnollistettu kuvassa 1.1.





Kuva 1.1. Energiaketjut energialähteestä loppukuluttajalle.

Energiaketjun taserajat määriteltiin energialaitoksen, jakelualueen ja valtakunnan tasolla sekä liittyntä muiden sektorien (teollisuus, yhdyskuntateknikka, rakennukset ja liikenne) taserajoihin. Lisäksi määriteltiin energian tuotannon sisäiset taserajat.

Energian tuotantoketjuja tarkasteltiin esimerkin omaisesti puuhakkeen ja maakaasun osalta. Muita energialähteitä ei käsitelty, mutta analogia niiden suhteen on sama kuin esimerkissä käsiteltyjen. Energian jakeluketjun tarkastelu olisi sama myös muiden energialähteiden osalta.

Skenaariotarkastelu tehtiin rakennusten kulutuksen osalta sekä energian tuotantoteknologian tehokkuuden kehittymisen osalta. Laskennassa arvioitiin uusien rakennusmääräysten vaikutusta energian tuotantoketjuun: energian kulutukseen, päästöihin ja CHP tuotannon asemaan.

Energian tuotannon mittarit määriteltiin rakentamisen ja käytön osalta sekä niiden elinkaari vaikutukset. Määriteltiin myös mittareiden liittynät muihin sektoreihin taserajojen mukaan.

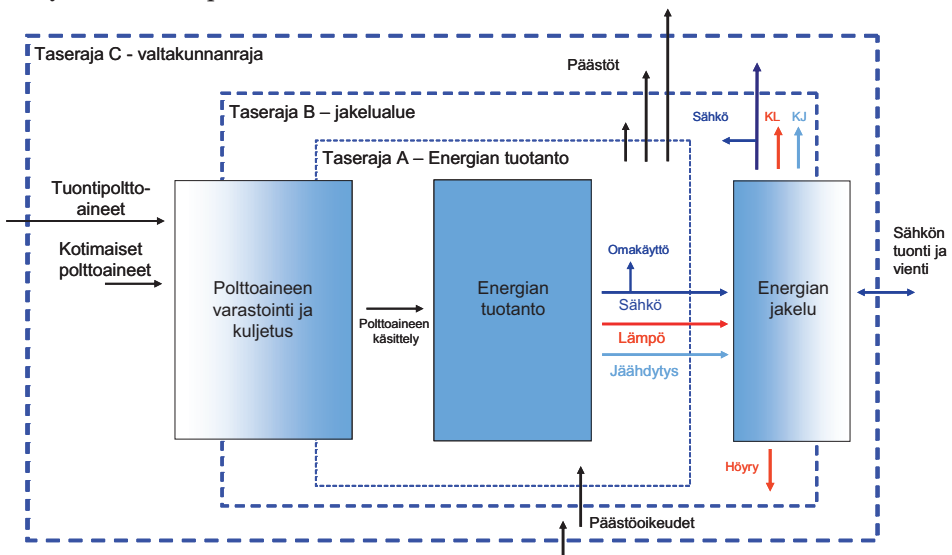
## Menetelmät

Energiatehokkuustoimien vaikutusta energiajärjestelmään analysoitiin EPOLA-mallilla (Energy POLicy Analysis). EPOLA-malli on dynaamis-lineaarinen optimointimalli, jolla voidaan lähestyä numeerisesti energiatehokkuuden potentiaalia. Excel-ympäristössä toimiva nopea, helppokäyttöinen, robusti ja modulaarinen malli laskee käytännöllistä pitkän aikavälin kustannusoptimaalista energiapäätöksenteon ratkaisua. EPOLA-malli formuloi energiajärjestelmän rakenteen ja tuottaa kokonaiskustannukset minimoivan ratkaisun, joka kuvaa tämän energiajärjestelmän tulevaa kehitystä. Malli sisältää mm. investoinnit energiainfrastruktuuriin, prosessipohjainen metsäteollisuuden kuvauksen sekä energiataseet energiansäästötoimenpiteillä. Lisäksi malli antaa energiatehokkuuden indikaattoreita kuten primäärienergian kulutuksen ja (hiilidioksidi) CO<sub>2</sub>-päästöt mallin laskentavuosille. EPOLA mallilla optimoinnin voi suorittaa muutamassa minuutissa, joten yksinkertaisia herkkyystarkasteluja voidaan suorittaa myös varsin vaivatta.

## 1.2 Taserajat

### Taserajat energian tuotantoketjun energiatehokkuuden mittaamisessa

Energiantuotannossa taserajat on määritelty energiaketjun suunnassa kuvaamaan jotain osakokonaisuutta, joka on tärkeä kokonaisuuden kannalta. Energiavirta taserajan (tulevat ja lähtevät) yli seuraavaan kokonaisuuteen pyritään kuvaamaan mahdollisimman tarkasti, mutta taserajan sisällä kaikkia ilmiöitä tai tapahtumia ei tarvitse tietää tarkasti. Energiavirta taserajalla mitataan tai määritetään laskennallisesti. Taserajatar- kastelulla voidaan seurata energiaketjun tehokkuutta ja etsiä tehostamiskohteita, jotta primäärienergiasta mahdollisimman paljon päätyisi loppukulutukseen. Taserajan sisäl- lä voi olla pienempiä taserajoja, kuten kuvassa 1.2 on esitetty. Esimerkiksi energian tuotantolaitokset ovat alitaseita sähkön ja kaukolämmön jakelun paikallisverkoissa. Paikallisverkot ovat taasen alitaseita koko valtakunnan siirtoverkossa, joka puolestaan on kytköksissä naapurimaiden kansallisiin verkkoihin.

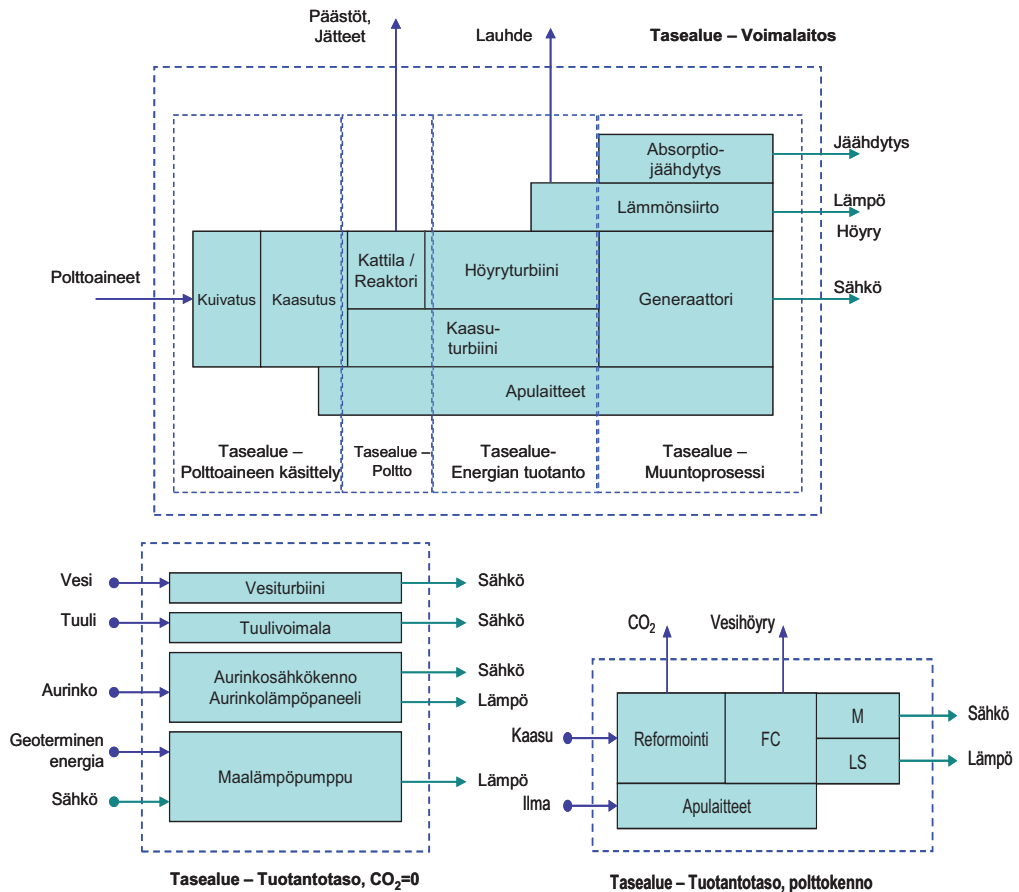


Kuva 1.2. Energian tuotantoketjun taserajat (Vesa Harju, Aalto-yliopisto).

### Energian tuotannon taserajat

Energian tuotanto koostuu erilaisista voimalaitoksista, sähköä ja lämpöä tuottavista laitoksista (CHP) sekä lämmityskattiloista. Nämä tuotantolaitokset muodostavat kukin oman taserajansa, johon tulee sisään polttoainetta, lauhdutusvettä, ilmaa, kaukoläm-

mön paluuvesi ja muita tuotantoon tarvittavia oheisainevirtoja kuten kemikaaleja, voitelu- ja suoja-aineita, jne. Taserajalta lähtee ulos tuotteet kuten sähkö ja lämpö sekä oheistuotteet kuten tuhka, savukaasun käsittelyn jätteet, savukaasun päästöt ilmaan, jäähdytysvedet, jne. Energian tuotantolaitos voidaan jakaa pienempiin alitaseisiin, joita voidaan tarkastella omina kokonaisuuksina aina laitekomponenttitasolle saakka.



Kuva 1.3. Energian tuotantolaitoksen alitaseita (Vesa Harju, Aalto-yliopisto).

### Taserajojen liittymäkohdat muihin ryhmiin

Energian tuotantoketjun taserajat liittyvät kiinteästi muihin taserajoihin kuten teollisuus, yhdyskunta, rakennukset ja liikenne. Näitä kokonaisuuksia tutkitaan tässä raportissa omina kokonaisuuksinaan.

Yhdyskunta, rakennukset ja teollisuus ovat energian loppukuluttajia, jotka tuottavat energian avulla jotain lopputuotetta kuten yhdyskuntavalaistus ja –raideliikenne, rakennusten lämmitys, valaistus ja sisäilman laatu sekä teollisuus erilaisia tuotteita kulkutukseen tai raaka-ainetta jatkojalostukseen. Liikenne ja logistiikka tuottavat tavaroiden, raaka-aineiden, jätteiden ja ihmisten kuljetuksia. Kuljetukset pitää tapahtua oikea-aikaisesti ja oikeaan paikkaan sekä mahdollisimman pienellä energialla eli tehokkaasti.

- **Rakennussektori.** Energiantuotanto palvelee rakennusten energiankulutusta (sähkö, lämpö ja jäähdytys), jolla muodostetaan rakennusten viihtyvyttä ylläpitävä sisäilmasto. Rakennusten energiatehokkuus (rakennusfysiikka ja apulaitteet) vaikuttaa suoraan tarvittavaan tehoon ja energiaan. Energiantuotannon rakennukset ja laitteet sitovat myös energiaa rakennusvaiheessa. Niihin sitoutuneeseen energiaan voidaan vaikuttaa jo rakennuksen suunnittelu- ja rakentamisvaiheessa.

- **Yhdyskuntasektori.** Yhdyskuntasuunnittelu ja energiainfrastruktuurin toteutus vaikuttavat vahvasti siihen, miten tehokkaasti energiaa jaetaan kuluttajille. Yhdyskunnan kaavasuunnittelussa määritellään energia- ja liikenneväylien kulkureitit energian siirtämiseksi kuluttajalle. Liikenneväylät vaikuttavat myös energian tuotannon polttoaine- ja jätehuoltoon sekä energiaväylät maakaasun käyttöön keskitetyssä tai hajaute- tussa kiinteistökohtaisessa energiantuotannossa. Lisäksi rakennustonttien sijainti kaa- va-alueella sekä rakennusten paikat tonteilla vaikuttavat energijärjestelmän tehok- kuuteen.

- **Liikenne- ja logistiikkasektori.** Liikenne- ja logistiikka vaikuttaa energiasekto- riin kuljetusten kautta. Miten pystytään kuljetuskalustolla hoitamaan tehokkaasti lii- kenneväyliä pitkin energiantuotannon kuljetukset rakennus- ja käyttöaikana mukaan lukien huolto- ja korjausjaksot.

- **Teollisuussektori.** Energia- ja teollisuussektorin välillä on kiinteä yhteistyö. Ra- kennusteollisuus vaikuttaa energiantuotannon suunnittelu- ja rakennusvaiheen aikana materiaalitehokkuuteen sekä käytön aikaiseen energiatehokkuuteen. Energiaintensiivi- nen teollisuus (metsä, metalli ja kemia) voi olla hyvinkin kiinteässä suhteessa energian- tuotantosektoriin energian käyttäjänä sekä polttoaineen ja/tai sekundäärilämmön tuot- tajana paikalliseen kaukolämpöjärjestelmään.

Taserajojen avulla voidaan määritellä, kuinka paljon kukin osa-alue käyttää energiaa ja minkälaisia kytköksiä eri sektoreiden välillä on sekä paljonko siitä syntyy päästöjä ja

primäärienergian kulutusvaikutus. Taserajatarkastelulla voidaan tutkia energiatehokkuustoimien vaikutusta sektorin sisällä ja välillisiä vaikutuksia muihin sektoreihin.

### 1.3 Energiatehokkuuden mittarit

#### Mittareiden määrittelyn periaatteet

Puhuttaessa energiatehokkuuden mittaamisesta energiajärjestelmässä on hyötysuhde ilmeinen ja läheisesti toimialaan liittyvä käsite. Kuten tunnettua, hyötysuhde on määriteltä käsiteltävästä prosessista lähtevän energiamäärän suhteena siihen panostettavaan energiamäärään. Lähtevä energiamäärä voidaan myös muotoilla prosessiin panostettavan ja siinä kuluvan energiamäärän erotuksena.

$$\eta = \frac{E_{ulos}}{E_{sisään}} = \frac{E_{sisään} - E_{kulutettu}}{E_{sisään}} \quad (1.1)$$

Energiajärjestelmän voidaan käsittää sisältävän monilukuisen määrän ns. energiaketjuja eli reittejä, joiden varrella energialähteenä käytettävä raaka-aine kulkee mm. läpi jalostus- ja tuotantoprosessien kohti loppukäyttöä lämpönä, sähköinä tai näiden yhdistelmänä. Energiaketjuja on lukuisia ja lähes jokaiselle raaka-aineelle on vaihtoehtoisia reittejä, jotka voivat jakautua ja liittyä toisiinsa uudestaan matkallaan kohti loppukäyttöä. Nämä pääprosessit on kuvattu taulukossa 1.1.

Taulukko 1.1. Lista energiaketjun prosesseista kuvauksen ja esimerkkien kera.

| Prosessi              | Kuvaus  | Esimerkkejä  |
|-----------------------|---|--|
| Resurssi              | Resurssin tai raaka-aineen valinta  | Öljy, hiili, puu, tuuli, aurinko                       |
| Resurssien hankinta   | Resurssien hankinta jatkokäsittelyä varten  | Louhintä, korjuu, sivuvirtojen hyödyntäminen           |
| Resurssien kuljetus   | Resurssien kuljetus   | Tankkerit, laivaus, putkikuljetus, tiekuljetukset      |
| Jalostus              | Valitun resurssin jatkojalostus hyödyllisemmäksi energianlähteeksi                            | Öljynjalostus, kaasutus, pelletointi, haketus, kuivaus |
| Polttoaineen kuljetus | Jalostetun polttoaineen kuljetus  | Tankkerit, laivaus, putkikuljetus, tiekuljetukset      |
| Energian tuotanto     | Polttoaineen sisältämän energian muuntaminen mekaaniseksi energiaksi tai sähköksi ja lämmöksi | CHP, lauhde, ydinvoima, tuuli, kattilalaitos, ym.      |
| Jakelu                | Energian siirto loppukäyttäjälle asianmukaisessa muodossa                                     | Kaukolämpö- tai kaukojäähdytysverkko, sähköverkko      |
| Loppukäyttö           | Energia käytön mahdolliset häviöt   | Radiaattorijärjestelmä, lämpöpumput, koneet            |
| Hyötyenergia          | Energia loppukäyttäjällä  | Lämmitys, jäähdytys, sähkö                             |

Energian hankinta, tuotanto ja jakelu (kuten kuljetus ja logistiikkakin) ovat joukko energiatehokkuusketjuja, joille on leimallista ketjun haarautuminen ketjun eri vaiheissa. Tämä vaikeuttaa kokonaistehokkuuden hahmottamista varsinkin, jos ketju haarautuu useaksi tuotteeksi joista joku haara jatkoketjujen lopussa voi muuttua takaisin toista reittiä tullee tuotteeksi. Esimerkkinä voidaan mainita polttoaineella tuotettu sähkö ja lämpö (CHP) ja sähkö muutetaan loppukuluttajalla takaisin lämmöksi tai teollisuusprosessin läpi tullut lämpö ja se muutetaan takaisin sähköksi ja lämmöksi.

Toisin kuin hiottu esitys taulukossa yllä antaa ymmärtää, yksittäisen energiaketjun määrittely ei ole aina yksinkertaista tai itsestään selvää. Kaikille energiaketjuille kaikki vaiheet eivät ole oleellisia ja joissain tapauksissa voi syntyä rakenne, joka muistuttaa enemmän karkeaa verkko kuin säännönmukaista ketjua. Näin on esimerkiksi tapauksessa, jossa lämpöä on saatavissa hankinta- tai jalostusprosesseista. Yllä olevan määrittelyn mukaiset prosessit voivat myös sisältää lukuisia aliprosesseja, kuten puun hake- tuksen, kuivauksen ja pelletoinnin tapauksessa. Vaikka esitetty rakenne tarjoaa jous- ta-

vat kehykset kuvaamaan yksittäisiä tuotantoketjuja energiajärjestelmien sisällä yleisellä tasolla, se on erityisen sopiva vertailtaessa rajattua määrää vaihtoehtoisia ketjuja tietyille resurssille tietyllä alueella. Perusajatuksena energiaketjut sisältävät kuitenkin jokaiseen energiajärjestelmämalliin jollain tasolla.

Nämä prosessit energiaketjussa ovat tunnistettavissa ja jokaiselle voidaan määrittää energiankulutus ja kyseessä olevan energialähteen perusteella lämpöarvo, jolloin hyötysuhde on laskettavissa. Kun jokaiselle prosessille on saatu hyötysuhde, voidaan koko energiaketjun ns. ketjutettu hyötysuhde laskea määritelmällä

$$\eta = \prod_{i=p_0}^{p_n} \eta_i, \quad (1.2)$$

jossa alaindeksi  $i$  kuvaa yksittäistä prosessia  $p$  ja  $n$  prosessien lukumäärää käsiteltävässä energiaketjussa. Tätä kokonaishyötysuhdetta voidaan käyttää energiaketjun lopussa käyttöön jääneen energiamäärän laskemiseen tai kääntäen primäärienergiakulutuksen selvittämiseen.

$$E_{\text{loppukäyttö}} = \eta E_{\text{resurssi}} \quad (1.3)$$

Esiteltyä lähestymistapaa voidaan myös asianmukaisia kertoimia käyttäen soveltaa esimerkiksi energiaketjukohtaisten päästöjen laskentaan. Korvaamalla energia exergilla päästään vertailemaan energia- ja exergiatehokkuutta.

## Energiantuotantoketjun mittarit

Energiaketjun kokonaishyötysuhteen laskenta vaatii tietoa ketjun eri prosesseja määrittävistä parametreista. Esimerkkinä seuraavassa on käyty läpi kaksi energiaketjua, joissa on kuvattu lämmön ja sähkön yhteistuotantoa polttoaineena hake tai maakaasu. Valittu hake on tyypiltään metsätähdehaketta, joka on saatu metsänhoidon tai leikkuun sivutuotteena, jolloin hankintaprosessissa vain tähdehakkeen käsittely, ei varsinaista metsätyötä. Tulokset käytettyine parametreineen on esitelty taulukossa 1.2.



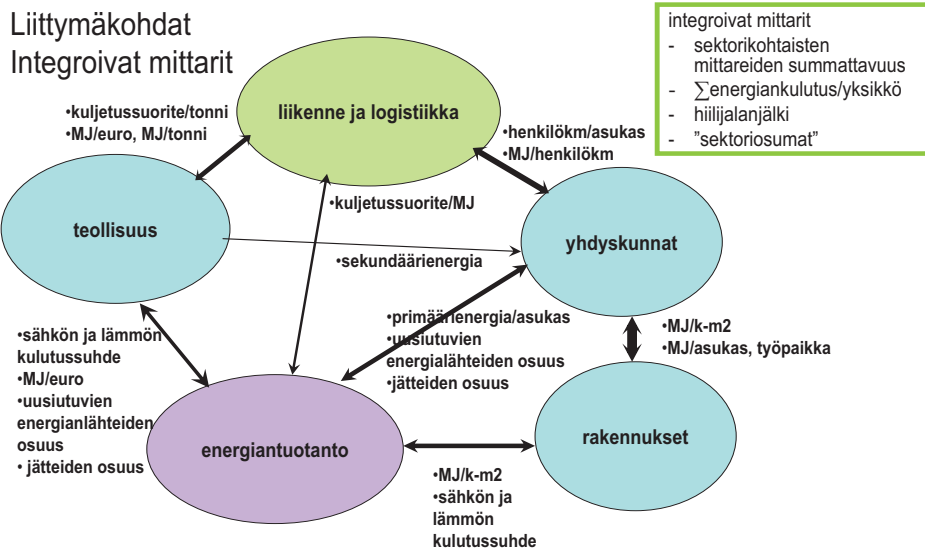
Taulukko 1. 2. Esimerkki prosessikohtaisista hyötysuhteista ja niiden kumulatiivisista vaikutuksista energiaketjussa maakaasu- tai hakepohjaisella yhteistuotannolla.

| Prosessi              | Hake                           |          |              | Maakaasu                |          |              |
|-----------------------|--------------------------------|----------|--------------|-------------------------|----------|--------------|
|                       | Kuvaus                         | $\eta_p$ | $\eta_{kum}$ | Kuvaus                  | $\eta_p$ | $\eta_{kum}$ |
| Resurssi              | Puu                            | -        | 1.000        | Maakaasu                | -        | 1.000        |
| Resurssien hankinta   | Metsäkoneiden siirrot          | 0.997    | 0.997        | Maakaasun hankinta      | 1.000    | 1.000        |
| Resurssien kuljetus   | Metsäkuljetukset               | 0.995    | 0.992        | -                       | -        | -            |
| Jalostus              | Haketus                        | 0.991    | 0.983        | -                       | -        | -            |
| Polttoaineen kuljetus | Hakkeen kaukokuljetus (120 km) | 0.980    | 0.963        | Putkikuljetus (3600 km) | 0.914    | 0.914        |
| Energian tuotanto     | Hakepohjainen CHP              | 0.850    | 0.819        | Maakaasupohjainen CHP   | 0.900    | 0.822        |
|                       | Sähkö                          | 0.283    | 0.273        | Sähkö                   | 0.450    | 0.411        |
|                       | Lämpö                          | 0.567    | 0.546        | Lämpö                   | 0.450    | 0.411        |
| Energian jakelu       | Jakelu asiakkaille             | 0.935    | 0.766        | Jakelu asiakkaille      | 0.935    | 0.769        |
|                       | Sähköverkko                    | 0.964    | 0.263        | Sähköverkko             | 0.964    | 0.396        |
|                       | Kaukolämpöverkko               | 0.909    | 0.496        | Kaukolämpöverkko        | 0.909    | 0.374        |
| Loppukäyttö           | Energian käyttö                | 0.974    | 0.746        | Energian käyttö         | 0.974    | 0.749        |
|                       | Kodinkone                      | 1.000    | 0.263        | Kodinkone               | 1.000    | 0.396        |
|                       | Radiaattorilämmitys            | 0.950    | 0.471        | Radiaattorilämmitys     | 0.950    | 0.355        |

Muita oleellisia parametreja energiaketjun laskennassa ovat rakennusasteet, tuotannon hyötysuhteet, resurssien ja polttoaineiden kuljetukseen liittyvät välimatkat sekä muut prosessikohtaiset energiankulutukset. Rakennusasteet ovat maakaasutuotannolle 1.0 ja hakkeelle 0.5 sekä hyötysuhteet 0.90 ja 0.85. Hakkeen kaukokuljetusmatkaksi on asetettu 120 km ja maakaasu on peräisin Venäjän Urengoyn kaasukentiltä (etäisyys Suomen rajasta 3300 km), minkä lisäksi kaasun oletetaan kulkevat Suomen sisällä 300 km. Hakkeen tuotantoketjun alkupäälle on käytetty kirjallisuudesta selvitettyjä arvoja (Mäkinen et al. 2006) ja siirtoverkon häviöt on selvitetty tilastoista (Energiateollisuus 2007). Muut käytetyt parametrit, kuten tuotannon rakennusasteet ja hyötysuhteet yllä, ovat vakiintuneita keskiarvoja.

Taulukon 1.2 arvoja tutkiessa näkyy selvästi energiaketjun tuotantoa edeltävän osan energiatehokkuus ja jos tätä verrataan esitellystä ketjusta puuttuvan kuivauksen vaikutukseen, jalostus- ja kuljetusprosessit vaikuttavat melko merkityksettömiltä. Jos kuivauksella saadaan hakkeen kosteuspitoisuus tiputettu 40 prosentista 30 prosenttiin, lämpöarvo kasvaa viidenneksellä. Kun samaan aikaan energiaketjun tuotantoa edeltävän osan hyötysuhde on noin 96 %, kuivaukseen hyöty, ainakin luonnollisin menetelmin, on kiistaton. Kuitenkin on syytä pitää mielessä prosesseihin liittyvät taloudelliset reunaehdot aiheuttavat sen, ettei energiatehokas prosessi välttämättä ole aina kustannustehokas. Hakkeen käsittelyn energiatehokkaat vaiheet aiheuttavat merkittäviä kuluja ja esimerkiksi kuivauksella, erityisesti aktiivisen kuivausjärjestelmän tapauksessa, on hintansa

Energiajärjestelmällä on merkittäviä liittymäkohtia kaikkiin muihin (yhdyskunta, rakennukset, teollisuus, logistiikka) sektoreihin monissa sen osissa, mutta merkittävin yhteys energiatuotantoketjussa syntyy kuluttaja/tuottaja suhteesta. Kuluttaja on tässä määritelty toimijana, jolla on tarvetta energialla joko sähkönä tai lämpönä. Tämä yhteys tuottajan ja kuluttajan välillä on voimassa jokaisella tasolla, myös valtakunnallisen tason ulkopuolelle sekä sisimmän tason eli energiatuotannon sisäpuolella (omakäyttö).



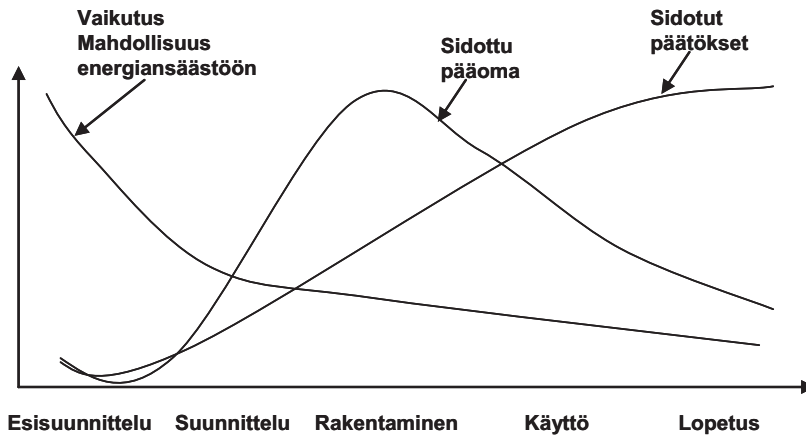
Kuva 1.4. Toimialojen keskinäiset riippuvuudet energiatehokkuuden mittaamisessa.

Sektori on kuluttajayhteyden lisäksi myös kytköksissä yhdyskuntiin sijaintinsa ja vallitsevien säännösten kautta sekä logistiikkaan energiaketjun tarvitsemien kuljetuspalveluiden kautta (esimerkiksi polttoainekuljetukset).

Kuva 1.4 tuo esille nämä yhteydet energiajärjestelmän sisällä ja sen ulkopuolelle kuvaamalla taserajat toimintaympäristön kolmen päätason avulla ja määrittelemällä energian, tiedon tai materiaalin sisäiset tai väliset virtaamat.

### Mittarit ja elinkaari

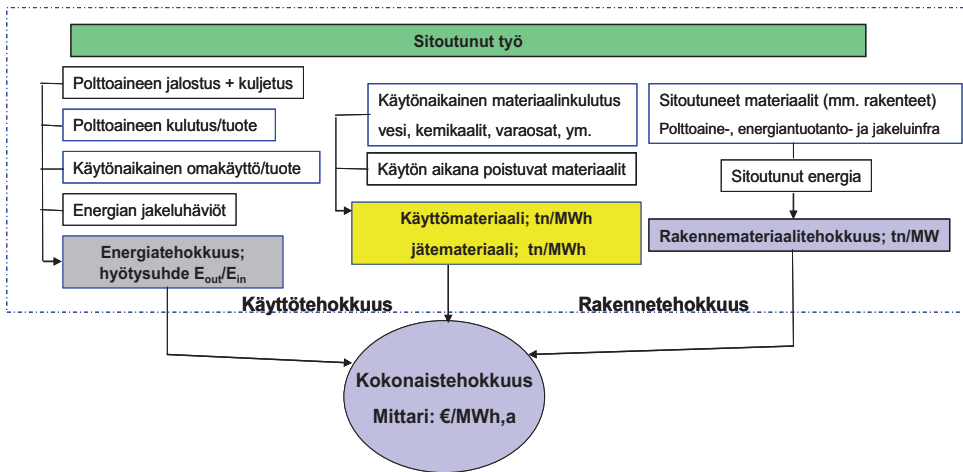
Elinkaariajattelu kuvaa tuotteen koko elinkaarta sen syntyvaiheesta, jakeluun, käyttöön, kierrätykseen ja loppusijoitukseen liittyviä vaiheita. Elinkaarilaskenta ottaa yleensä myös huomioon tuotteen tekemiseen tarvittavat fasilitteetit, raaka-aineet ja siihen sitoutunut energia elinkaaren eri vaiheissa. Suunnittelulla ja päätöksen teolla elinkaaren aikana voidaan vaikuttaa ratkaisevasti tuotteen esim. sähkö ja lämpö energiatehokkuuteen. Kuva 1.5 esittää mahdollisuutta vaikuttaa energia- ja materiaalitehokkuuteen tuotteen elinkaaren aikana. Tuotteen elinkaaren lopussa aiemmin tehdyt päätökset sitovat niin, että lopussa voidaan päättää enää lopettamisajankohdasta ja loppukäsittelystä (purku, kierrätys, jätteet) sen hetkisen teknologian ja tiedon perusteella.



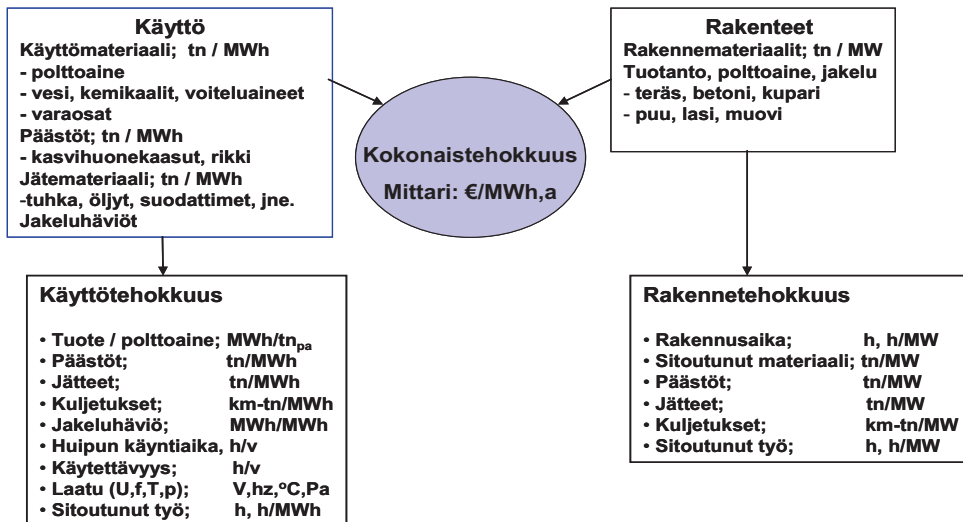
Kuva 1.5. Elinkaarinäkökulma energiatehokkuudessa.

Energian tuotannon elinkaarimallin mukaan sähkön ja lämmön tuotannolle voidaan määritellä kokonaistehokkuusmalli, jossa otetaan huomioon koko energiaketjun elinkaari. Kuvassa 1.6 on määritelty energiantuotannon kokonaistehokkuusmittari, jota tarkastellaan vuositasolla ja koko laitoksen elinkaarenaika. Rakennusaikaiset materiaalit ja työ voidaan jaksottaa vuosipoistojen mukaan kiinteisiin käyttökuluihin.

Käyttöön liittyy monia mittareita, jotka voidaan ilmaista kulutuksena/MWh eli tuotettua energiayksikköä (kuva 1.7) kohden kuten käytetty polttoaine, päästöt, jätteet, huolto kuljetukset ja työ määrä. Tuotteen laatu, käytettävyyden ja huipun käyttöaika täytyy ilmaista muulla tavoin. Rakennusaikaiset kulutukset/MW eli rakennettua tehoa kohden ilmaisevat yhden keskimääräisen tehoyksikön rakennustehokkuutta. Käytön ja rakentamisen aikaisia mittareita voidaan verrata keskenään eri energian tuotantovaihtoehtoisissa tai ”bench markata” vastaavanlaiseseen ja ikäiseen energian tuotantoon muualla.



Kuva 1.6. Energian tuotannon kokonaistehokkuus.



Kuva 1.7. Käyttö- ja rakennusaikaiset energiatehokkuus- ja materiaalitehokkuusmittarit.

## Energian arvo mittaamisessa

Energiaa voidaan arvottaa monella tavalla. Fysikaalisia ominaisuuksia arvotettaessa täytyy yleensä tuntea energian tila primäärienergiana tai polttoaineena, jotka määritellään massan, lämpötilan, paineen ja kosteuden perusteella. Polttoaineesta jalostettu tuote- sähkö, lämpö tai kylmä- määritellään fysikaalisten ominaisuuksien ja väliaineen mukaan energiatuotteeksi, joka siirretään loppukuluttajalle. Lisäksi energia voidaan arvottaa käyttötarkoituksen mukaan, jolla aiheutetaan mahdollisimman vähän ympäristövahinkoja. Aika ja paikka vaikuttavat myös energian arvoon. Aurinko paistaa keuhkolla ja eniten lähellä päiväntasaajaa, kun taas kulutus on talvella ja pohjoisella ja eteläisellä maapallon osalla.

Energian arvoa voidaan arvottaa mm. seuraavan listan mukaan:

- CO<sub>2</sub>-sisältö (+ varaus muille päästöille; vrt. Kyotosopimuksen jatko!)
- Entalpia- tai exergia-arvo
- Polttoaineiden energiasisältö (ylempi ja alempi lämpöarvo)
- Polttoaineiden/energianlähteiden primäärienergiasisältö
- Toe (ekvivalentti öljytonni)
- Käyttö-/toimitusvarmuus (esim. sähköverkko vs. oma tuulimylly)
- Hinta kuluttajalla (vakio €/a + €/kWh)
- Polttoaineiden hinnat
- Materiaalien energiatehokkuus (sitout.energia), kierrätettävyys/ jatkojalostus
- Marginaalienergian arvo (esim. hiililauhde) vs. keskimääräinen energian arvo
- Energialähteen investointiarvo

Muita energian arvoon vaikuttavia tekijöitä mm. ajan ja paikan suhteen ovat:

- Uusiutuvat vs. uusiutumattomat energialähteet
- Käytettävyys, saatavuus ja kuljetusmahdollisuus
- Energiajärjestelmän riskien negatiivinen arvo (välilliset ja välittömät): (esim.: ydinturma, polttoainelogistiikan onnettomuudet, maakaasuputken rikkoutuminen, ilman saastuminen, terveysvaikutukset)
- Energian tarpeen vuodenaikavaihtelu
- Tuontienenergiariippuvuus/ -riippumattomuus
- Energiaomavaraisuus

Energian arvoa voidaan mitata energiaketjussa energialähteeltä loppukuluttajalle. Energiasta häviää osa ketjussa ja siihen sitoutuu lisää hyödyntämätöntä energiaa esim. kuljetusten muodossa. Energiaketjua voidaan kuvata sarjana erilaisia vaiheita, joilla kaikilla on oma hyötysuhteensa energian arvoketjussa.

$$E_{hyöty} = \prod_{i=1}^n \eta_i E_{alkuenergia}, \quad (1.4)$$

jossa  $\eta_i$  on hyötysuhde energiaketjun eri vaiheissa (i).

Energian arvo loppukuluttajalle voidaan määrätä, jos tunnetaan energiaketjun eri vaiheet ja vaiheiden hyötysuhteet.

Yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa kulutettu polttoaine voidaan jakaa loppu-tuotteille energia-, hyödynjako tai exergiaperiaatteella.

Primäärienergiakertoimet on määritelty kullekin polttoaineelle EN-15316 Standardissa. Standardi EN-15316-4-5 määrittelee kaukolämmön primäärienergiakertoimen yhdistetyssä sähkön ja lämmön (CHP) tuotannossa vaihtoehtoisen sähkön hankinnan mukaan.

$$q_{pri} = \frac{Q_{DH-chpe}}{H_{DH}} = \frac{Q_{DH} - E_{CHP} \cdot e}{H_{DH}}, \quad (1.5)$$

jossa  $Q_{DH}$  on lämmön tuotantoon käytetty energiamäärä mukaan lukien sähkön tuotanto CHP laitoksessa,  $E_{CHP}$  on CHP laitoksen sähkön tuotanto,  $H_{DH}$  on CHP laitoksen lämmön tuotanto ja  $e$  on vaihtoehtoisen sähkön tuotannon kulutuskerroin (EU:ssa 2.5).

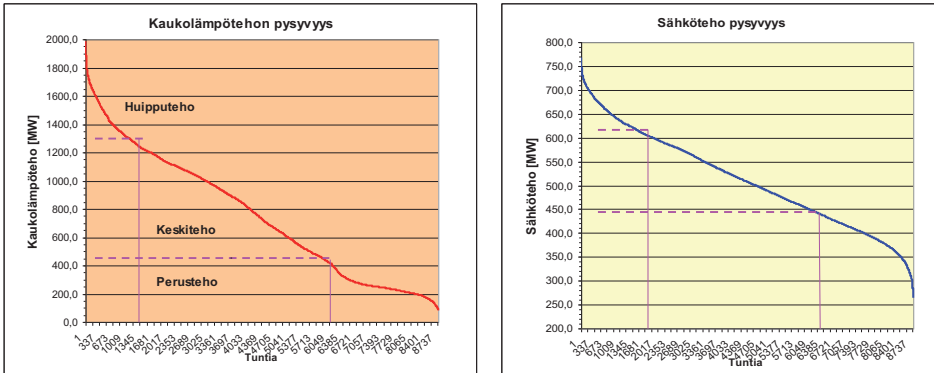
CHP-lämmön primäärienergiakerroin saadaan korvaamalla  $Q_{DH}$   $Q_{pri}$ :llä, joka on käytetty polttoaine-energia kerrottuna primäärienergiakertoimella.

### **Käyttöasteen merkitys**

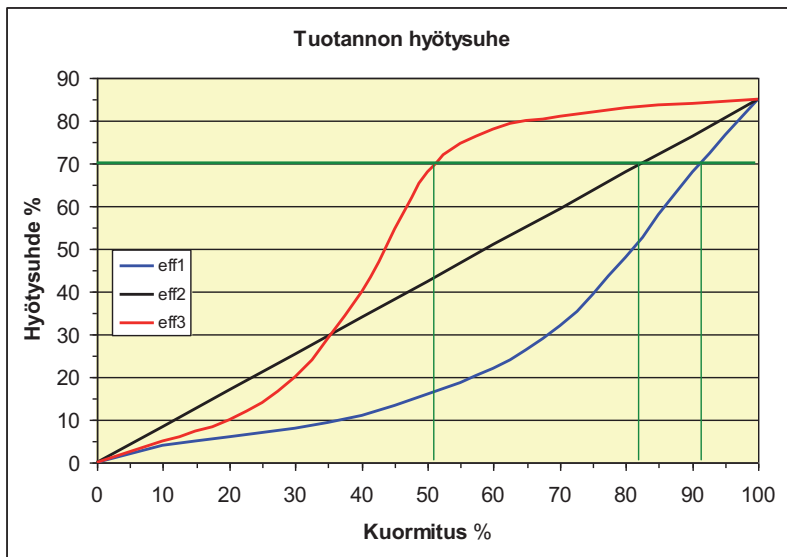
Kuva 1.8 esittää sähkön ja lämmön kulutuksen pysyvyyskäyriä. Pysyvyyskäyrät voidaan jakaa perus-, keski- ja huippukuormaan. Energian tuotantolaitokset jaetaan saman jaottelun mukaan. Peruskuormalaitoksella pitää olla hyvä hyötysuhde, halpa polttoaine sekä pitkä huipun käyttöaika vuodessa. Laitoksen tekniikka pitäisi olla BAT – tekniikkaa. Huipputeholaitoksen ominaisuuksiin kuuluu luotettavuus ja nopea käynnistettävyyden. Keskitehon laitokset ovat ominaisuuksiltaan niiden kahden välissä ja lisäksi vaaditaan hyvää säädettävyyttä.

Kuva 1.9 esittää erilaisien energiantuotantolaitosten hyötysuhteen muutosperiaatteita osakuorman mukaan. Peruskuormalaitoksen hyötysuhde osakuorman mukaan edustaa vaihtoehtoa  $eff_2$ , keskikuormalaitos  $eff_3$  ja huippukuormalaitos  $eff_1$ .





Kuva 1.8. Lämpö- ja sähkötehon pysyvyyskäyrät jaettuna kolmeen teholuokkaan



Kuva 1.9. Periaatekuva energian tuotantolaitoksen hyötysuhteesta kuormituksen mukaan ( $eff_1$ = huippukuormalaitos,  $eff_2$ = peruskuormalaitos ja  $eff_3$ = keskikuormalaitos).

Tuotantokapasiteetin rakenne ja käyttö valtakunnallisessa energiajärjestelmässä vaikuttaa suuresti koko energiantuotantoketjun tehokkuuteen.

## 1.4 Potentiaalilaskennan periaatteet

Suomen energiajärjestelmä on monipuolinen, mutta samalla energiantuotannon kannalta alueellisesti hajanainen: kaasuputkisto kulkee Etelä-Suomessa, hiilivoimalaitokset ovat pääosin rannikkoseuduilla ja puupolttoaine- ja turveresurssit löytyvät Keski-, Itä- ja Pohjois-Suomesta. Kaksi tärkeintä energian loppukulutussektoria ovat energiantensiivinen teollisuus (49 % osuus vuonna 2005) ja rakennusten lämmitys (21 %). Metsäteollisuus on suurin teollisuuden energiankuluttaja, varsinkin sähkön ja prosessilämmön suhteen, seuraavina sektoreina terästeollisuus ja kemian teollisuus. Toisaalta metsäteollisuuden sivuvirrat vastaavat merkittävää osaa Suomen uusituvista energialähteistä.

Sähkön ja lämmön tuotanto koostuu pääosin ydinvoimasta, vesivoimasta ja varsin monipuolisesta maakaasusta, kivihiilestä, turpeesta ja biomassasta tuotetusta lämpövoimasta. Kaukolämmön kulutus ohjaa CHP-tuotantoa, joka vastasi 72 % kaukolämmön tuotannosta vuonna 2005. Lisäksi laaja teollisuuden CHP-kapasiteetti tuottaa prosessilämpöä ja sähköä teollisuuden tarpeisiin.

Suomi on jäsenenä pohjoismaisessa Nord Pool –sähköpörssissä Ruotsin, Tanskan ja Norjan kanssa, joten sähköä tuotetaan, tuodaan tai viedään markkinahintojen mukaan. Siten esim. Norjan vesivoiman vesitilanne vaikuttaa Suomen lauhdevoimatuotantoon. Tärkein Nord Poolin ulkopuolinen sähkön tuoja on Venäjä (9.7 TWh vuonna 2005). Päästökaupasta johtuvan hiili- ja turvevoiman tuotantokustannuksien kasvun vuoksi investoinnit lauhdevoimaan ovat pienentyneet, poikkeuksena ydinvoima, samalla kun CHP:n osuus voimalaitoskannassa kasvaa korkean hyötysuhteen ja kaukolämmön kasvavan suosion ansiosta.

Energiatehokkuustoimien vaikutusta energiajärjestelmään analysoidaan EPOLA-mallilla (Energy Policy Analysis), joka on alun perin kehitetty Kauppa- ja Teollisuusministeriölle energiapolitiikan työvälineeksi. EPOLA-malli on EFOM-energiamallinnusperiaatteeseen (Van Voort et al. 1984) perustuva dynaamislineaarinen optimointimalli, jolla voidaan lähestyä numeerisesti energiatehokkuuden potentiaalia. Tämä Excel-ympäristössä toimiva helppokäyttöinen, robusti ja modulaarinen malli tarjoaa käytännöllistä pitkän aikavälin kustannusoptimaalista energiapäätöksenteon analyysia. EPOLA-malli formuloi energiajärjestelmän rakenteen ja tuottaa kokonaiskustannukset minimoivan ratkaisun, joka kuvaa tämän energiajärjestelmän tulevaa kehitystä. Malli sisältää mm. investoinnit energiainfrastruktuuriin, prosessipohjainen metsäteollisuuden kuvaus sekä energiataseet energiansäästötoimenpiteillä. Lisäksi

malli antaa energiatehokkuuden indikaattoreita kuten primäärienergian kulutuksen ja CO<sub>2</sub>-päästöt mallin laskentavuosille. Koska EPOLA on Excel-pohjainen ja optimoinnin voi suorittaa muutamassa minuutissa, yksinkertaisia herkkyystarkasteluja voidaan suorittaa varsin vaivatta.

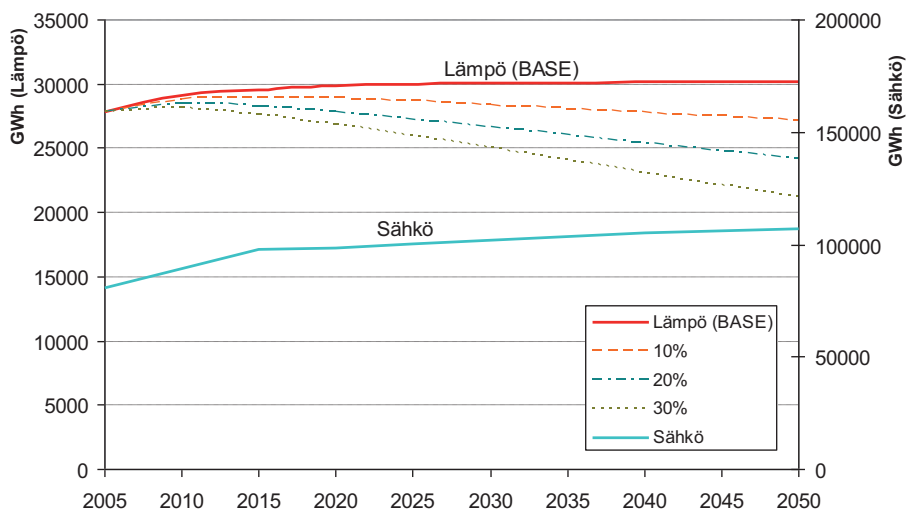
Tämänkaltainen herkkyyshanalyysi ei tuo esille ainoastaan energiatehokkuuden suoria vaikutuksia vaan myös epäsuoria systeemivaikutuksia, jotka löytyvät energiasysteemin optimaalisesta kehityksestä. Esimerkiksi teollisuuden energiatehokkuustoimien vähentäessä prosessilämmön ja sähkön loppukäyttöä, malli adaptoituu tähän muuttuvaan kysyntään mahdollisesti erilaisella polttoainejakaumalla ja investoinneilla energiainfrastruktuuriin. Nämä muutokset energijärjestelmässä vaikuttavat dynaamisesti primäärienergian kulutukseen sekä CO<sub>2</sub>-päästöihin, jotka ovat energiatehokkuuden päämäärittäjiä tällä sektorilla.

Jos loppukäyttömuutosten vaikutuksia tarkastellaan erikseen, herkkyyshanalyysi voi tuottaa yllättäviä tuloksia mallin sopeutuessa näihin yksittäisiin muutoksiin muiden loppukulutuksien pysyessä alkuperäisissä arvoissaan. Eräs yksinkertainen esimerkki tällaisesta ilmiöstä on kaukolämmitettyjen rakennusten energiatehokkuuden herkkyyshanalyysi. Vähentyvä kaukolämpökuorma tarjoaa kiintoisan skenaarion, sillä suurin osa (noin 75 %) kaukolämmöstä tuotetaan CHP-laitoksissa, jotka tuottavat sähköä muihin tarpeisiin. Tämä energijärjestelmälle spesifinen ominaisuus johtaa myös CHP-laitosten alentuneeseen kuormaan. Koska tässä herkkyyshanalyysissä ei sähkön loppukulutusta muuteta ja CHP-laitosten sähköntuotanto pienenee, seurannut sähkön niukkuus katetaan muulla energiainfrastruktuurilla eli periaatteessa lauhdevoimalaitoksilla. Kyseinen muutos energijärjestelmässä tuo esiin kiinnostavia vaikutuksia primäärienergian kulutuksessa ja päästöissä.

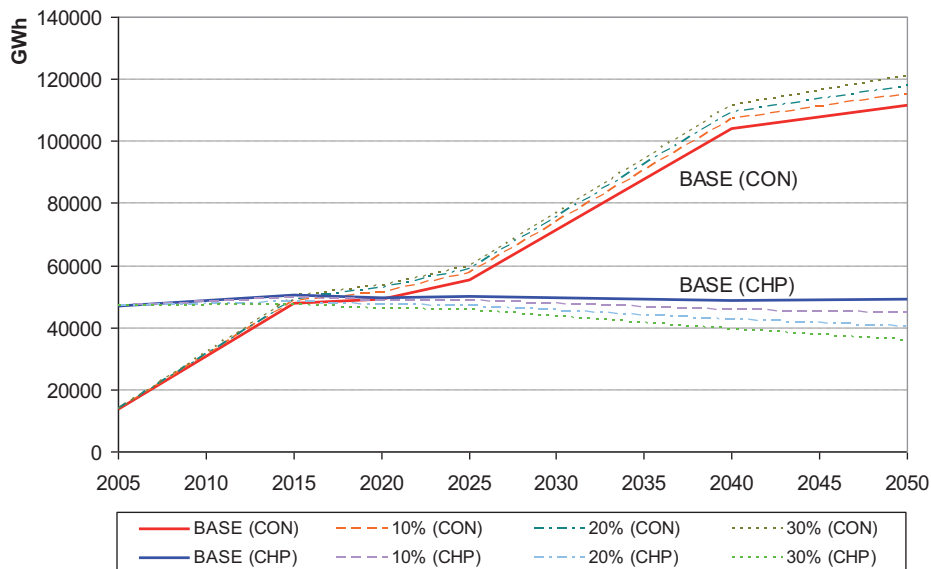
Kuvassa (Kuva 1.10) on esitetty neljä erilaista kaukolämpökuorman kehityslinjaa. On kuitenkin huomioitava, että mallin perusurassa joitakin rakennusten energiatehokkuuden parannuksia on jo otettu käyttöön ja muut herkkyyshanalyysin käyrät esittävät kaukolämpökuorman muutosta vuoden 2050 perusuran tilanteesta. Sähkön kulutuksesta on vain yksi vaihtoehto. Kuvassa (Kuva 1.11) on esitetty eri lämpökuormien vaikutukset CHP-laitoksien ja lauhdevoimalaitoksien polttoaineen kulutukseen. Selkeästi CHP-laitoksien kulutus pienenee lämpökuormasta johtuen ja lauhdevoimalaitoksien kulutus kasvaa CHP-laitoksien pienenevän sähköntuotannon vuoksi. Täten osa sähköntuotannosta siirtyy CHP:lta lauhdevoimalle. Kuvassa (Kuva 1.12) näkyvät tämän siirtymän vaikutukset primäärienergian kulutuksessa ja CO<sub>2</sub>-päästöissä. Energiatehokkuustoimet kaukolämmitetyissä rakennuksissa vähentävät primäärienergian kulutusta jonkin ver-

ran energian loppukäytön vähentyessä, mutta CO<sub>2</sub>-päästöt nousevat hieman (0.8 % vuonna 2050), sillä lauhdevoimalaitokset käyttävät pääosin korkeapäästöistä kivihiiltä tai turvetta CHP-laitoksissa käytetyn maakaasun tai biomassan sijaan. Energiatehokkuusmittareiden arvoja vähentyneen kaukolämpökuorman vaikutuksista energiatietojärjestelmään vuonna 2050 on nähtävissä kuvassa (Kuva 1.13), josta käy ilmi energiatietojärjestelmän energiatehokkuustoimien monitavoitteinen luonne.

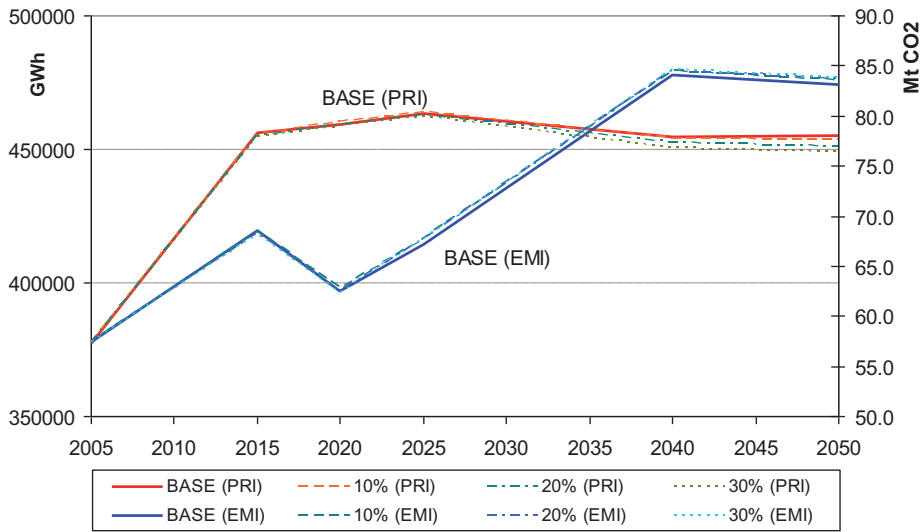
Edellä mainittu herkkyysanalyysi koski siis ainoastaan kaukolämmitettyjä rakennuksia. Jos energiatehokkuustoimia sovelletaan kaikkiin rakennuksiin (kokonaislämmitysenergia 56 551 GWh vuonna 2050) kuvan (Kuva 1.10) trendien mukaisesti, vaikutukset primäärienergiaan ja päästöihin ovat luonnollisesti selkeämmät. Tämä käy ilmi kuvista (Kuva 1.14) ja (Kuva 1.15), joissa primäärienergian kulutus ja CO<sub>2</sub>-päästöt pienenevät rakennusten energiatehokkuusparannusten myötä. Muutokset ovat kuitenkin suhteellisen pieniä johtuen mm. tulevaisuudessa muuttuvasta polttoainejakaumasta (öljystä kaukolämpöön ja puulämmitykseen), kuvan (Kuva 1.13) mukaisista kaukolämpökuorman pienenemisen vaikutuksista sekä suhteellisen suuresta muiden sektorien osuudesta kulutuksesta ja päästöistä. Tämä herkkyysanalyysi antaa aiheutta jonkinlaiselle priorisoinnille korjausrakennuksessa ja muissa rakennusten energiatehokkuustoimissa siten, että kaukolämmitetyillä rakennuksilla olisi alhaisempi prioriteetti kuin muilla keinoilla lämmitetyillä rakennuksilla, varsinkin niukkojen resurssien tilanteessa.



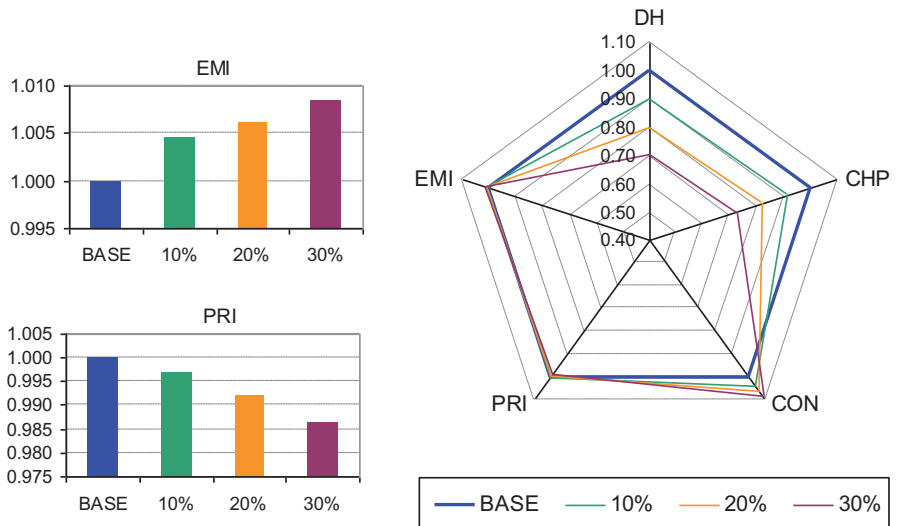
Kuva 1.10. Energiasysteemin muutosanalyysissä käytettyjä kaukolämmön kulutuksen kehitysskenaarioita (10 – 30 % pienempi kulutus kuin perusskenaariossa). BASE = perusskenaario.



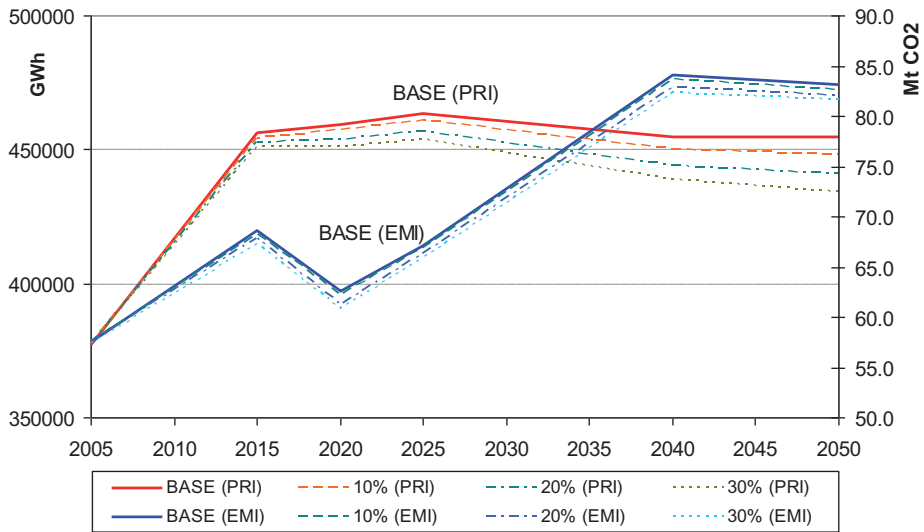
Kuva 1.11. Kaukolämpökuorman muutosanalyysin (10 – 30 % pienempi perusskenaarioon verrattua) vaikutuksia lauhdevoiman (CON) ja yhteistuotantolaitoksien (CHP) polttoaineen kulutukseen.



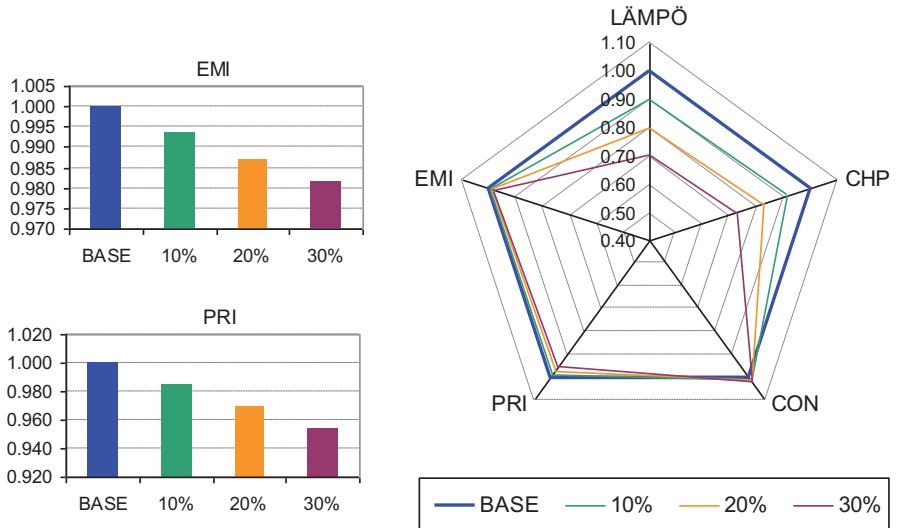
Kuva 1.12. Kaukolämpökuorman muutosanalyysin (10 – 30 % pienempi kuin perusskenaariossa) vaikutuksia primäärienergian kulutukseen (PRI) ja CO<sub>2</sub>-päästöihin (EMI).



Kuva 1.13. Kaukolämpökuorman (DH) muutosvaikutusten monitavoitteinen analyysi vuodelle 2050.



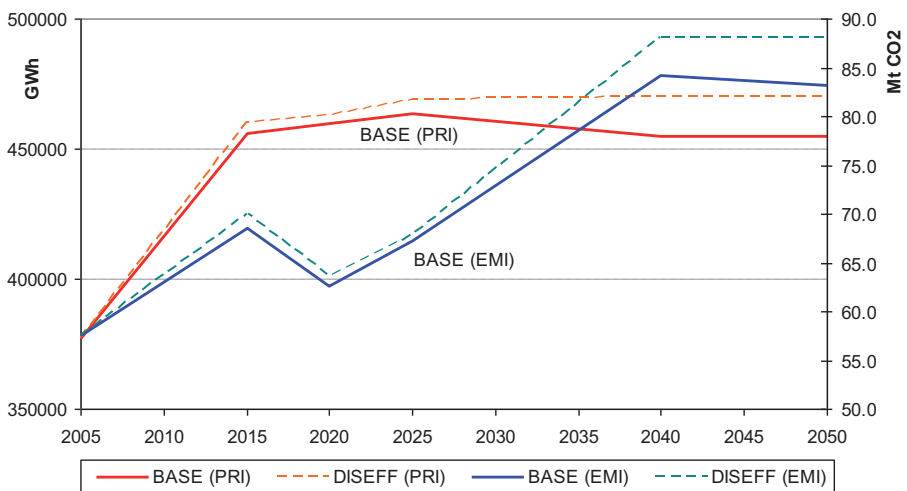
Kuva 1.14. Rakennuksien lämmityksen hyötylämpökuorman vaikutuksia primäärienergian kulutukseen (PRI) ja CO<sub>2</sub>-päästöihin (EMI).



Kuva 1.15. Rakennusten lämmön hyötylämpökuorman vaikutusten monitavoitteinen analyysi vuodelle 2050.

Energiantuotantoinfrastruktuurin energiatehokkuuspotentiaalia voidaan analysoida vertaamalla kahden skenaarion primäärienergian kulutusta ja päästöjä. Ensimmäinen skenario on perusuraskenario, johon malli on kalibroitu ja jota käytettiin edellä mainituissa herkkyystarkasteluissa. Mallissa eri energiantuotantoteknologioilla eli käytännössä voimalaitoksilla on tarkasteluajan myötä kasvavat hyötysuhdekertoimet, jotka perustuvat arvioihin energiateknologian kehityksestä. Esim. maakaasukombivoimalaitoksella on kokonaishyötysuhde 89 % vuodelle 2005 ja 93 % vuodelle 2050. Tämä hyötysuhteen kehitys vaikuttaa pääindikaattoreihin ja sen vaikutusta voidaan estimoida käyttämällä toista skenaariota, jossa kaikkien voimalaitoksien, mukaan lukien teollisuuden CHP, kaukolämpökattilat ja teollisuuden lämpökattilat, hyötysuhdeparametrit pysyvät vuoden 2005 tasolla koko mallin tarkasteluajan.

Kuvassa (Kuva 1.16) on esitetty näiden kahden skenaarion ero primäärienergian kulutuksen ja CO<sub>2</sub>-päästöjen suhteen. Voimalaitoksien energiatehokkuusparannuksien vaikutus on merkittävä, muttei kuitenkaan urauurtava. Vuonna 2050 primäärienergiankulutus on energiatehokkuustoimien ansiosta 3.3 % pienempi ja CO<sub>2</sub>-päästöt 5.9 %. Tämä tulos voidaan tulkita niin, että Suomen energiassektori on jo niin teknologisesti kehittynyt, että energainfrastruktuurin energiatehokkuuspotentiaali jää suhteellisen pieneksi.



Kuva 1.16. Energiantuotantoinfrastruktuurin energiatehokkuuden kehityksen poiston (DISEFF) vaikutus primäärienergian kulutukseen (PRI) ja CO<sub>2</sub>-päästöihin (EMI).



## 1.5 Johtopäätökset

### Päähavainnot

Kulutuksessa säästetty energia on yleensä paras tapa säästää, koska se vaikuttaa läpi koko energiaketjun aina primäärienergiälähteeseen saakka. Säästetty energia ei kuitenkaan aina vaikuta suoraviivaisesti päästöjen vähentämiseen, vaan on syytä tarkastella loppukulutuksen kokonaisvaikutusta energiajärjestelmään. Teollisuusprosessien lämmön käyttö kaukolämmitykseen säästää primäärienergiälähteitä verrattuna erilliseen lämmöntuotantoon. Rakennusmääräysten tiukentuminen vähentää lämmön kulusta ja vaikuttaa CHP tuotannon mahdollisuuksiin kaukolämmön kautta etenkin taajamien reuna-alueilla. Tiukentuvat rakennusmääräykset vähentävät myös sähkölämmitteisten talojen energiankulutusta. Samoin vaikuttaa suoran sähkölämmityksen muuttaminen lämpöpumpulla toimivaksi ilma tai maa lämmönlähteenä sekä poistoilmalämpöpumpu. Toisaalta öljystä luopuminen tuo uusia pienkuluttajia sähkölämmityksen piiriin. Talousvaikutusta pitäisi arvioida korvaavaan sähkön tuotantoon pörssisähkön referenssihinnan perusteella.

Energiaketjut ovat havainnollinen tapa tarkastella energiatehokkuutta ja vertailla eri vaihtoehtoja. Vertailu täytyy tehdä riittävän kattavasti, jotta kaikki vaikutukset tulee huomioonotetuksi. Eri tuotanto- ja kulutussektorit ovat tehokkaasti integroituneet keskenään, joten myös eri kulutussektorien väliset vaikutuksen täytyy tarkastella. Energia-tehokkuuden parantaminen vaatii investointeja ja kustannukset usein estävät monien teknisten parannusten toteutumisen.

Ympäristön kannalta päästötön energiantuotanto olisi paras vaihtoehto eli ei polteta mitään. Energian laadun huomioiminen (exergia) energiaketjussa pitäisi korostua enemmän. Sähkön säästö loppukulutuksessa on energiataloudellisesti kannattavampaa kuin lämmön säästö, koska sen exergia-arvo on suurempi ja sitä on helpompi muuttaa muihin loppukäyttömuotoihin kuin lämpöenergiaa.

## **Toimenpide-ehdotuksia**

Energian tuotannossa pitäisi pyrkiä sulkemaan kaikki energiahukkavirrat ja palauttamaan ne prosessiin tai käyttämään toisen prosessin energialähteenä. Teoreettinen lämpötilaraja on ympäristön lämpötila. Suomessa on hyvät mahdollisuudet hyödyntää myös matalia lämpötiloja, koska lämmityskaudella ulkolämpötila on suurimmaksi osaksi pakkasen puolella.

CHP laitosten mitoitusta pitäisi muuttaa vastaamaan paremmin tulevaa kaukolämmön lämpötilatarvetta. CHP-laitoksen turpiinin paisunta voitaisiin pidentää alentaen vastapainetta (rakennusasteen nosto) ja laskea kaukolämmön lämpötilaa sekä mitoittaa kaukolämpöverkko tarkemmin kulutustarpeen mukaan ja tehdä riittävä lämpöeristys. Loppukuluttajilla pitää turvata myös riittävä kaukolämpöveden jäähdytys.

## **Tutkimustarpeita**

### **Energian tehostamispotentiaali ja sen vaikutukset**

Tässä raportissa on tutkittu rakennusten lämmön säästön vaikutusta energiasectoriin ja voimalaitosten teknistä kehitystä hyötysuhteen paranemisen kautta.

Laskentaa pitäisi laajentaa energiaketjun eri osa-alueille ja muihin sektoreihin: rakennus-, yhdyskunta-, teollisuus- ja liikennesektoreille. Skenaariolaskennalla voidaan arvioida eri tehostamistoimenpiteiden merkitystä sektoreittain sekä niiden ristikkäisvaikutusta.

Tehostamistoimenpiteet pitäisi kohdistaa lämmön säästön lisäksi erityisesti sähkön säästöön eri sektoreilla sekä ristikkäisvaikutukset. Arviointi voidaan jakaa kahteen taivotteeseen:

- Nopeat vaikutukset eli mitä tapahtuu lyhyellä aikavälillä
- Hitaat vaikutukset eli mitä tapahtuu pitkällä aikavälillä

Tulosten perusteella pitäisi tehdä johtopäätöksiä, mihin kannattaa panostaa, jotta saavutetaan nopeiten haluttu kehityspolku. Kiinnostavaa olisi myös selvittää kuinka paljon vuoden 2020 EU:n Suomelle asettamista päästötavoitteesta olisi saavutettavissa tehostamistoimenpiteiden kautta. Tehostamispolun perusteella voitaisiin arvioida myös kotimaista kysyntää ja vientimahdollisuuksia.

### **Biopolttoaineiden energiaketjut pääkaupunkiseudulla**

Biopolttoaineiden käytön lisääminen CO<sub>2</sub> päästövähennyskeinona on tavoitteena pääkaupunkiseudulla. Esim. Helsingin puuhakkeen tarpeeksi on arvioitu 8,5 milj.m<sup>3</sup> vuodessa, mikä merkitsee rekkakuljetuksena n. 60 000 rekkaa vuodessa. Tuo rekkamäärä merkitsee 165 autoa päivässä eli rekan purkuaika on noin 10 min/rekka koko vuoden. Talvella purkuväli pitäisi olla lyhyempi ja kesällä se voi olla pidempi. Jo yksistään logistiikan toimivuus on haastava tehtävä. Biomassa voitaisiin kaasuttaa esim. III-kehän ulkopuolella ja johtaa putkessa maan alla voimalaitoksille.

Tutkimuksen tavoitteena olisi selvittää biopolttoaineen saatavuus, kuljetusetäisyydet, logistiikka kuten kuljetusvälineet, vaihtoehtoiset kuljetusreitit, varastoitavuus ja jätteen käsittely. Esim. puutuhkan määrä tulee olemaan huomattava.

Tietenkin pitäisi tutkia myös muut vaihtoehdot biopolttoaineen käytölle, joilla päästäisiin samoihin päästövähennyksiin.

## Lähdeluettelo

Energiatoteollisuus (2007a), *Kaukolämpötilasto 2007*, 69 s.

Mäkinen, T., Soimakallio, S., Paappanen, T., Pahkala, K., Mikkola, H. (2006), *Green house gas balances and new business opportunities for biomass-based transportation fuels and agrobiomass in Finland*, VTT, Research notes 2357.

Voort, E. van der, Donni, E., Thonet, C., Bois d'Enghien, E., Dechamps, C. & Guilmot, J.F. (1984). *Energy Supply Modelling Package EFOM-12C Mark I, Mathematical description*. Louvain-la-Neuve, Cabay: Commission of the European Communities, EUR-8896.

## Liite A. Lista energiatehokkuuteen liittyvistä direktiiveistä

### EU:N DIREKTIIVIT EPO–TUTKIMUKSEN KONTEKSTISSA

1. *Uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisen direktiivi (2009/28/EY)*; direktiivillä luodaan yhteiset puitteet uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian edistämiseksi. Siinä asetetaan sitovat kansalliset tavoitteet, jotka koskevat uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian kokonaisuutta energian kokonaisloppukulutuksesta ja uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian osuutta liikenteessä.

2. *Energiapalveludirektiivi (2006/32/EY)*; Direktiivin tarkoituksena on parantaa ja kannustaa tehokasta energian loppukäyttöä jäsenvaltioissa säätämällä tavoitteita sekä mekanismeja, kannustimia ja taloudellisia kannustimia markkinoille tavoitteena energian tehokas loppukäyttö.

3. *Mittalaitedirektiivi (2004/22/EY)*; Direktiivi koskee mittauslaitteita, joille useimmissa jäsenmaissa asetetaan lakisääteisiä vaatimuksia esim. polttoainemittarit, vesi-, kaasu- ja sähköenergiamittarit. Laiteryhmiltä edellytettävät tekniset vaatimukset on kirjattu direktiiviin.

4. *Hyötylämmön tarpeeseen perustuvan CHP tuotannon edistäminen (2004/8/EY)*; Direktiivin tarkoituksena on lisätä energiatehokkuutta ja parantaa toimitusvarmuutta luomalla puitteet sähkö ja lämmön tehokkaan yhteistuotannon edistämiseksi ja kehittämiseksi sisämarkkinoilla hyötylämmön tarpeen ja primäärienergian säästöjen perusteella ottaen huomioon kansalliset erityisolosuhteet sekä taloudelliset ja ilmasto-olosuhteet

5. *Kasvihuonekaasujen päästöoikeuksien kaupan järjestelmän toteuttamisen direktiivi (2003/87/EY)*; Direktiivillä perustettiin kasvihuonepäästöjen päästöoikeuksien kaupan järjestelmä yhteisössä kasvihuonekaasujen vähentämiseksi sekä kustannustehokkaasti että taloudellisesti.

6. *Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi (2002/91/EY)*; Direktiivin tarkoituksena on edistää rakennusten energiatehokkuuden parantamista yhteisössä ottaen huomioon ilmasto-olosuhteet, paikalliset olosuhteet sekä sisäilmastolle asetettavat vaatimukset ja kustannustehokkuus. Direktiivillä säädetään vaatimuksia, jotka koskevat rakennusten kokonaisenergiatehokkuuden laskentamenetelmän kehitystä, vähimmäisvaatimusten soveltamista uusien rakennusten energiatehokkuuteen, energiatehokkuuden vähimmäisvaatimusten soveltamista suuriin saneerattaviin rakennuksiin, rakennusten energiasertifiointi ja yli 15 vuotta vanhojen lämmityskattiloiden ja ilmastointijärjestelmien tarkastuksia.

7. *Sähkön tuotannon edistäminen uusiutuvista energialähteistä (2001/77/EY)*; Direktiivin tarkoitus on edistää uusiutuvien energialähteiden osuutta sähkötuotannossa sisämarkkinoilla ja luoda perusta tätä koskeville yhteisön puitteille.

## 2. Yhdyskunnat

Irmeli Wahlgren ja Pekka Lahti

VTT Rakennusten teknologiat ja palvelut

## Tiivistelmä

Yhdyskunnan tai yhdyskuntarakenteen energiatehokkuudella tarkoitetaan yhdyskunnan rakentamisen ja käytön sekä yhdyskunnan synnyttämän liikenteen aiheuttamaa energian kulutusta ja päästöjä suhteessa yhdyskunnan tuottamiin palveluihin, kuten sen tarjoamaan asukas- ja työpaikkalukuun tai kerrosneliömetreihin. Energiatehokkuuden mittarit koostuvat useista osista ja vaiheista. Eri mittarit täydentävät toisiaan. Yhdyskuntien energiatehokkuuden mittaamisen taserajat voidaan määritellä suunnittelutasojen ja alueellisten rajojen perusteella tai toiminnallisista lähtökohdista.

Tutkimusaineiston ja laskentakokeilujen perusteella yhdyskuntien energiansäästöpotentiaali voi olla merkittävä. Suurin energiatehokkuuden potentiaali on rakenteiden käyttövaiheessa ja liikenteessä. Yhdyskuntien energiatehokkuuden mittausta ja potentiaalit kytkeytyvät merkittävästi muihin tutkimuksen osa-alueisiin: rakennuksiin, energiantuotantoon, teollisuuteen ja logistiikkaan.

Yhdyskuntien energiatehokkuuden mittaamista ja energiansäästöpotentiaalnin arviointia tulisi kehittää edelleen.



## **Abstract**

Energy use in communities (city regions, cities, towns and other urban areas as well as rural communities) takes place in both buildings and infrastructure, during construction, use, maintenance, repair, renovation, demolition and recycling as well as during transportation of people and goods. That is why energy efficiency of communities must be a composition of energy used during the life-cycle of several physical elements brought together for the community. Energy efficiency of communities can be defined as a ratio between an input of energy consumption or emissions, and an output of services, such as number of inhabitants and workplaces or floor square metres. There are several energy efficiency indicators which consist of different parts and phases. Indicators complete each other. System boundaries for measuring energy efficiency of communities can be defined on the grounds of planning levels and areas or from functional bases.

Communities may have a relatively high potential for energy efficiency improvements. Potential seems to be highest in the operation phase of structures and in transportation. Measuring energy efficiency and potentials of communities are connected strictly to other sectors of the research: buildings, energy production, industry and logistics.

Measuring energy efficiency and assessment of energy saving potential should be developed and studied furthermore.

## Lyhenteiden selitykset

|  |   |
|--|---|
| EPO                                      | Energiatohokkuuden mittarit ja potentiaalit   |
| k-m <sup>2</sup> , kerros-m <sup>2</sup> | Kerrosneliömetri                              |
| CO <sub>2</sub> -ekv.t                   | Hiilidioksidiekvivalenttitonni                |
| kWh, MWh                                 | Kilowattitunti, megawattitunti                |
| MJ                                       | Megajoule                                     |
| ETy                                      | Yhdyskuntien energiatohokkuusluku             |
| PTy                                      | Yhdyskuntien päästötöhtokkuusluku             |
| EPTy                                     | Yhdyskuntien energia- ja päästötöhtokkuusluku |
| IPCC                                     | Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli      |
| LCA                                      | Elinkaarivointi                               |

## 2.1 Johdanto

### Tutkimuksen tausta ja tavoite

Euroopan komissio hyväksyi vuonna 2008 strategian ilmastotoimista. Sen mukaan jäsenvaltioiden tulee vähentää niiden yhteisiä kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 20 % ja lisätä uusiutuvien energialähteiden osuutta 20 %:in loppukulutuksesta vuoteen 2020 mennessä. Lisäksi Euroopan komissio on asettanut suuntaa antavan tavoitteen vähentää primäärienergian kulutusta 20 % verrattuna vuoden 2020 ennakoituun energiankulutukseen. Tämä korostaa tarvetta parantaa energiatehokkuutta EU:ssa. Energiatehokkuuden mittaamiseksi ja tehostamispotentiaalien laskemiseksi ei ole kuitenkaan ollut yhteistä menetelmää. Tämän vuoksi tammikuussa 2008 käynnistettiin tutkimus Energiatehokkuuden mittarit ja potentiaalit, EPO edistämään tutkimusta tällä alueella (Tekes, 2009).

Tutkimuksen tavoitteeksi asetettiin: 1) kehittää yhdenmukainen, koko energiaketjun kattava energiatehokkuuden käsitteistö ja mittaristo, 2) luoda energiatehokkuuden potentiaalien laskentatapa, 3) laskea kehitetyn laskentatavan (1+2) avulla saavutettavissa oleva energiatehokkuuden tehostamispotentiaali, 4) tuottaa ehdotus tulevaisuuden kansalliseksi energiatehokkuuden painopistealueiksi ja luoda perusta uusille koko energiaketjua palveleville liiketoimintamalleille. Tutkimus kattoi sektorit: energiantuotanto, teollisuus, rakennukset, yhdyskunnat, liikenne ja logistiikka.

Tämä raportti käsittelee yhdyskunnat - osa-alueita. Koko hankkeen tuloksia sektori-kohtaisine eroavaisuuksineen käsitellään tutkimuksen yhteenveto-osissa (EPO loppuraportti, Osat 1 ja 2). VTT:n osuudesta kirjoitettiin myös englanninkielinen raportti (Forsström et al., 2011).

### Kohteen kuvaus ja rajaukset

*Yhdyskunnalla* tarkoitetaan ihmisten muodostamaa asuin yhteisöä, jonka fyysinen rakenne koostuu rakennuksista ja perusrakenteesta (infrastruktuurista) mukaan lukien siihen kuuluvat viher- ym. vapaa-alueet. Yhdyskunta rajataan usein toiminnallisena kokonaisuutena, kuten työssäkäyntialueena. *Yhdyskuntarakenteella* tarkoitetaan tapaa, jolla yhdyskunnan fyysiset tai toiminnalliset osat ovat suhteessa toisiinsa.

Energiatehokkuuden parantamisella tarkoitetaan suoritteiden (sis. mm. tuotteet ja palvelut) tuottamiseksi tarvittavan energiamäärän vähentämistä energian tuotannossa (sis. polttoaineen hankinnan), siirrossa, jakelussa tai käytössä. Energiatehokkuus *tuotannossa* tarkoittaa saman energiamäärän tuottamista entistä pienemmin panoksin tai suuremman energiamäärän tuottamista samoin panoksin. Energiatehokkuus *energian siirrossa ja jakelussa* tarkoittaa energian häviöiden ja ominaiskulutuksen alentamista siirto- tai jakeluoperaatioissa. Energiatehokkuus *energiankäytössä* tarkoittaa energian ominaiskulutuksen alentamista (kun muut tekijät pysyvät vakiona). Joissain tapauksissa ominaiskulutuksen kasvu on perusteltua, esim. kun CO<sub>2</sub> – päästö pienenee, mutta absoluuttinen energiankulutus kasvaa biopolttoaineisiin siirryttäessä, tai kun siirrytään käyttämään exergialtaan alhaisempia energialähteitä. Energiatehokkuuden paraneminen johtaa energiansäästöön.

Yhdyskuntien ja yhdyskuntarakenteen energiankäyttö koostuu fyysisten rakenteiden tuottamisesta ja käytöstä sekä toimintojen edellyttämästä liikenteestä aiheutuvasta energiankäytöstä. Yhdyskuntien kehittämisen vaikutukset energiatehokkuuteen ilmenevät usein muiden sektorien vaikutusten yhteydessä. Alue- ja yhdyskuntarakenteen muutokset vaikuttavat energiankäyttöön ja kasvihuonekaasupäästöihin toisaalta suoraan rakenteiden eli rakennusten, verkostojen ja muiden rakenteiden määrän ja sijainnin sekä toimintojen välisen liikenteen kautta, ja toisaalta muiden, mm. elintasoon, autoistumiseen ja kuljetusmääriin liittyvien muutosten sekä näiden muutosten yhteis- ja kerrannaisvaikutusten kautta (Harmaajärvi et al. 2001). Kerrannais- ja kehävaikutukset ilmenevät esimerkiksi kulkutapajakaumassa, missä autoistuminen kasvattaa henkilöautojen osuutta liikenteessä. Se taas luo edellytyksiä yhdyskuntarakenteen hajautumiseen, mikä puolestaan lisää edelleen henkilöautojen käyttöä (Harmaajärvi et al. 2001).

Rakennuskannan (asuin-, palvelu- ja tuotantorakennusten) lämmitysenergian ja kiinteistösähkön yhteenlaskettu osuus Suomen energian loppukäytöstä vuonna 2003 oli 39 %. Rakennustarvikkeiden valmistus ja rakentamisen energia vievät sen lisäksi yhteensä 5 % energian loppukäytöstä. Yhdyskuntien ja muun rakennetun ympäristön toiminnan olennainen osa on liikenne, jonka osuus energian käytöstä on noin 16 %. Yhdyskuntarakenteen merkitys energiankäytön ja kasvihuonekaasujen vähentämisessä on siten merkittävä, noin 60 %.

Yhdyskuntarakenteen ja rakennetun ympäristön merkitys kansantalouden osana on merkittävä, noin 35 – 45 % bruttokansantuotteesta ja 75 % kansanvarallisuudesta. Siten on syytä kohdistaa ekotehokkuutta (tässä energiatehokkuutta) lisääviä toimenpitei-

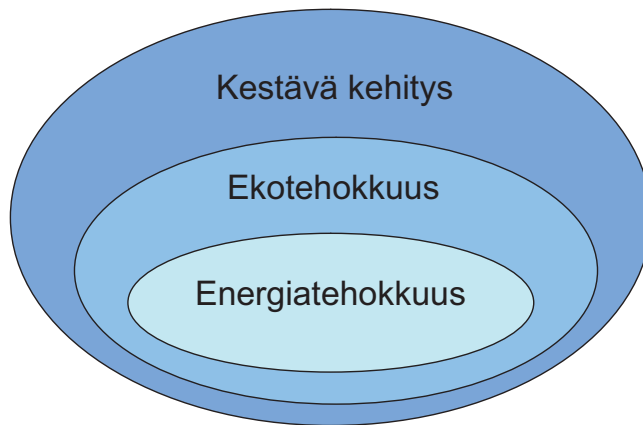
tä ja tutkimus- ja kehitystyötä myös olemassa olevaan rakennettuun ympäristöön uusi-  
en yhdyskuntien ja täydennysrakentamisen ohella (Heinonen et al. 2002).

Suomen alue- ja yhdyskuntarakenteen ominaispiirteenä on pitkään ollut kehitys, jossa aluerakenne keskittyy ja samaan aikaan yhdyskuntarakenne hajautuu kasvavilla kaupunkiseuduilla. Suomen taajamissa käytetään maata asukasta kohden moninkertainen määrä muihin länsimaihin ja myös pohjoismaihin verrattuna. Tämä merkitsee pitempiä työssäkäynti- ja asiointietäisyyksiä, korkeita infrastruktuurin rakentamis- ja ylläpitokustannuksia sekä korkeita yhdyskuntien päivittäisestä toiminnasta aiheutuvia liikennekustannuksia. Samalla aiheutuu runsasta luonnonalueiden ja -varojen kulutusta ja kasvihuonekaasujen päästöjä. Yhdyskuntarakenteen eheyttämisen tavoite on kirjattu valtakunnallisiin alueidenkäyttötavoitteisiin ja Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategiaan.

Yhdyskuntarakenteeseen liittyvien valintojen vaikutus primäärienergiankulutukseen ja kasvihuonekaasupäästöihin voi eräiden tutkimusten mukaan olla asuntoaluetasolla 200 %, kuntatasolla 60 % ja seutu- ja maakuntatasolla 10 % (Wahlgren 2009). Koko Suomen tasolla tutkittiin yhdyskuntarakenteen vaikutuksia kasvihuonekaasupäästöihin Suomen kansallista ilmastostrategiaa valmisteltaessa vuonna 2001. Tutkimuksen mukaan yhdyskuntarakenteen kehittämisvalinnoilla voidaan saavuttaa 2,3 miljoonan CO<sub>2</sub>-ekvivalenttitonnin päästövähennys nykykehitykseen verrattuna vuoden 2010 tilanteessa. Vähennys vastaa 15 % Suomen Kioton pöytäkirjan mukaisesta päästövähennystavoitteesta (Harmaajärvi et al. 2001). Vuonna 2010 valmistunut tutkimus Suomen kaupunkiseutujen yhdyskuntarakenteen ja kasvihuonekaasupäästöjen kehityksestä vuosina 2005 – 2050 osoittaa, että jatkuvasti hajautuva yhdyskuntarakenne voi heikentää muiden kasvihuonekaasupäästöjä vähentävien toimenpiteiden vaikutusta jopa 30 % ja tiivistävällä rakenteella voidaan niitä vastaavasti voimistaa jopa 20 % (Lahti & Moilanen 2010).

Hallitustenvälinen ilmastomuutospaneeli (IPCC) on todennut neljännessä arviointiraportissaan rakennusten ja liikenteen kasvihuonekaasujen taloudellisen vähentämispotentiaalin merkittäväksi. Kaupunkisuunnittelulla voidaan vaikuttaa näihin päästöihin (IPCC 2007). Energiatohokkuustoimikunnan mietinnössä maankäytön ja liikennejärjestelmäsunnittelun energiansäästöpotentiaaliksi arvioitiin vuonna 2020 yhteensä 540 GWh.

Energiatehokkuuden mittaaminen on osa laajempaa viitekehystä (kuva 2.1). Energiatehokkuuden lisääminen ei ole itseisarvo vaan väline muiden, laajempien tavoitteiden saavuttamisessa. Energiatehokkuuden arvioinnissa on huomioitava myös muita näkökulmia.



*Kuva 2.1. Energiatehokkuuden mittaus osana ekotehokkuutta ja kestäväää kehitystä.*

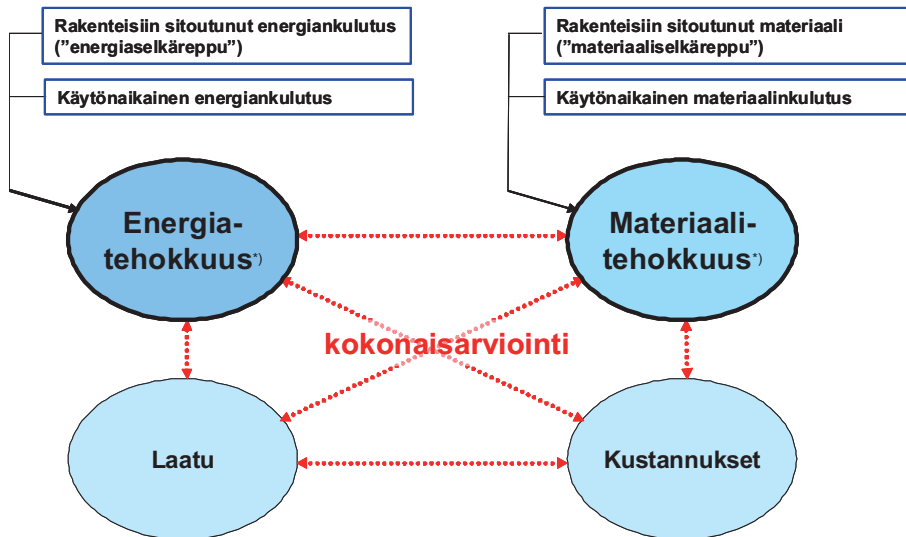
Energiatehokkuus voidaan määrittää osaksi ekotehokkuutta (eco-efficiency). Ekotehokkuus on ekologista tehokkuutta, joka mittaa luonnonvarojen käyttöä ja aiheutettuja haittoja suhteessa saavutettuun tulokseen. Se voidaan määrittää osaksi kestäväää kehitystä (sustainability). Kestävä kehitys sisältää ekologisen (ympäristöllisen), taloudellisen ja sosiaalisen (ml. kulttuurisen ja institutionaalisen) kestävyiden.

Energiatehokkuuden rinnalla voidaan mitata materiaalitehokkuutta (energiankulutuksen vähentäminen saattaa lisätä materiaalien kulutusta ja päinvastoin).

Energiatehokkuuden (kWh/tuote- tai palveluyksikkö) rinnalla voidaan mitata energian tuotannossa ja käytössä syntyvien päästöjen tai hiilijäljen määrää (esim. CO<sub>2</sub>-ekv.kg/tuote- tai palveluyksikkö).

Energiatehokkuuden lisäksi pitää arvioida energiantuotannon ja käytön aiheuttamia muita muutoksia tarkastelukokonaisuudessa, esim. yhdyskuntatasolla ympäristön laatua, rakennustasolla sisäilmaston laatua, liikenteessä onnettomuuksia ja melua, teollisuustuotannossa työympäristön viihtyisyyttä, turvallisuutta jne.

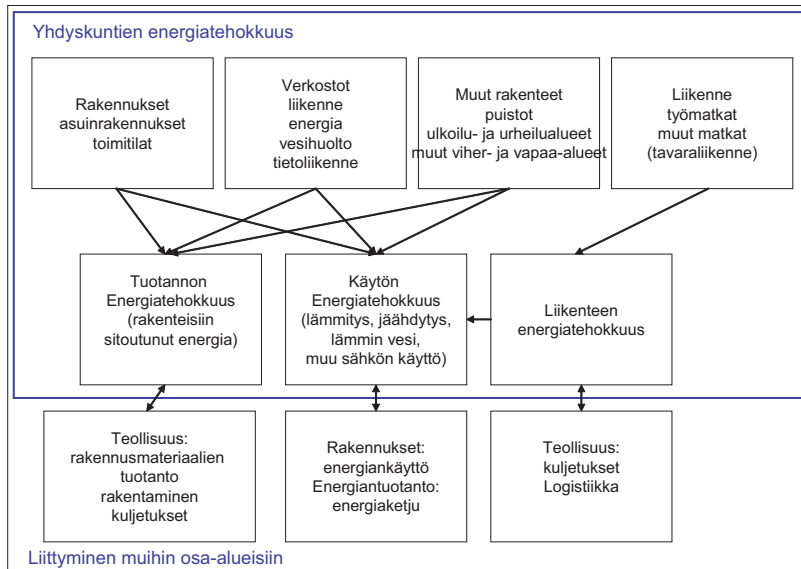
Kokonaisuuden arviointi edellyttää ainakin seuraavien tekijöiden mukana oloa: energiatehokkuus, materiaalitehokkuus, päästöjen ja jätteiden suhteellinen määrä (voidaan sisällyttää myös edellisiin), ympäristön ja elämän laatu sekä kustannukset (kuva 2.2).



Kuva 2.2. Energiatehokkuuden arviointi osana kokonaisarviointia. \*) Päästöjen ja jätteiden (kierrätys ml.) suhteellisen määrän arviointi on sisällytetty tässä energia- ja materiaalitehokkuuksiin.

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan yhdyskuntien energiatehokkuutta ja CO<sub>2</sub>-päästöttehokkuutta. Materiaalitehokkuutta tarkastellaan vain materiaalien sisältämän energian osalta. Laatu- ja kustannustekijät on pääosin rajattu tarkastelun ulkopuolelle.

Kuvassa 2.3 esitetään yhdyskuntien energiatehokkuuden osatekijät ja niiden liittymisen EPO-tutkimuksen muihin osa-alueisiin.



Kuva 2.3. Yhdyskuntien energiatehokkuus ja liittyminen tutkimuksen muihin osa-alueisiin.

## Menetelmät

Työ on tehty kirjallisuusselvitysten, asiantuntijahaastattelujen ja -keskustelujen, VTT:n tarkoitukseen soveltuvien arviointimallien (mm. EcoBalance) ja tutkimusryhmien yhteistyön avulla. Yhdyskuntien energiatehokkuutta ja sen mittaamista on kartoitettu kirjallisuusselvityksillä. Energiatehokkuuden mittaamisen taserajojen ja mittarien määrittelyssä ovat keskeisellä sijalla olleet asiantuntijahaastattelut ja -keskustelut. Laskentamenetelmien muodostamisessa on hyödynnetty aikaisemmin tehtyjä case-tutkimuksia ja arviointimalleja.



## 2.2 Taserajat

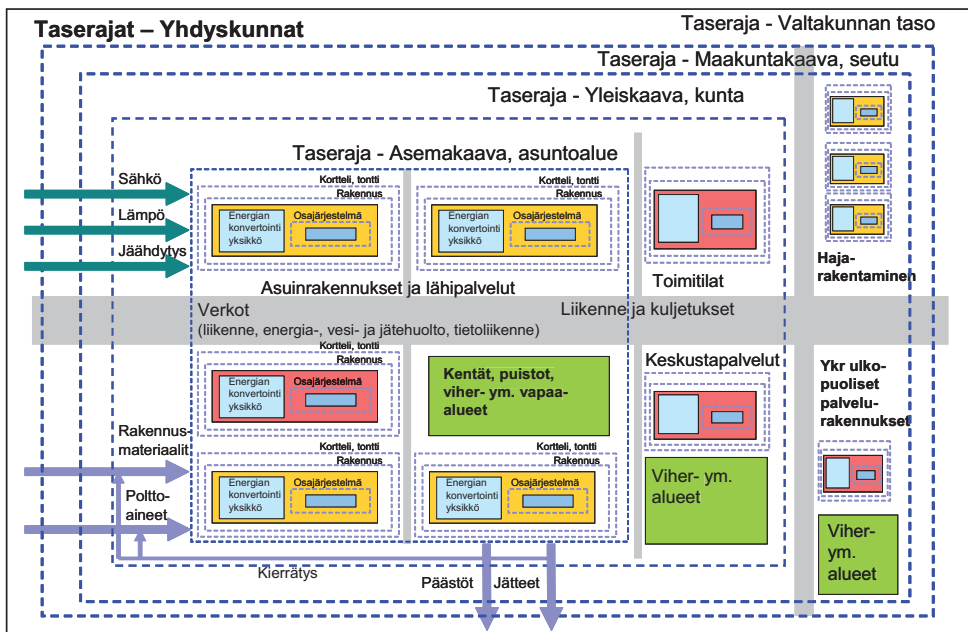
### Taserajat yhdyskuntien energiatehokkuuden mittaamisessa

Energiatehokkuutta mitattaessa on tarpeen määritellä se kokonaisuus, jonka energiatehokkuudesta on kyse. Tämä kokonaisuus määritellään taserajojen avulla. Taserajojen määrittely on tarpeen päällekkäin laskennan tai joidenkin tekijöiden katveeseen jäämisen välttämiseksi sekä vertailtavuuden varmistamiseksi. Taserajat voivat tarkastelukohteesta riippuen olla suppeampia tai laajempia, ja ne voivat olla sisäkkäisiä, jolloin laajin rajaus voi sisältää useita suppeampia rajauksia.

Yhdyskuntien energiatehokkuuden tarkastelu perustuu yhdyskuntarakenteen ominaisuuksiin ja koostuu useista tekijöistä: rakennuksista, verkostoista ja muista rakenteista (perusrakenteesta) sekä yhdyskunnan toimintojen edellyttämästä liikenteestä.

### Yhdyskuntien taserajat

Kuvassa 2.4 esitetään yhdyskuntien energiatehokkuuden mittaamisessa käytettäviä mahdollisia taserajoja.



Kuva 2.4. Yhdyskuntien energiatehokkuuden mittaamisen taserajat.

Suppein yhdyskuntien energiatehokkuuden taseraja koskee asunto- tai muuta lähialuetta, jonka suunnittelua ohjataan asemakaavalla. Taserajan sisällä ovat seuraavat energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät:

- asuinrakennukset
- toimitilat (lähitoimitilat)
- kentät, puistot, viher- ja vapaa-alueet (lähialueet)
- verkot (infrastruktuuri): liikenne, energia, vesi, jätehuolto
- liikenne (alueen toimintojen aiheuttama liikenne)

Yleiskaavatason, kunnan tai kunnanosan tai useamman kunnan yhteisen alueen, sisällä ovat seuraavat energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät:

- asemakaavatason tekijät
- keskustapalvelut
- muut toimitilat (laajemmalla alueella)
- viher- ja vapaa-alueet (laajat, koko yhdyskuntaa palvelevat)
- kytkentäverkot, alueita yhdistävät verkot
- liikenne (alueiden aiheuttama ja yhdyskunnan sisällä kulkeva liikenne)

Seutu- ja maakuntatason sisällä ovat seuraavat energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät.

- asemakaava- ja yleiskaavatason tekijät
- hajakenttä
- yhdyskuntien ulkopuoliset palvelut
- laajat metsä- ym. alueet, viher- ja vapaa-alueet
- seudulliset, maakunnalliset ja valtakunnalliset verkot
- liikenne (yhdyskuntien aiheuttama ja seudun tai maakunnan sisällä kulkeva liikenne)

Valtakunnantasolla yhdyskuntien energiatehokkuutta voidaan arvioida arvioimalla eri osatekijöiden kehitystä koko maan laajuisesti. Eri taserajojen sisällä olevat tekijät voivat vaihdella tapauskohtaisesti, esimerkiksi hajakenttä voi kuulua myös yleiskaavatason tarkasteluihin. Liikenteen tarkastelussa kohteena on taserajan sisällä olevien toimintojen aiheuttama liikenne, joka voi suuntautua myös rajojen ulkopuolelle.

Esimerkiksi asuntoalueiden osalta ei ole mielekästä tarkastella alueen sisäistä liikennettä, vaan alueen sijainnista aiheutuvaa ulkoista liikennettä.

Edellä esitetty taserajojen määrittely perustuu Suomen alueidenkäytön suunnittelujärjestelmän kaavatasoihin ja siten hallinnollisiin tai alueellisiin rajoihin. Toinen mahdollinen taserajojen määrittelyperuste voisi olla toiminnallinen, jolloin rajat määräytyisivät esimerkiksi seuraavasti:

- lähiympäristö: asunto, lähipalvelut (lasten päivähoido, koulu, kauppa, puisto, lähivirkistysalue, joukkoliikenteen pysäkit), tai päivittäisympäristö
- yhdyskunta: lähiympäristöä laajempi aluekokonaisuus, tai viikoittaisympäristö
- työssäkäyntialue: asunnot, työpaikat, keskustapalvelut, virkistysalueet; voi sisältää useita yhdyskuntia

Toiminnallisten taserajojen määrittelyssä voidaan hyödyntää kaavoitukseen (hallinnollisiin tai alueellisiin rajoihin) perustuvia määrittelyjä: lähiympäristön tai päivittäisympäristön rakenteet ja toiminnot sisältyvät asuntoalue- tai asemakaavataso rajoihin, yhdyskuntatason tai viikoittaisympäristön rajat voivat sisältää asemakaava- ja yleiskaavataso rakenteita ja toimintoja, ja työssäkäyntialue voi sisältää seudun tai maakunnan tai vielä laajemman alueen rakenteet ja toiminnot.

## **Taserajojen liittymäkohdat muihin ryhmiin**

Yhdyskuntien energiatehokkuuden mittaamisen taserajat kytkeytyvät merkittävästi muiden sektorien energiatehokkuuden mittaamiseen.

- Rakennukset ovat osa yhdyskuntarakennetta ja niiden energiatehokkuutta koskevat tulokset sisältyvät suoraan yhdyskuntien energiatehokkuuden mittaamiseen. Rakennusten energiatehokkuus kytkeytyy yhdyskuntien energiatehokkuuteen sekä käytön aikaisen energiankulutuksen että rakennusmateriaaleihin sitoutuneen (rakennusmateriaalien tuotannon edellyttämän) energian osalta.
- Energiantuotantoketjun energiatehokkuus liittyy myös suoraan yhdyskuntien energiatehokkuuden mittaamiseen. Tämä koskee sekä rakennusten ja perusrakenteen energiankäyttöä että alueellisia energiajärjestelmiä kuten kaukolämpöverkkoa ja sähköverkkoa.

- Teollisuuden energiatehokkuuden yhtymäkohdat yhdyskuntiin liittyvät muun muassa rakennusmateriaalien ja polttoaineiden tuotannon tehokkuuteen.
- Logistiikan energiatehokkuuden yhtymäkohdat yhdyskuntiin liittyvät myös rakennusmateriaalien ja polttoaineiden tuotannon logistiikan tehokkuuteen. Yhtymäkohtia on myös jätehuollon ja yhdyskuntien liikenteen osalta.

## 2.3 Energiatehokkuuden mittarit

### Mittareiden määrittelyn periaatteet

*Yhdyskuntien energiatehokkuus* mittaa *energiankäytön tehokkuutta* yhdyskuntien tuottamisessa (rakentamisessa) ja toiminnassa. *Energiankäytön tehokkuus* kuvaa kulutettua energiaa suhteutettuna saavutettuihin hyötyihin. Hyödyillä tarkoitetaan yhdyskuntien tapauksessa yksinkertaisimmillaan yhdyskunnan laajuutta, kapasiteettia tai palvelukykyä (kykyä "asuttaa" ihmisiä tai "tarjota tilallisia palveluja" ihmisille). Niitä kuvaavat laatuysiköt eli mittarit ovat useimmiten rakennusten yhteenlaskettu kerrosala tai tilavuus, joskus myös asukas- tai työpaikkaluku. *Yhdyskuntien tuottamiseen* sisältyvät yhdyskuntien fyysisten rakenneosien tarvitsemien rakennusmateriaalien hankinnasta alkaen kaikki rakenneosien (rakennusten ja perusrakenteen) valmistuksen ja rakentamispalvelujen tuottamisen jalostusketjut kuljetuksineen ja päättyen kaikkiin rakennustyömailla tapahtuviin prosesseihin ennen rakennusten ja rakenteiden käyttöönottoa. Näin määriteltynä osa yhdyskunnan tuottamisen energiasta kulutetaan väistämättä yhdyskunnan rajojen ulkopuolella, esimerkiksi siellä missä rakennusmateriaalit ja rakennusosat esivalmistetaan. *Yhdyskuntien toimintaan* sisältyvät tässä rakennusten ym. rakenteiden, niin sisä- kuin ulkotilojenkin käyttö ja ylläpito (ml. lämmitys, jäähdytys, valaistus, ilmanvaihto, verkostojen toiminnan ylläpito ja muiden sähkölaitteiden toiminta sekä tarvittavat kunnossapito- ja korjaustoimet) sekä yhdyskuntien toiminnan edellyttämä henkilö- ja tavaraliikenne (työ-, asiointi- ja vapaa-ajanmatkat sekä kuljetukset). Näin määriteltynä myös osa toiminnan edellyttämästä energiankulutuksesta tapahtuu yhdyskunnan rajojen ulkopuolella, esimerkiksi pitkämatkainen työmatka- ja vapaa-ajanliikenne. Edellä mainitut "toiminnan lajit" ovat luonteeltaan "teknisiä tai sekundaarisia toimintoja" suhteessa yhdyskuntien "varsinaisille tai primaarisille toimintoille", kuten asumiselle, tuotannolle, kaupankäynnille, sairaanhoidolle, opetukselle, liikuntaharrastuksille jne.

Energiankäytön tehokkuutta mitataan yhdyskunnissa yleensä em. teknisten toimintojen (kuten tilojen lämmityksen) osalta, koska niihin energiankäyttö on helpompi kohdistaa. Yhdyskunnan varsinaisten toimintojen osalta energiatehokkuuden mittaaminen on toistaiseksi harvinaista, mutta saattaisi kuitenkin olla hyvinkin perusteltua, koska silloin voitaisiin tarkastella luontevampia niitä toiminnallisia kokonaisuuksia, joita varten yhdyskuntarakenteita on rakennettu. Tällä tavalla saataisiin arvokasta tietoa esimerkiksi opetustoimen, sairaanhoidon tai vaikka joukkoliikennejärjestelmän energiatehokkuuksista ja ehkä löydettäisiin uusia ja energiatehokkaampia tapoja tuottaa ao. palve-

lukokonaisuuksia. Tehtävä on käytännössä melko työläs, koska laskenta edellyttää tietojen kokoamista ja yhdistämistä hyvin monesta lähteestä. Esimerkiksi opetustoimen tapauksessa mukaan olisi laskettava mm. kaikkien opetustoimen tarvitsemien sisä- ja ulkotilojen lämmitys-, valaistus- ja ilmanvaihtoenergiat sekä koulumatkojen ja -kuljetusten energiankulutus jne. ja jaettava lopuksi koko summa esimerkiksi yhtä oppilaspaikkaa kohti. Koko yhdyskunnan energiatehokkuus voitaisiin tällöin koostaa erillisistä asumisen, opetustoimen, terveydenhuollon, toimistotyön, vesihuollon, jätehuollon, liikenteen, järjestys- ja turvallisuuspalvelujen jne. energiatehokkuuksista.

Yhdyskuntien energiatehokkuuden mittareita tarvitaan useita. Valittava mittari riippuu siitä, miten laajaksi tai suppeaksi "yhdyskunnan energiajärjestelmä" halutaan rajata (ks. kohta taserajat) ja mitä tavoitteita tehokkuuden mittaamisella halutaan edistää - vähentää energiankulutusta sellaisenaan vai vähentää energiankäytön seurauksena syntyviä kasvihuonekaasupäästöjä. Energiajärjestelmän rajaus voidaan tehdä joko *alueellisesta* tai *systemirajauksen* näkökulmasta. Molemmista rajapinnat ovat enemmän tai vähemmän hämärää. Jos systemirajauksessa mukaan otetaan vain energiantuotanto- ja jakelujärjestelmä, käytetään tässä käsitettä "tekninen energiajärjestelmä", jos taas mukana ovat myös energian loppukäyttäjien kaikki mahdolliset kulutuskohteet (esimerkiksi rakennusten lämmitys ja ilmanvaihto ja kulkuvälineiden käyttö), käytetään tässä käsitettä "koko energiajärjestelmä". Molemmissa tapauksissa energiatehokkuutta voidaan mitata perinteisin fysikaalisin energiasuurein esimerkiksi kilowattitunteina (kWh) tai jouleina (J), tai esimerkiksi ilmastomuutoksen hillinnän kannalta tärkeinä kasvihuonekaasupäästöinä (CO<sub>2</sub>ekv-tonnia). Ensin mainittu mittari tähtää lähinnä teknisten järjestelmien energiatehokkuuden lisäämiseen, jolloin kiinnitetään huomiota järjestelmien hyötysuhteisiin ja hukkaenergioihin ja jätetään huomion ulkopuolelle se mihin energiaa käytetään. Jälkimmäinen mittari tähtää energiankäytössä syntyvien kasvihuonekaasujen synnyn vähentämisen tehokkuuteen.

Jos (1) halutaan mitata ja lisätä *yhdyskunnan teknisen energiajärjestelmän* eli *energiantuotanto- ja jakeluverkon* (esimerkiksi kaukolämpöjärjestelmän) tehokkuutta eli hyötysuhdetta, vertaillaan järjestelmästä ulos tulevan (hyöty)energian määrää sisään syötettävään (primääri)energian määrään. Tarkastelun laajuudesta ja syvyydestä ("systemin rajauksesta") riippuu, kuinka perusteellisesti mukaan lasketaan myös energiajärjestelmän (esimerkiksi kaukolämpölaitoksen ja lämmönjakeluverkon) rakentamisen edellyttämä energian käyttö tai käytettävän polttoaineen (esimerkiksi kivihiilen tai maakaasun) hankinnan, jalostuksen ja kuljetuksen aikana kuluva energia. Laajimmassa tarkastelussa sisään syötettävän energian määrä voidaan määrittellä järjestelmän edellyttämien energialähteiden primäärienergiana. Osa siitä voi olla aurinko-, tuuli- tai

muuta "ilmaisenergiaa". Mitä enemmän primäärienergiaa järjestelmä edellyttää suhteessa tuottamaansa hyötyenergiaan, sitä suurempi osa häviää prosesseissa hukkaenergiana järjestelmän ulkopuolelle (esimerkiksi tuotantolaitoksien ja verkostojen lämpö- tai sähköhäviöinä). Kaikissa yhdyskuntien energiajärjestelmissä on energiahäviöitä, josta syystä yhdyskunnan energiatuotanto- ja jakelujärjestelmien tekninen energiatehokkuus eli hyötysuhde on aina alle 100 %. Mitä parempi hyötysuhde, sitä vähemmän hukkaenergiaa. Yhdyskuntien kaukolämpöjärjestelmissä, joissa hyödynnetään sähkön-tuotannossa syntyntä jätelämpöä eli ns. CHP- (combined heat and power) laitoksissa järjestelmän hyötysuhde on parempi kuin jos lämmitykseen käytettäisiin sellaista suoraa sähköä, jossa sähkön tuotannon jätelämpö siirretään suoraan ympäristöön, kuten ilmaan tai yhdyskunnan läheisyydessä sijaitsevaan vesistöön. Teknisten energiajärjestelmien tehokkuus riippuu lähinnä niiden teknologisista ominaisuuksista, ei niinkään järjestelmien käyttäjien osaamisesta tai käyttötottumuksista.

Jos taas (2) halutaan mitata *yhdyskunnan koko energiajärjestelmän* tehokkuutta, on mukaan otettava tuotannon ja jakelun lisäksi *energiankulutuskohteet* ("loppukäyttäjän" tarvitsemissa paikoissa ja tilanteissa, kuten rakennusten lämmityksessä tai työmatkakuljetuksissa). Energiankäytön tehokkuus riippuu silloin paitsi käytettävien rakennusten, rakenteiden ja laitteiden (teknisistä) energiatehokkuuksista (kuten ulkovaippojen U-arvoista, ilmanvuotoluvuista, lämmön talteenotosta, auton mottoreiden polttoaineiden kulutuksesta jne.) niin myös käyttäjien osaamisesta, käyttötottumuksista, elämäntavoista jne. Yhdyskunnan eri käyttökohteissa voidaan energiankäytön tehokkuutta edelleen mitata teknisenä tai järjestelmäkohtaisena tehokkuutena. Esimerkiksi talon ulkoseinän tai ikkunan (lämpö)energiatehokkuus (lämmönläpäisykerroin eli U-arvo) mittaa talon sisätiloista seinämän läpi kulkevan energiavirran hyötysuhdetta: mitä pienempi osa lämpöenergiasta vuotaa rakenteen läpi, sitä energiatehokkaampi seinämä on. Käyttäjä voi tätä teknistä ja teoreettista energiatehokkuutta huonontaa huomattavastikin pitämällä sisätiloissa liian korkeaa sisälämpötilaa, jättämällä ovet tai ikkunat raolleen tai jättämällä esimerkiksi ikkunoiden tiivisteet huoltamatta. Liikennejärjestelmän energiatehokkuutta huonontaa tarpeeton yksityisajoneuvoilla ajelu, tyhjäkäynti tai vaikka epäonnistunut bussireittien tai aikataulujen suunnittelu. Koko yhdyskunnan energiajärjestelmän tehokkuus on teoriassa mitattavissa laskemalla yhteen kaikkien sen rakenneosien ja palvelujen energiatehokkuudet.

Energiaa voidaan kuluttaa ottamatta sitä varsinaisesta tuotanto- ja jakelujärjestelmästä, eli käyttämällä hyväksi ns. "ilmaisenergialähteitä" kuten aurinko- ja tuulienergiaa, maa-, vesi- ja ilmalämpöä tai ihmisten ja eläinten tuottamaa lämpöenergiaa. Ilmaisenergiaa on mm. rakennusten ikkunoista sisään tuleva auringon valo ja lämpö tai



painovoimaisen ilmanvaihdon hyödyntämät ilmanpaine-erot tai tuulienergia (ns. energian passiivista hyödyntämistä). Osa "ilmaisenergiasta" ei kuitenkaan synny ilmaiseksi, koska niiden käyttöönotto edellyttää teknisiä laitteita (esimerkiksi aurinkokeräimiä) tai biologisia prosesseja (esimerkiksi ruuan "polttamista" elimistössä), joiden valmistuksen ja käytön aikana on kulunut "tuotettua" energiaa. Nämä energiankäyttötavat kuitenkin hyödyntävät "ilmaisenergiälähteitä" ja niiden tarkoitus on alentaa muiden (esim. fossiilisten polttoaineiden) käyttötarvetta. Ilmaisenergian hyödyntämiseen perustuvissa energiajärjestelmissä yhdyskuntien käyttöä varten "tuotetun" energian määrän pitäisi elinkaaritarkasteluissa olla suurempi kuin järjestelmään sisään (aktiivisesti) syötetyn energian määrä. Muussa tapauksessa järjestelmä olisi energiataloudellisesti hyödytön (ja sen energiatehokkuus nolla) - vaikka ehkä kokeellisena, tieteellisenä tai vaikkapa esteettisenä demonstraatiokohteena perusteltu. Innovatiiviseen uuteen teknologiaan perustuvan yhdyskuntaenergiajärjestelmän (kuten täysin itsერიitöisen aurinkoenergiakaupungin) rakentaminen saattaa viedä enemmän energiaa kuin se koskaan pystyy tuottamaan, mutta tuotantoteknologian kehittyessä tilanne saattaa massatuotantovaiheessa muuttua myös energiataloudellisesti perustelluksi. Itse käyttämänsä energian kompensoimisen lisäksi järjestelmän pitäisi elinkaarensa aikana tuottaa riittävästi järjestelmästä ulosotettavaa ns. hyötyenergiaa. Hyötyenergian määrä pitäisi olla niin suuri, että se kattaa merkittävän osan yhdyskunnan energiatarpeesta, jolloin ei tarvita muita energialähteitä kuin väliaikaisesti. Silloinkin lisäenergia voidaan tuottaa kevyillä ja kustannuksiltaan pienillä, täydentävillä energiajärjestelmillä (esimerkiksi suoralla sähkölämmöllä). Varajärjestelmiä tarvitaan energiantuotannon turvaamiseksi kriisitilanteissa ja muidenkin riskien pienentämiseksi. Jos tarvittava varajärjestelmä on raskas (esimerkiksi vesikiertöisen lämmitysjärjestelmän rakentaminen), saattaa koko energiajärjestelmä muuttua liian kalliiksi, ja alkuperäinen ajatus ilmaisenergiajärjestelmän rakentamisesta kannattamattomaksi.

*Matalaenergiataloissa* kulutetaan nykyisten määritelmien mukaan merkittävästi vähemmän energiaa kuin nykyisten (2010) rakennusmääräysten mukaisissa "normaalitaloissa". Energiankulutusta on vähennetty useimmiten hyvillä lämmöneristyksillä, pienillä ilmanvuodoilla ja lämmöntalteenotoilla sekä ilmanvaihdesta että viemäriverdestä. Säästötoimenpiteiden jälkeenkin kuitenkin tarvitaan energiaa mm. rakennusten sähkölaitteisiin ja se voidaan tuottaa osittain tai kokonaan ilmaisenergiälähteistä. *Nollaenergiataloissa* kulutus on pudotettu vielä tehokkaammilla säästötoimilla niin alas, ettei ulkopuolista (yhdyskuntatasoista) energiaa enää tarvita. Nettoenergiantarve on nolla ja energiatase voidaan laskea joko vuositasolla tai jatkuvana (jokahetkisenä). Mikäli energiantarve lasketaan vuosikulutuksen mukaan, nollaenergiatason saavuttamiseen riittää se, että lämpimänä ja aurinkoisena vuodenaikana syntyy energiaylijäämää, joka kom-

pensoi kylmän vuodenajan aikana syntyvän alijäämän. Tällöin tarvitaan joko energia-varastoja tai kytkentä alue- tai yhdyskuntatasoiseen energiajärjestelmään, jonka piirissä voidaan käydä energiakauppaa tai harrastaa luontaistalouden tapaan energiavaihtoa, ilman rahaa. Mikäli nettoenergiatarpeessa halutaan saavuttaa nollassa joka hetki, täytyy nollassaenergiatalojen energiajärjestelmät suunnitella ja mitoittaa niin, että ne toimivat myös paikkakunnan kylmimpinä ja tyyntimpinä mahdollisina pakkaspäivinä. Silloin taas kaikkina muina aikoina syntyy väistämättä energiaylijäämää, joka voidaan joko myydä verkkoon tai varastoida myöhempää käyttöä varten. Tällöin kysymyksessä on ns. *plusenergiatalo*, joka tuottaa enemmän energiaa kuin kuluttaa. Vastaavasti voidaan määritellä *matalaenergia-*, *nollassaenergia-* ja *plusenergiayhdyskunta*, joista viimeisin tuottaa elinkaarensa aikana enemmän energiaa kuin kuluttaa. Ylimääräinen energia voidaan joko viedä naapuriyhdyskuntiin tai varastoida tuleviin omin tarpeisiin. Energiavarastot voivat olla keskitettyjä yhdyskuntatasoisia tai hajautettuja talo-, kortteli- tai osa-aluekohtaisia. Jos plusenergiayhdyskunnassa tuotettu energia on merkittävältä osaltaan esimerkiksi aurinko- ja tuulienergiaa, sillä voidaan kompensoida koko järjestelmän tuottamisen ja käytön aikana kulunut "tuotettu" energia, jolloin yhdyskunta on energiataloudellisesti omavarainen. Yhdyskunnan "teknisen energiajärjestelmän" energiahyötysuhde on tuotetun energian osalta yli 100 %, koska järjestelmästä otetaan ulos enemmän energiaa kuin siihen on tuotettu.

Mikäli rakennus tuottaa kaiken tarvitsemansa energian itse, se voi toimia täysin *omavaraisesti* ja kokonaan irti yhdyskuntatasoisista energiajärjestelmistä (off the grid). Omavaraisuus ei tarkoita välttämättä energian tuottamista ilmaisenergialähteillä (esimerkiksi aurinko-, tuuli- ja maalämmöllä), vaan se voi tarkoittaa energian tuottamista myös muilla uusiutuvilla energialähteillä (kuten hakkeella tai muulla bioenergialla, esimerkiksi perinteisellä pienpuun poltolla lämmitysuuneissa), tai yhtä hyvin perinteisiä fossiilisten polttoaineiden energiajärjestelmillä (esimerkiksi talokohtaisella öljylämmityskattilalla). Bioenergian tarvitsema biomassa voidaan tuottaa kokonaan yhdyskunnan "omalla alueella" eli lähiympäristön metsissä, pelloilla tai vaikkapa vesialueilla, jolloin järjestelmä on aidosti omavarainen. Samalla yhdyskunnan hiilijälki voi myös olla nolla, jos yhdyskunnan polttama biomassa uusiutuu samaa vauhtia kuin sitä käytetään omalla alueella.

Teknisistä ratkaisuista ja paikallisista olosuhteista riippuen energiavarastot voivat olla rakennus-, kortteli- tai aluekohtaisia. Lämpöenergiaa voidaan varastoida maaperään, se voidaan muuttaa potentiaalienergiaksi pumpaamalla vettä ylävesisäiliöihin, tai kemialliseksi energiaksi akkuihin tai tuotettaviin polttoaineisiin (kuten vetyyn) jne. Akkuteknologiasta riippuen sähkön varastoinnin tehokkuus-, hinta-, tilantarve ja muut omi-

naisuudet vaihtelevat huomattavasti. Mikäli ylimääräistä energiaa ei voida tai haluta varastoida, se voidaan myydä järjestelmän ulkopuolelle, esimerkiksi yleiseen sähköverkkoon. Jos sähkön tai lämmön myynti verkossa on teknisesti mahdollista, se on organisoitu ja sen voi tehdä korvausta vastaan (ns. syöttötariffin mukaan), voidaan vastaava määrä ostaa verkosta silloin kun ylituotantoa on muualla järjestelmän piirissä. Tällöin paikallinen energiavarasto on ikään kuin virtuaalisena verkkovarastona ja paikallinen energiaomavaraisuus voidaan saavuttaa pitemmän ajanjakson kuluessa alueiden välisen energiavaihdon kautta.

Laajasti määritellyn yhdyskunnan energiatehokkuuden tulisi energiankäytön puolelta sisältää paitsi yhdyskunnan tuotantovaiheen kaikkien jalostusprosessien aikana kuluttettu energia eli kertynyt "negatiivinen energiaselkäreppu" (perinteisen elinkaarinäkökulman mukainen primäärienergia) niin tulevaisuudessa yhä useammin myös energiavarastoihin sijoitettu kuluttamaton eli potentiaalinen "positiivinen energiaselkäreppu". Mitä pienempi negatiivinen energiaselkäreppu ja mitä suurempi positiivinen energiaselkäreppu, sitä parempi energiatehokkuus. Energiatehokkuutta voidaan näin ollen mitata positiivisen ja negatiivisen energiaselkäreppun erotuksen eli "nettoenergiaselkäreppun" koon mukaan: mitä suurempi varasto suhteessa kulutettuun energiaan, sitä tehokkaampi järjestelmä. Energiatehokkuutta parantaa se kuinka paljon järjestelmä kykenee varastoimaan tuottamaansa energiaa yli sen hetkisen tarpeen ja mahdollista tulevaa käyttöä varten. Jos tuotettu energia on suurempi kuin käytetty energia eli nettoenergiaselkäreppu on positiivinen, on järjestelmän energiatehokkuus yli 100 % <sup>1</sup>. Koska energiaa ei voi luoda tyhjästä, täytyy järjestelmään tulla energiaa energiantuotantojärjestelmän ulkopuolelta ilman että sitä ihmisen toimesta varsinaisesti tuotetaan. Tämä ns. ilmaisenergia on useimmiten auringon säteilylämpöä, maahan, veteen tai ilmaan varastoitunutta lämpöenergiaa (myös ns. geotermistä energiaa), tuuli- tai aaltoenergiaa. Mitä suurempi osuus yhdyskuntien energiajärjestelmään tuotavasta energiasta on ilmaisenergiaa, sitä vähemmän tarvitaan polttoaineiden käyttöä ja sitä paremmaksi muodostuu järjestelmän energiatehokkuus ja sitä pienemmäksi päästöt ja ilmastovaikutus.

---

<sup>1</sup> Tässä on kuitenkin kyseessä sellainen suppea energiatehokkuuden määritelmä, jossa ilmaisenergian lähteitä ei lasketa mukaan järjestelmään syötetyksi energiaksi. Periaatteessa ilmaisenergianlähteet voidaan ottaa mukaan energiatehokkuuden laskentaan myös syöttöpuolelta, jolloin ne voidaan määrittellä samansuuruisiksi kuin niistä saatu hyötyenergia. Tällöin energiatehokkuus ei koskaan voi olla yli 100 %.

Energiatehokkuutta on mitattava niin pitkälle kuin mahdollista elinkaariperiaatteella eli ottaen huomioon sekä valmiisiin yhdyskunnan *rakenteisiin sitoutunut* ("mennyt") että niiden *käytöstä johtuva* ("tuleva") energiankäyttö. Esimerkiksi rakennusmateriaalien elinkaareen kuuluu koko jalostusketju alkaen raaka-aineiden hankkimisesta päätyen rakennustyömaalle kuljetukseen. Samoin kaikessa yhdyskuntien energiankäytössä on otettava huomioon myös käytettyjen polttoaineiden tuotannon ja kuljetusten aikana kulutettu energia. Mennyttä energiaa on arvioitava tapauskohtaisesti koko jalostusketjun pituuden mukaiselta ajanjaksolta. Tulevaa energiankäyttöä mitataan yleensä rakenteiden todennäköisen toiminnallisen tai teknisen käyttöiän pituiselta ajanjaksolta, joka yleisimmin on noin 50 vuotta. Käytännössä yhdyskuntien elinkaari on huomattavastikin pidempi - ja tiettyjen, esim. luonnonkivisten rakennusten ja rakenneosien sekä toiminnallisten rakenteiden (kuten liikenneverkon sijainnin) osalta jopa satoja vuosia. Yhdyskunnat rakentuvat pitkien aikojen kuluessa ja ovat jatkuvassa muutoksen tilassa. Rakennuksia ym. rakenteita tuotetaan lisää, vanhoja korjataan ja puretaan. *Olevien yhdyskuntien* energiatehokkuus onkin tästä syystä tiettyihin laskentaoletuksiin perustuva teoreettinen yleistys eli kuvitelma tilanteesta, jossa nykyisenkaltainen yhdyskunta rakennettaisiin nykymenetelmin ja käytettäisiin todennäköisen elinkaarensa mukaisen ajan nykyisen kaltaisilla käyttötavoilla. *Suunnittelun kohteena olevien uusien yhdyskuntien* (tai niiden osien) energiatehokkuutta arvioitaessa lähtötietoina ovat suunnitelmien mukaiset fyysiset rakenteet, niiden käyttötarkoitukset ja todennäköiset käyttöajat.

Energiatehokkuuden mittaamisen motiivina on löytää ratkaisuja, joilla voidaan vähentää tai kokonaan välttää energiankäytöstä aiheutuvat haitalliset vaikutukset kuten uusiutumattomien energialähteiden liiallinen kulutus (ja tätä kautta tulevien energiankäyttömahdollisuuksien kaventuminen) tai elinmahdollisuuksia haitallisesti rajoittavat ilmastomuutokset. Kaikki energiankäyttö ei kuitenkaan aiheuta em. haittoja. Yhdyskunnissa käytetään runsaasti myös ns. ilmaisenergiaa kuten aurinko- ja tuulienergiaa, maa-, vesi- ja ilmalämpöä tai ihmisten ja eläinten tuottamaa lämpöenergiaa. Yhdyskuntien energiatehokkuutta on syytä mitata ensisijaisesti sellaisen energiankäytön osalta, jonka tuottamiseen tarvitaan uusiutumattomia energialähteitä tai jotka aiheuttavat muita edellä kuvattuja haittoja. Aurinko- ja tuulienergiaa on tarjolla paljon enemmän kuin mitä niitä voidaan hyödyntää eikä niiden säästämiseen ole tarvetta. Sellaista energiatehokkuuden lisäämistarvetta ei ole, jossa tavoitteena on esimerkiksi aurinko- tai tuulienergian säästäminen. *Yhdyskunnassa, joka perustuu kokonaan omavaraiseen uusiutuvien energialähteiden käyttöön, ei ole edes energiatehokkuuden mittaamistarvetta.*

## Yhdyskuntien mittarit

Yhdyskuntien energiatehokkuuden tavoitteellisia lähtökohtia kuvaava edellä esitettyä *tarkempi määritelmä* on yhdyskuntien (tuottamisen, käytön ja liikenteen) uusiutumattomien energialähteiden käytön määrä suhteessa yhdyskunnan laajuutta tai palvelukykyä kuvaaviin yksikkömääriin (kuten rakennusten kerrosalaan tai tilavuuteen, asukas- tai työpaikkalukuun). Ilman tätä tarkennusta energiatehokkuus voisi antaa väärän kuvan siitä, mitä ollaan tavoittelemassa tai mihin suuntaan ollaan menossa. Energiaa saa kulua entistä enemmän, jos se on tuotettu yhä enemmän uusiutuvilla energialähteillä jolloin uusiutumattomien energialähteiden energiatehokkuus paranee. Jos energiatehokkuuden tavoitteena on "vain" ilmastonmuutoksen torjuminen, voidaan mittarina käyttää myös energiankäytöstä aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen suhteellista määrää. Jos mukaan halutaan ottaa myös muut energiankäytön haitalliset vaikutukset (kuten terveydelle haitalliset päästöt, jätteet, onnettomuus- ja muut riskit, ympäristön likaantuminen jne.), on energiatehokkuutta syytä mitata kaikkien niiden energialähteiden osalta, joille em. vaikutuksia on havaittu olevan.

Tiivistettynä määritelmänä ja edellä kuvattujen mahdollisten määritelmien yhdistelmänä:

Yhdyskunnan tai yhdyskuntarakenteen energiatehokkuutta voidaan tarkastella kahdella tavalla (toistensa käänteislukuina):

(1) "Yhdyskuntarakenteen energiatehokkuus on yhdyskunnan rakentamisen, käytön ja yhdyskunnan synnyttämän liikenteen aiheuttama (uusiutumattoman)<sup>2</sup> energian kulutus ja päästöt suhteessa yhdyskunnan tuottamiin palveluihin, kuten sen tarjoamaan asukas- ja työpaikkalukuun tai kerrosneliömetreihin."

TAI:

(2) "Yhdyskuntarakenteen energiatehokkuus on yhdyskunnan tuottamat palvelut, tuotteet ja muu elämän laatu suhteessa niiden tuottamisen ja käyttämisen sekä liikenteen aikana kulutettuihin (uusiutumattomiin) energialähteisiin sekä tuotettuihin päästöihin."

Määritelmää 1 voidaan pitää ensisijaisena ja perinteisenä energiatehokkuuden mittarina. Sen mukaan energiatehokkuus kasvaa kun suhdeluku pienenee. Konkreettisina mittareina voidaan tällöin käyttää seuraavia suhdelukuja:

- kWh, MJ/kerros-m<sup>2</sup>
- kWh, MJ/asukas
- kWh, MJ/työpaikka
- CO<sub>2</sub>-ekv.t/kerros-m<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Tarkennus "uusiutumattomiin" energialähteisiin siksi, että uusiutuvista energialähteistä ei ole pulaa eikä niiden käyttöä ole välttämättä järkevää säästää. Silti niidenkin käytön suhteen voidaan tehokkuutta lisätä, koska samalla kuluu yleensä myös uusiutumattomia energialähteitä, kuten aurinkopaneelien tai tuuligeneraattoreiden valmistuksessa. Uusiutuvia lähteitä voidaan hyödyntää rakenteissa esim. sitouttamalla niihin auringon säteilylämpöä passiivisesti.

- CO<sub>2</sub>-ekv.t/asukas
- CO<sub>2</sub>-ekv.t/työpaikka

Kerrosneliömetrin käyttöä verrattuna asunto-m<sup>2</sup>:n tai hyöty-m<sup>2</sup>:n tai rakennustilavuuden m<sup>3</sup> käyttöön voidaan pitää perusteluna monesta syystä:

- kerros-m<sup>2</sup> on kaavoituksen työkaluista tärkeimpiä
- rakennusoikeus<sup>3</sup> määrittää kerros-m<sup>2</sup>:inä
- kerros-m<sup>2</sup> kuvaa konkreettista, fyysistä rakennetta tarkemmin kuin muut (käytettävissä olevaa sisätilaa kalustettavana ja liikuttavana lattiapinta-alana mitaten)
- rakennuttajat ja rakentajat tuntevat käsitteen (kuten myös asunto- ja hyöty-m<sup>2</sup>:n)
- asunto- ja hyöty-m<sup>2</sup> mittaavat paremmin sitä tilaa mitä varsinaisesti tuotetaan (fyysistä sisätilaa), mutta johtaa esim. sivutilojen (porrashuoneiden yms.) ei-toivottavaan minimointiin
- rakennus-m<sup>3</sup> kuvaa parhaiten lämmitettävää/jäähdytettävää sisätilaa
- kaikki sisätilaa mittavat suureet jättävät ulkorakenteet (parvekkeet, kuistit, ulkovajat ym. piharakennukset) mittauksen ulkopuolelle.

Matemaattisina kaavoina yhdyskuntien energiatehokkuus voidaan vastaavasti esittää useammalla vaihtoehtoisella tavalla.

Yhdyskuntien energiatehokkuus (rakennukset, perusrakenne, liikenne), aikayksikköä (vuotta) kohden esitettynä:

---

<sup>3</sup> Huom! ”rakennusoikeuden” määritelmä ja mittaus ulkovaipan/lämmöneristeen sisäpinnasta ohjaisi ulkoseinien paksuuden minimointiin ilman energiadirektiiviä; samoin rakennustilavuus m<sup>3</sup> johtaa kerroskorkeuden minimointiin ilman huonekorkeuden minimimääräyksiä

|        |  |  |
|--------|--|--|
| (1)    | $ET_{yastp} = \frac{kWh_{tuotanto} + kWh_{käyttö} + kWh_{liikenne}}{as + tp, a}$   | <b>SUPPEA NÄKÖKULMA</b><br>energiätehokkuus<br>2 vaihtoehtoa |
| (2)    | $ET_{ykm} = \frac{kWh_{tuotanto} + kWh_{käyttö} + kWh_{liikenne}}{k-m^2, a}$   |  |
| (3)    | $PT_{yastp} = \frac{CO_2 \text{ ekv } t_{tuotanto} + CO_2 \text{ ekv } t_{käyttö} + CO_2 \text{ ekv } t_{liikenne}}{as + tp, a}$ | <b>päästötehokkuus</b><br>2 vaihtoehtoa                      |
| (4)    | $PT_{yastp} = \frac{CO_2 \text{ ekv } t_{tuotanto} + CO_2 \text{ ekv } t_{käyttö} + CO_2 \text{ ekv } t_{liikenne}}{k-m^2, a}$   |  |
| (5, 6) | $EPT_y = \frac{\text{Palvelut, tuotteet, elämän laatu}}{kWh, CO_2 \text{ ekv } t, a}$  | <b>LAAJA NÄKÖKULMA</b><br>(energia- ja päästötehokkuus)      |

Yhdyskuntien energiatehokkuus (rakennukset, perusrakenne, liikenne), koko elinkaarren (esim. 50 vuotta) ajalta esitettynä:

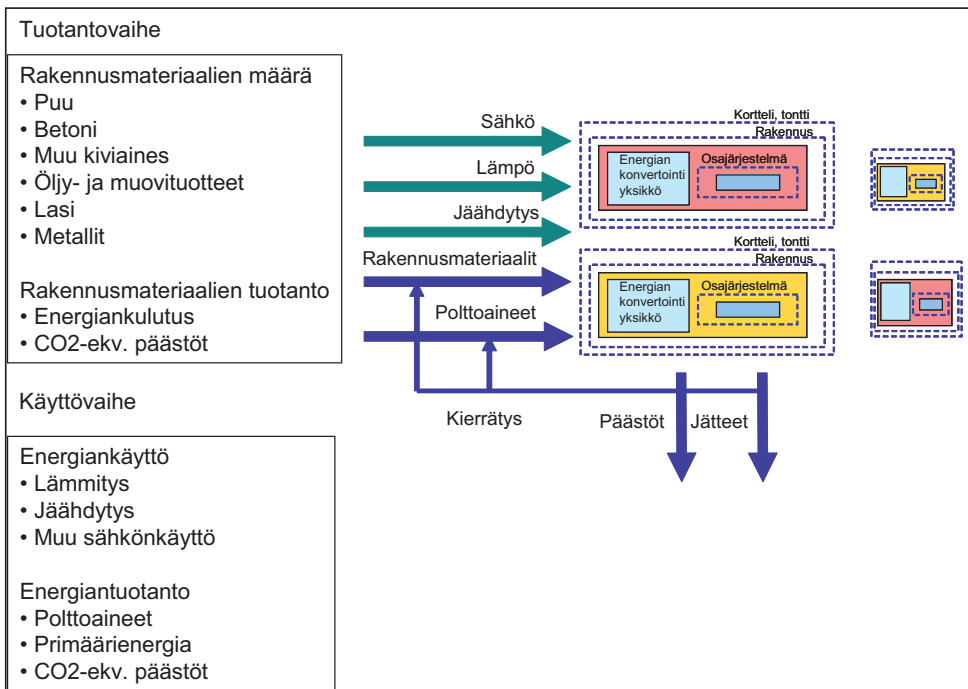
|        |   |  |
|--------|---|--|
| (1)    | $ET_{yastp} = \frac{kWh_{tuotanto} + kWh_{käyttö} + kWh_{liikenne}}{as + tp}$   | <b>SUPPEA NÄKÖKULMA</b><br>energiätehokkuus<br>2 vaihtoehtoa |
| (2)    | $ET_{ykm} = \frac{kWh_{tuotanto} + kWh_{käyttö} + kWh_{liikenne}}{k-m^2}$   |  |
| (3)    | $PT_{yastp} = \frac{CO_2 \text{ ekv } t_{tuotanto} + CO_2 \text{ ekv } t_{käyttö} + CO_2 \text{ ekv } t_{liikenne}}{as + tp}$ | <b>päästötehokkuus</b><br>2 vaihtoehtoa                      |
| (4)    | $PT_{yastp} = \frac{CO_2 \text{ ekv } t_{tuotanto} + CO_2 \text{ ekv } t_{käyttö} + CO_2 \text{ ekv } t_{liikenne}}{k-m^2}$   |  |
| (5, 6) | $EPT_y = \frac{\text{Palvelut, tuotteet, elämän laatu}}{kWh, CO_2 \text{ ekv } t}$  | <b>LAAJA NÄKÖKULMA</b><br>(energia- ja päästötehokkuus)      |



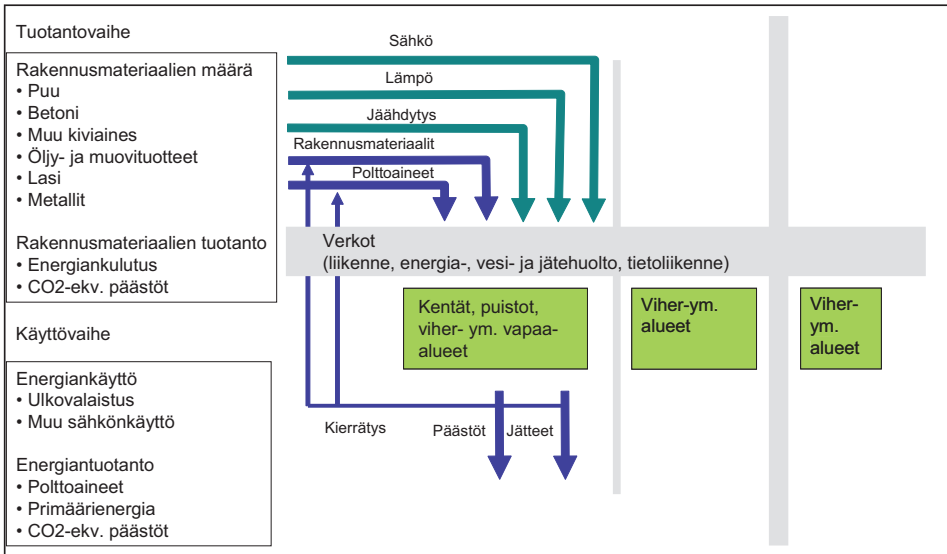
## Mittarit ja elinkaari

Yhdyskuntien energiatehokkuuden mittaamisessa on keskeisenä näkökulmana eri tekijöiden koko elinkaaren aikaisen, kaikki vaiheet sisältävän tehokkuuden huomioon ottaminen. Yhdyskuntien energiatehokkuuden tarkastelussa elinkaaren vaiheet koostuvat rakenteiden (rakennusten ja perusrakenteen) *tuottamisesta* eli niihin sisältyviin materiaaleihin sitoutuneesta energiankäytöstä, rakenteiden *käytöstä* johtuvasta energiankäytöstä ja lisäksi yhdyskunnan toimintojen edellyttämän *liikenteen* energiankäytöstä.

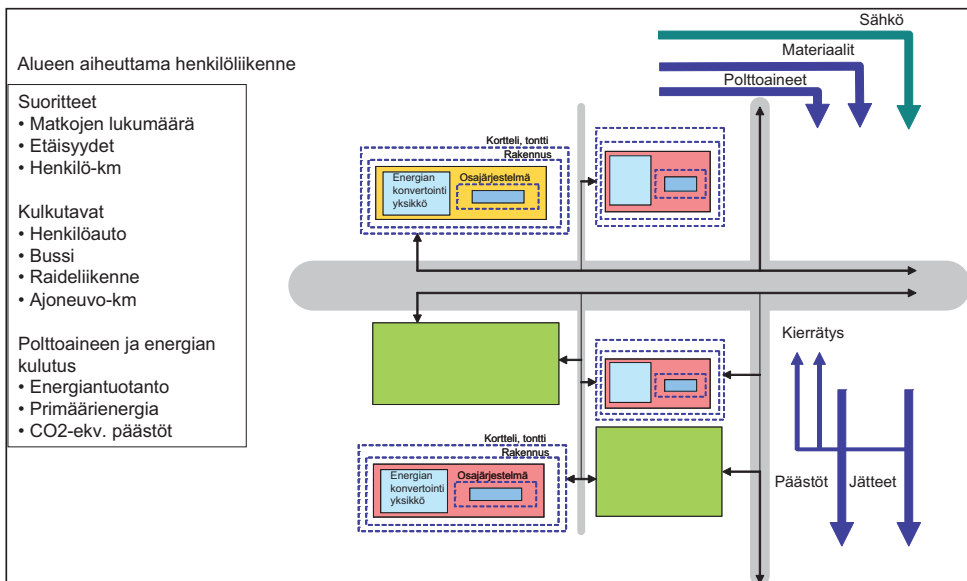
Yhdyskuntien energiatehokkuuden mittaamisessa elinkaarinäkökulma tulee esiin osatekijöiden kautta: rakennukset, verkostot ja muut rakenteet sekä liikenne. Kuvissa 2.5-2.7 esitetään kaavioita elinkaaritarkastelujen rakenteesta.



Kuva 2.5. Yhdyskuntien energiatehokkuus - rakennusten elinkaaritarkastelu.



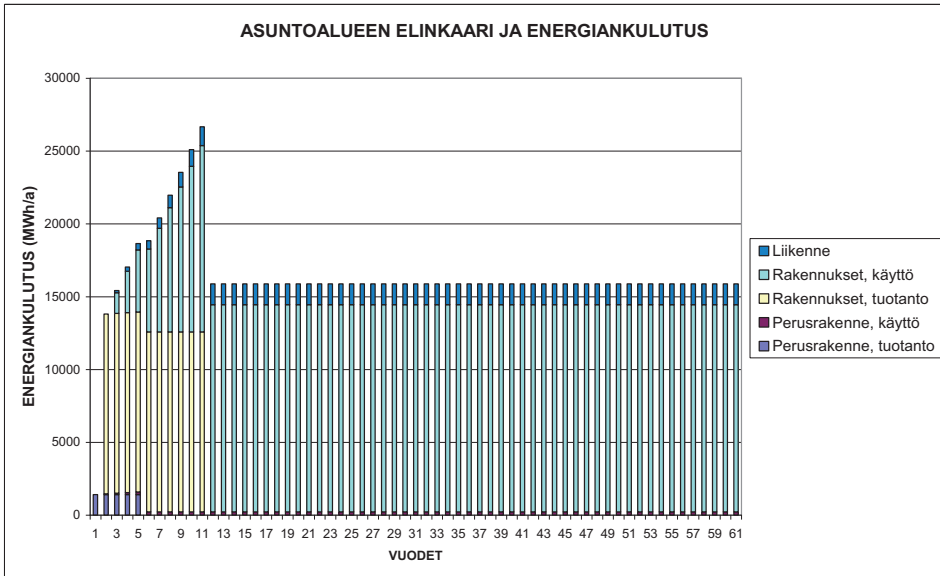
Kuva 2.6. Yhdyskuntien energiatehokkuus – perusrakenteen elinkaaritarkastelu.



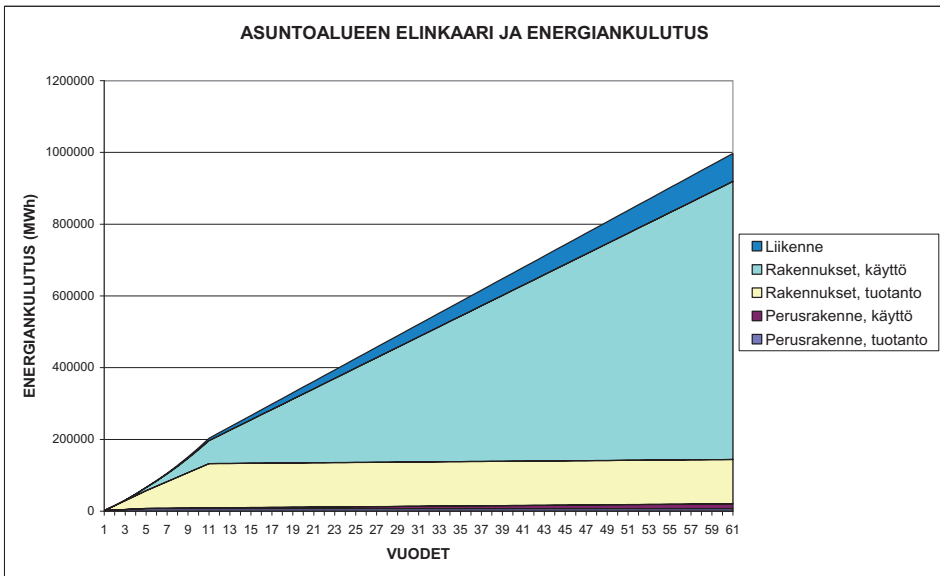
Kuva 2.7. Yhdyskuntien energiatehokkuus – liikenteen elinkaaritarkastelu.

Yhdyskuntien energiatehokkuuden case-tarkasteluiden perusteella yhdyskuntarakenteen tuotantovaiheen eli rakennusten ja verkostojen sisältämien materiaalien tuotannon (kaikkine vaiheineen raaka-aineiden otosta jalostuksineen ja kuljetuksineen rakentamiseen asti) edellyttämä energia muodostaa yleensä alle 10 % alueen koko energiankulutuksesta. Suurin merkitys on käyttövaiheella, jossa rakennusten lämmitys, jäähdytys ja sähkön käyttö muodostaa pääosan. Alueen sijainnista ja liikenteellisistä olosuhteista riippuen liikenne voi nousta erittäin merkitykselliseksi, ja siitä aiheutuvat suurimmat erot alueiden välillä.

Kuvissa 2.8 ja 2.9 tarkastellaan esimerkinomaisesti asuntoalueen energiankulutuksen jakautumista rakenteiden eri vaiheisiin ja liikenteeseen. Kuvassa 2.9 esitetään vuotuisen energiankulutus ja kuvassa 2.9 energiankulutuksen kumulatiivinen kehitys.

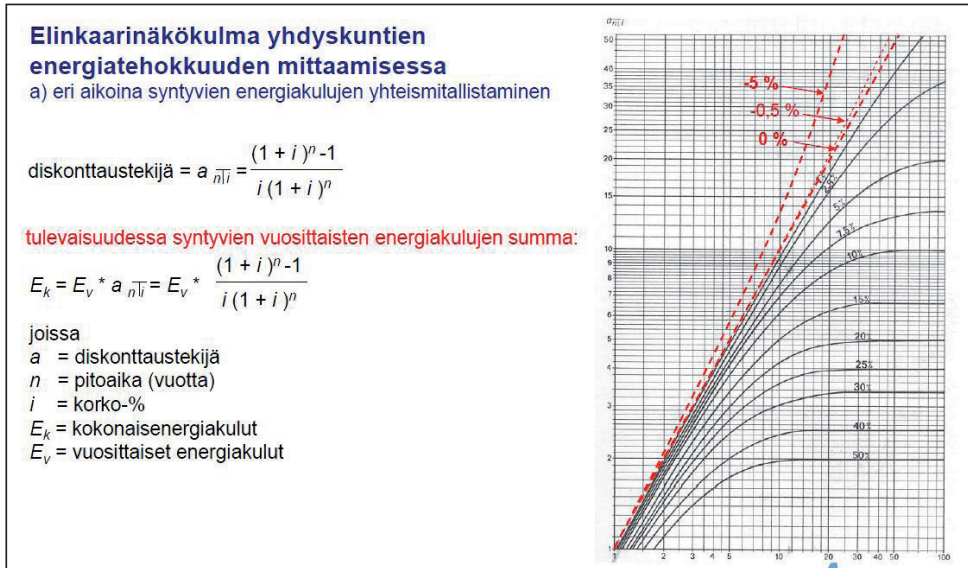


Kuva 2.8. Esimerkkikaavio asuntoalueen vuotuisesta energiankulutuksesta.



Kuva 2.9. Esimerkkikaavio asuntoalueen energiankulutuksen kumulatiivisesta kehityksestä.

Kuvassa 2.10 tarkastellaan elinkaarinäkökulmaa yhdyskuntien energiatehokkuuden mittaamisessa eri aikoina syntyvien energiakulujen yhteismitallistamisen ja laskemisen kautta.



Kuva 2.10. Elinkaarinäkökulma yhdyskuntien energiatehokkuuden mittaamisessa.

## Energian arvo mittaamisessa

Energian arvo tulee myös ottaa huomioon energiatehokkuutta mitattaessa. Eriarvoista energiaa ei voi laskea yhteen. Jos näin tehdään, myöhemmin ei ole mahdollista purkaa arviointia osatekijöihin. Asiaa on käsitelty aiemmissa kappaleissa.

## Käyttöasteen merkitys

Yhdyskuntien energiatehokkuuden mittaamisessa käyttöasteen merkitys tulee esiin erityisesti rakennusten osalta. Tätä problematiikkaa on käsitelty yksityiskohtaisesti rakennusten energiatehokkuutta koskevassa osahankkeessa. Yhdyskuntien osalta keskeinen käyttöasteeseen liittyvä asia on perusrakenteen hyödyntäminen. Suunniteltujen alueiden keskeneräiseksi jättämisellä voi olla merkittävä vaikutus energiatehokkuuteen. Yhdyskuntarakenteen eheyttäminen, täydennysrakentaminen ja tiivistäminen edistävät perusrakenteen käyttöasteen lisäämistä ja siten energiatehokkuuden parantamista.

## 2.4 Potentiaalilaskennan periaatteet

### Yhdyskuntien energiatehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä

Yhdyskunnan energiatehokkuuteen voidaan vaikuttaa *yhdyskuntarakenteellisilla* valinnoilla eli niillä tavoilla, joilla *rakennukset* ja *perusrakenne* on liitetty toisiinsa alueellisesti. Perusrakenteisiin sisältyvät liikenteen, energia-, vesi- ja jätehuollon sekä tietoliikenteen verkot laitoksineen ja laitteineen. Yhdyskuntarakenteen perusominaisuuksia ovat mm. aluetehokkuus, asukastiheys, korttelirakenne ja verkostotiheys, palvelujen yksikkökoko- ja sijaintivalinnat, joukkoliikennejärjestelmät, teknisen huollon verkostorakenteet, korttelimuodot, kiinteistö- ja tonttijako, talotyyppit, asema- ja muilla kaavoilla ja niihin liittyvillä rakentamistapaohjeilla, tontinluovutussopimuksilla ym. järjestelyillä säädettävät seikat kuten rakennusten sijainnit tonteilla, räystäskorkeudet, katto- muodot jne. Monilla näistä yhdyskuntasuunnittelun ohjauskeinoilla voi olla merkittäväkin vaikutus yhdyskunnan energiatehokkuuteen.

Energiatehokkuudeltaan edullisimmat yhdyskuntarakennemallit perustuvat kävelyyn, pyöräilyyn ja tehokkaaseen joukkoliikenteeseen, erityisesti raideliikenteeseen, ja asutuksen sijoittumiseen taajamiin ja kyliin sekä suhteelliseen tehokkaaseen rakentamiseen, kun vähemmän edullisissa malleissa asutus painottuu väljään rakenteeseen, haja-asutukseen ja liikenne henkilöauton käyttöön.

Yhdyskuntien energiatehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat mm.:

- Sijaintivalinnat, etäisyydet
- Yhdyskuntarakenteen hajautuminen - eheytyminen
- Rakentamistehokkuus (aluetehokkuus, tonttitehokkuus)  $k\text{-m}^2/\text{maa-m}^2$
- Verkstorakenne (liikenneverkko, vesihuolto, energia, tietoliikenne)
- Verkstojen laajuus  $m/k\text{-m}^2$ ,  $m^2/k\text{-m}^2$
- Asumisväljyys  $k\text{-m}^2/\text{asukas}$ , työpaikkaväljyys  $k\text{-m}^2/\text{työpaikka}$
- Talotyyppit
- Pienilmaston, passiivisen aurinkoenergian hyödyntämiseen
- Lämmitystavat (mm. kaukolämmön hyödyntämisedellytykset)
- Energiantuotantotavat (mm. paikalliset energialähteet)
- Laitteet
- Kulutustottumukset

- Liikennejärjestelmä
- Kulikutapamahdollisuudet, valinnat
  - Kävelyn, pyöräilyn ja joukkoliikenteen edellytykset

## Potentiaalilaskentakokeilu

Yhdyskuntien energiatehokkuuden potentiaalien laskentamenetelmän pohjaksi laadittiin koelaskelmia. Asuntoalueen ("lähiympäristö", asemakaavataso) energiatehokkuus ja energiansäästöpotentiaali arvioitiin seuraavasti (suluissa kytkennät muihin osaluueisiin):

### 1. Rakennuksiin sitoutunut energia

- Rakennusten materiaalmäärät (EPO-R)
- Rakennusmateriaalien tuotannon potentiaali (EPO-T, EPO-E, EPO-L)

### 2. Rakennusten käytön aikainen energiankulutus

- Lämmitysenergian potentiaali (EPO-R, EPO-E)
- Sähkönkäytön potentiaali (EPO-R, EPO-E)
- Lämpimän veden potentiaali (EPO-R)

### 3. Perusrakenteeseen sitoutunut energia

- Alueen rakenne – verkostojen määrä – materiaalmäärät
- Rakennusmateriaalien tuotannon potentiaali (EPO-T, EPO-E, EPO-L)

### 4. Perusrakenteen käytön aikainen energia

- Ulkovalaistus (EPO-E)
- Siirtohäviöt (voidaan yhdistää myös rakennuksiin tai ottaa huomioon primäärienergielaskennassa; EPO-E)
- Järjestelmien sähkönkäyttö

### 5. Liikenteen energiankulutus

Asuntoaluetason energiatehokkuuden potentiaalien arvioinnissa käytettiin seuraavia oletuksia eri osien potentiaaleille:

1. Rakennuksiin sitoutunut energia

- Materiaalien tuotantoenergian säästöpotentiaali keskimäärin 20 %

2. Perusrakenteeseen sitoutunut energia

- Verkostojen määrän vähennyspotentiaali 50 %, materiaalien tuotantoenergian säästöpotentiaali keskimäärin 20 %

3. Rakennusten käytön energia

- Energiansäästöpotentiaali keskimäärin 60 %

4. Perusrakenteen käytön energia

- Energiansäästöpotentiaali keskimäärin 60 %

5. Liikenteen (primääri)energia

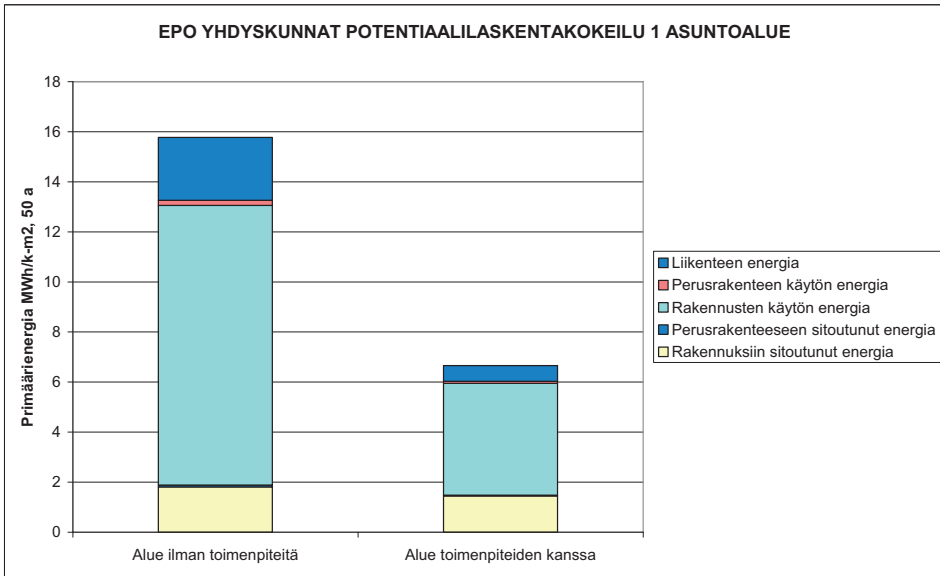
- Liikennetarpeen vähentämispotentiaali 50 %, kulutapajakauman muutoksen + ajoneuvoteknologian energiansäästöpotentiaali 50 %

Oletukset on laadittu niin, että valtioneuvoston vuodelle 2050 asettamat tavoitteet (Valtioneuvoston tulevaisuusselonteko ilmasto- ja energiapolitiikasta 2009, Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia 2008) voitaisiin saavuttaa. Oletuksia laadittaessa on hyödynnetty mm. valtioneuvoston ilmasto- ja energiapolitiittisen tulevaisuusselonteen ja ilmasto- ja energiastrategian sekä energiatehokkuustoimikunnan arviointeja ja taustaselvityksiä sekä asuntoalueiden ekotehokkuutta ja liikennetarpeen arviointia koskevia tutkimuksia (mm. Wahlgren 2009, Kalenoja et al. 2008, Savolainen et al. 2008).

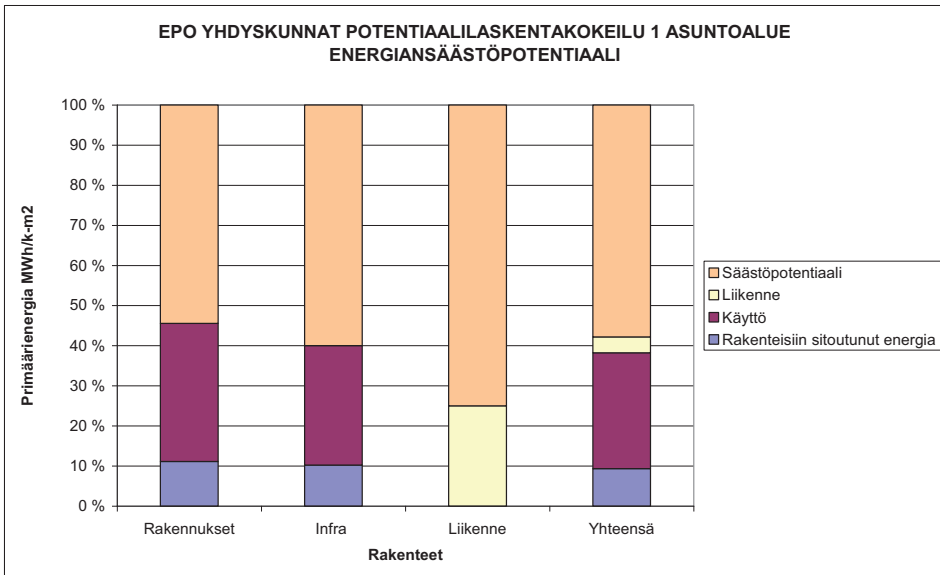
Materiaalien tuotantoenergian potentiaalitavoitteiden saavuttaminen voi edellyttää esimerkiksi energiaintensiivisten materiaalien käytön rajoituksia ja hiilinielujen (puun ja puupohjaisten materiaalien) käytön lisäämistä, jolloin nettohiilijälki pienenee.

Kuvissa 2.11 ja 2.12 esitetään potentiaalilaskennan tuloksia. Laskennan mukaan asuntoaluetasolla on mahdollista parantaa energiatehokkuutta (vähentää energiankäyttöä) koko elinkaaren aikana (tässä 50 vuotta) kaikkiaan lähes 60 %. Suurimmat potentiaalit ovat rakennusten käyttövaiheessa ja liikenteessä.





Kuva 2.11. Potentiaalilaskentakokeilu asuntoaluetasolla. Alueen energiatehokkuus ja energiansäästöpotentiaali.



Kuva 2.12. Potentiaalilaskentakokeilu asuntoaluetasolla. Suhteellinen energiansäästöpotentiaali eri rakenteiden ja liikenteen osalta sekä kokonaisuudessaan.

## 2.5 Johtopäätökset

### Päähavainnot

Tutkimuksen avulla on koottu yhteen ja jäsennetty aikaisemmin hajallaan ollutta tietoutta yhdyskuntien energiatehokkuuden mittaamisesta, mittareista ja potentiaaleista. Erityisen suuri merkitys on ollut tutkimuskokonaisuuden laaja-alaisuudessa. Näin on voitu tarkastella esimerkiksi yhdyskuntien energiatehokkuuden mittaamisen taserajoja ottaen huomioon kytkennät muiden sektorien taserajoihin ja näiden yhtymäkohtiin.

Yhdyskuntien energiatehokkuuden mittaamisen taserajat eivät ole yksiselitteisiä ja niitä voidaan muokata tarpeen mukaan. Tarkastelun kohteena voivat olla fyysiset tai toiminnalliset aluerajaukset.

Yhdyskuntien energiatehokkuuden mittareista on laadittu yleiset kuvaukset. Mittareita voidaan hyödyntää erilaisissa yhdyskuntien energiatehokkuustarkasteluissa. Energiatehokkuuden mittarit koostuvat useista osista ja vaiheista. Eri mittarit täydentävät toisiaan.

Yhdyskuntien energiatehokkuuden potentiaalien laskentamenetelmän pohjaksi laadittiin koelaskelmia. Tutkimusaineiston ja laskentakokeilujen perusteella yhdyskuntien energiansäästöpotentiaali voi olla merkittävä. Energiatehokkuuden potentiaali koostuu yhdyskunnan eri rakenteiden ja vaiheiden potentiaaleista. Suurin energiatehokkuuden potentiaali on koelaskennan mukaan rakenteiden käyttövaiheessa ja liikenteessä.

Yhdyskuntien energiatehokkuuden mittaus ja potentiaalit kytkeytyvät merkittävästi muihin tutkimuksen osa-alueisiin: rakennuksiin, energiantuotantoon, teollisuuteen ja logistiikkaan.

### Toimenpide-ehdotuksia

Yhdyskuntien energiatehokkuuden parantamiseksi tulisi kiinnittää huomiota erityisesti yhdyskuntarakenteellisiin sijainti- ym. valintoihin, joilla vaikutetaan liikennetarpeeseen ja kulkutapoihin ja siten liikenteen energiankäyttöön. Yhdyskuntarakenteen väljyys vaikuttaa oleellisesti perusrakenteen laajuuteen. Rakennusten energiankäyttö muodostaa suurimman osan yhdyskuntien energiankäytöstä ja niiden energiatehokkuuden parantamisella on merkittävä osuus yhdyskuntien energiatehokkuuden paran-

tamisessa. Uuden rakenteen lisäksi energiatehokkuutta tulisi parantaa rakennetun ympäristön osalta.

### **Tutkimustarpeita**

Työn perusteella on tunnistettu ainakin seuraavia jatkotutkimustarpeita. Yhdyskuntien energiatehokkuuden mittaamista ja energiansäästöpotentiaalin arviointia tulisi kehittää edelleen. Yhdyskuntien taserajojen määrittelyä ja energiatehokkuuden mittaamista tulisi täsmentää ja syventää erityisesti muiden sektorien kytkentöihin liittyen. Potentiaalilaskentamenetelmiä tulisi kehittää edelleen ja soveltaa niitä erilaisissa kohteissa. Kohteina tulisi olla sekä uusien alueiden suunnittelu että rakennetun ympäristön kehittäminen, korjaus- ja täydennysrakentaminen. Yhdyskuntarakenteen kehittämisen energiatehokkuuspotentiaalin arviointi koko Suomen laajuudella tukisi kansalliseen ja kansainväliseen ilmastonmuutoksen torjuntatyöhön liittyvää päätöksentekoa.

## Lähdeluettelo

Energiatehokkuustoimikunta (2009). Ehdotus energiansäästön ja energiatehokkuuden toimenpiteiksi. Energiatehokkuustoimikunnan mietintö. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja, Energia ja ilmasto, 52/2009. Helsinki.

Forsström, J., Lahti, P., Pursiheimo, E., Rämä, M. Shemeikka, J. Sipilä, K. Tuominen, P. and Wahlgren, I. 2011. Measuring energy efficiency. Indicators and potentials in buildings, communities and energy systems. VTT Research Notes 2581, Espoo, Finland. 107 p. + app. 5 p. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2011/T2581.pdf>

Harmaajärvi, I., Huhdanmäki, A. & Lahti, P. (2001). Yhdyskuntarakenne ja kasvihuonekaasupäästöt. Ympäristöministeriö, Suomen ympäristö 522. Helsinki.

Heinonen, S., Kasanen, P. & Walls, M. (2002). Ekotehokas yhteiskunta. Ympäristöklusterin kolmannen ohjelmakauden esiselvitysraportti. Ympäristöministeriö, Suomen ympäristö 598. Helsinki.

IPCC (2007). The Fourth Assessment Report (AR4). [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)

Kalenoja, H., Vihanti, K., Voltti, V., Korhonen, A. ja Karasmaa, N. (2008). Liikennetarpeen arviointi maankäytön suunnittelussa. Ympäristöministeriö, Suomen ympäristö 27/2008. Helsinki.

Lahti, P. & Moilanen, P. (2010). Kaupunkiseutujen yhdyskuntarakenne ja kasvihuonekaasupäästöt. Kehitysvertailuja 2005–2050. Ympäristöministeriö, Suomen ympäristö 12/2010. Helsinki. <http://www.ymparisto.fi/julkaisut>

Lahti, P., Nieminen, J. & Virtanen, M. (2008). Ekotehokkuuden arviointi ja lisääminen Helsingissä. Helsingin kaupunkisuunnitteluviraston yleissuunnitteluosaston selvityksiä 2008:2. [http://www.hel2.fi/ksv/julkaisut/yos\\_2008-2.pdf](http://www.hel2.fi/ksv/julkaisut/yos_2008-2.pdf)

Savolainen, I., Similä, L., Syri, S. & Ohlström, M. (toim.) (2008). Teknologiapolut 2050. Teknologian mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen syvien rajoittamistavoitteiden saavuttamiseksi Suomessa. VTT Tiedotteita 2432. Espoo.

TeKes (2009). ClimBus. Business Opportunities in the Mitigation of Climate Change 2004-2008. Final Report 4/2009. <http://www.tekes.fi>

Tuomaala, M. (2007). Conceptual Approach to Process Integration Efficiency. University of Technology. TKK Dissertations 73. Espoo.

Työ- ja elinkeinoministeriö (2008). Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 6. päivänä marraskuuta 2008. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja, Energia ja ilmasto, 36/2008. Helsinki.

Työ- ja elinkeinoministeriö (2009). Energiatehokkuustoimikunnan mietintö: Ehdotus energiansäästön ja energiätehokkuuden toimenpiteiksi. Helsinki.

Valtioneuvoston kanslia (2009). Valtioneuvoston tulevaisuusselonteko ilmasto- ja energiapolitiikasta: Kohti vähäpäästöistä Suomea. Valtioneuvoston kanslian julkaisusarja 28/2009. Helsinki.

Wahlgren, I. (2009). Assessing ecological sustainability in urban planning - EcoBalance Model. Life cycle assessment of products and technologies. LCA Symposium. Koukka-ri, Heli; Nors, Minna (eds.). VTT Symposium 262. VTT, ss. 106 – 121. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/symposiums/2009/S262.pdf>



## **3. Rakennukset**

Pekka Tuominen ja Jari Shemeikka

VTT Rakennusten teknologiat ja palvelut -osaamiskeskus

## Tiivistelmä

Rakennuksissa on suhteellisen suuri energiatehokkuuspotentiaali verrattuna muihin talouden sektoreihin johtuen osittain niiden suuresta osuudesta energiankulutuksesta ja osittain hyödyntämättömistä parantamismahdollisuuksista. Energiatehokkuuden mittarit ovat tarpeen sekä nykyisen energiatehokkuustason että parannuspotentiaalın arvioinnissa. Universaalın mittarin kehittäminen kaikkiin tarkoituksiin ei ole mahdollista. Siksi tässä tutkimuksessa päädyttiin suosittelemaan mittarijoukkoa, josta valitaan oikea mittariyhdistelmä kuhunkin käyttötarkoitukseen.

Energiatehokkuuspotentiaalın arviointi riippuu tarkasteltavan kohteen mittakaavasta ja tarkasteltavasta aikavälistä. Pieniä muutoksia arvioitaessa riittää kun huomioidaan kaikki merkittävät energiavirrat ja sitoutunut energia sekä tehdään kannattavuuslaskelma. Sopivat primäärienergiakertoimet perustuvat keskiarvoille. Kun muutokset ovat tarpeeksi suuria, jotta niillä on järjestelmätason vaikutuksia, tulee primäärienergiaker-toimissa käyttää lyhyellä aikavälillä marginaalisia arvoja. Pitkällä aikavälillä tulee huomioida energiajärjestelmän sopeutuminen, esimerkiksi skenaariotarkastelulla, ja taloudelliset vaikutukset, esimerkiksi kansantaloudellisella mallintamisella. Myös ulkois-kustannukset ja rebound-efekti on syytä ottaa mukaan tarkasteluun. Merkittävien muutosten kohdalla pelkkien keskiarvojen käyttäminen voi johtaa vääristymiin tulok-sissa.

Energiatehokkuuden mittaamista ja potentiaaliarviointia tulisi kehittää edelleen.



## **Abstract**

Buildings have a relatively high potential for energy efficiency improvements compared to other sectors of the economy. Indicators are needed to measure both current energy efficiency and improvement potential. Various indicators serve different purposes and interests in the buildings sector depending on the needs of the indicator's user, who may range from the user of the building to the regulator, just mention two of the typical stakeholders of a building. Defining a universal indicator to cover all needs is not possible. Therefore an array of indicators is suggested – what indicator to use depends on the situation and the objectives of the analysis.

Calculating energy efficiency potential is dependent on the scale and timeframe of the analysis. With small changes it suffices to take into account all significant energy flows and embodied energy with average primary energy coefficients. A profitability calculation should also be made. With large changes that entail systemic effects the primary energy coefficients should take marginal values. Systemic changes should be analyzed with e.g. scenario analysis and economic effects should be evaluated with e.g. economic modelling. Externalities and the rebound effect should also be considered. Using averages in large-scale analyses could lead to unsound results.

Measuring energy efficiency and assessing improvement potentials should be studied further.

## Lyhenteiden selitykset

|                   |   |
|-------------------|---|
| BKT               | Bruttokansantuote                               |
| EEI               | Taloudellinen energiaintensiteetti              |
| EIU               | Käytön energiaintensiteetti                     |
| EPI               | Energiasuorituskykyindeksi                      |
| EPO               | Energiatehokkuuden mittarit ja potentiaalit     |
| IEA               | Kansainvälinen energiajärjestö                  |
| IPCC              | Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli        |
| kWh               | Kilowattitunti                                  |
| LCA               | Elinkaarianalyysi                               |
| LVI               | Lämpö, vesi ja ilmastointi                      |
| RET               | Rakennusten energiatehokkuus                    |
| SEC               | Energian ominaiskulutus                         |
| SEC <sub>UR</sub> | Käyttöasteella korjattu energian ominaiskulutus |

## 3.1. Johdanto

### Tavoite

Euroopan komissio hyväksyi vuonna 2008 strategian ilmastotoimista. Sen mukaan jäsenvaltioiden tulee vähentää niiden yhteisiä kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 20 % ja lisätä uusiutuvien energialähteiden osuutta 20 %:in kokonaiskulutuksesta vuoteen 2020 mennessä. Lisäksi Euroopan komissio on asettanut suuntaa antavan tavoitteen vähentää primäärienergian kulutusta 20 %:lla verrattuna vuoden 2020 ennakoituun energiankulutukseen. Tämä korostaa tarvetta parantaa energiatehokkuutta EU:ssa. Energiatehokkuuden mittaamiseksi ja tehostamispotentiaalien laskemiseksi ei ole kuitenkaan ollut yhteistä menetelmää. Tämän vuoksi tammikuussa 2008 käynnistettiin tutkimus Energiatehokkuuden mittarit ja potentiaalit, EPO edistämään tutkimusta tällä alueella (Tekes, 2009).

Tutkimuksen tavoitteeksi asetettiin: 1) kehittää yhdenmukainen, koko energiaketjun kattava energiatehokkuuden käsitteistö ja mittaristo, 2) luoda energiatehokkuuden potentiaalien laskentatapa, 3) laskea kehitetyn laskentatavan (1+2) avulla saavutettavissa oleva energiatehokkuuden tehostamispotentiaali, 4) tuottaa ehdotus tulevaisuuden kansallisiksi energiatehokkuuden painopistealueiksi ja luoda perusta uusille koko energiaketjua palveleville liiketoimintamalleille. Tutkimus kattoi sektorit: energiantuotanto, teollisuus, rakennukset, yhdyskunnat, liikenne ja logistiikka.

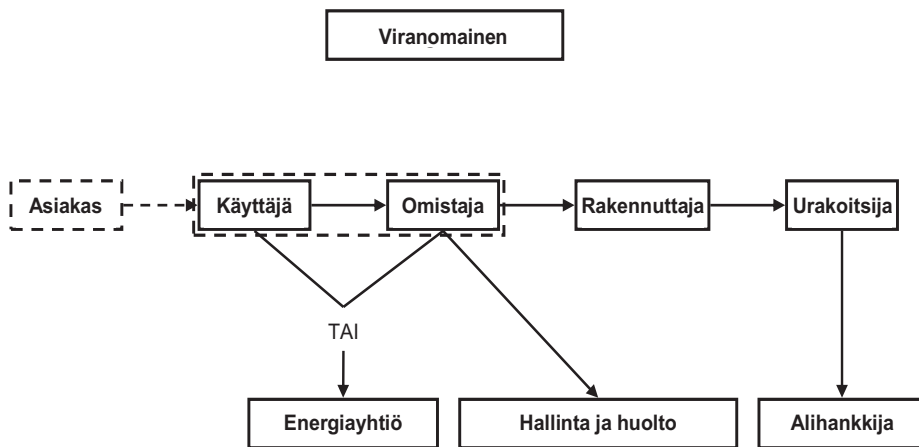
Tämä raportti käsittelee osa-aluetta rakennukset. Koko hankkeen tuloksia sektorikohtaisine eroavaisuuksineen tullaan käsittelemään tutkimuksen yhteenveto-osassa.

### Kohteen kuvaus ja rajaukset

Rakennukset kuluttavat huomattavan osan maailman energiankulutuksesta, mutta niissä on myös merkittävää tehostamispotentiaalia. Teollisuusrakennukset poislukien maailman rakennuksissa kulutetaan 38 % energiasta, mikä aiheuttaa 33 % maailman hiilidioksidipäästöistä (IEA 2008). IPCC (2007) ja Euroopan komissio (2006) ovat viimeisimpinä arvioineet rakennusten energiansäästöpotentiaalın suurimmaksi talouden eri sektoreiden joukossa. Erityisesti tämä pätee primäärienergiaan, sillä rakennukset ovat energiaketjun loppupäässä; kaikki energiatehokkuusparannukset kertautuvat jokaisessa ylävirrassa olevassa muunnoksessa. Onkin ymmärrettävää että 1970-luvun energiakriisin jälkeen rakennukset ovat olleet energiatehokkuuden tähtävien toimen-

piteiden ykköskohteita. Etenkin asuinrakennuksiin on kohdistettu enemmän energia- poliittisia toimenpiteitä kuin mihinkään muuhun sektoriin IEA:n jäsenmaissa (Haas 1997).

Suomen asuinrakennuskannan pinta-ala on 270 miljoonaa m<sup>2</sup>, josta 55 % on omakoti- taloja, 33 % kerrostaloja ja 12 % rivitaloja. Toimisto-, liike- ja julkiset rakennukset kat- tavat 82 miljoonaa m<sup>2</sup> pinta-alasta. Lämmitystavoista kaukolämpö on yleisin 43 % markkinaosuudellaan. Öljy- ja sähkölämmitys jakavat toisen sijan kumpikin 22 % osuudellaan. Kiinteitä polttoaineita kuten puuta ja turvetta poltetaan lämmöksi 8 % rakennuksista ja jäljelle jäävässä 5 % rakennuksista käytetään muita lämmönlähteitä kuten maalämpöpumppuja. (Tilastokeskus 2009)



*Kuva 3.1. Eräiden merkittävimpien sidosryhmien asiakkuussuhteita tyypillisen ra- kennuksen tapauksessa. Joissain tapauksissa omistaja ja käyttäjä ovat sama. Viran- omainen kattaa kaikki hallinnon tasot kunnallisesta ylikansalliseen. Asuinrakennuk- sissa ei luonnollisestikaan ole asiakkaita.*

Rakennussektorilla on erilaisia tarpeita energiatehokkuuden mittareille riippuen käyt- täjästä. Eräitä tyypillisen rakennuksen merkittävimmistä sidosryhmistä on esitetty ku- vassa 3.1. Luonnollisesti jokaisella sidosryhmällä on erilaiset tavoitteet, ensisijaisesti jokainen huolehtii omasta hyödystään. Myös energiatehokkuuden osalta intressit voi- vat olla erilaiset.

Kuvassa 3.2 on esitetty esimerkkejä eräiden sidosryhmien merkittävimmistä intresseistä energiatehokkuuden suhteen. Tietysti kaikki sidosryhmät ovat jossain määrin kiinnostuneita kaikista kuvassa esitetyistä asioista, mutta niiden huomion pääosan voidaan olettaa kohdistuvan niiden oman toiminnan ja etenkin hyödyntavoittelun kannalta merkityksellisimpiin asioihin. Sidoryhmien intressit muodostavat viitekehysten, jossa energiatehokkuuden mittareita käytetään.

Mittarien kehittäminen kattamaan kaikki kuvassa 3.2 esitetyt tarpeet on valtaisa urakka, eikä ehkä ole edes mahdollista. Pikemminkin on syytä ajatella mittarikehitystä jatkuvan parantamisen prosessina, jossa sopeudutaan uusiin tavoitteisiin ja prioriteetteihin. Esimerkiksi 1970-luvulla yksi energiatehokkuuden keskeisistä tavoitteista olisi ollut tuontipolttoaineiden vähentäminen, nykyisin hyvin samankaltaisessa asemassa on ilmastonmuutoksen torjuminen. Tulevaisuudessa tavoitteet todennäköisesti tulevat muuttumaan jälleen.



Kuva 3.2. Esimerkkejä eräiden sidosryhmien merkittävimmistä intresseistä energiatehokkuuden suhteen. Käyttäjän ja omistajan kiinnostus energian arvosta riippuu siitä kumpi maksaa energiasta.

Rakennuksista mukana tässä tutkimuksessa ovat asuinrakennukset, liike- ja toimistorakennukset ja julkiset rakennukset. Teollisuusrakennukset jätettiin EPO-tutkimuksen tämän osan ulkopuolelle.

Tutkimus keskittyi mittareiden muodostamisen ja potentiaalilaskennan lähestymistavan kehittämiseen. Energiatohokkuuteen vaikuttavista tekijöistä laatu rajattiin kehitettävien mittareiden ulkopuolelle liian monimutkaisena asiana sisällytettäväksi mittareihin. Sen mittaamista energiatehokkuuden rinnalla kuitenkin suositellaan.

Sekä mittaaminen että potentiaalilaskenta on tutkimuksen tässä vaiheessa rajattu tehtäväksi myöhemmissä luvuissa esitettyjen taserajojen sisäpuolella. Yhdyskunnat ja energiajärjestelmän sisältävää tutkimusta ehdotetaan jatkotutkimusaiheeksi.

## **Menetelmät**

Tutkimuksen pohjaksi tehtiin kirjallisuusselvitykset energiatehokkuuden mittareista rakennuksissa ja energian allokaatiosta kaukolämmön tuotannossa. Mittareita työstettiin yhteistyössä sidosryhmien edustajien kanssa työpajatyöskentelynä. Mittareita testattiin erityyppisillä rakennuksilla eri energiankulutustavoilla.

Rakennusten lämmityksen teknisestä energiatehokkuuspotentiaalista teetettiin projektin yhteydessä diplomityö, joka nojasi skenaariotarkasteluihin (Tuominen 2008a, 2008b)."

## 3.2 Taserajat

### Taserajat rakennusten energiatehokkuuden mittaamisessa

Taserajojen tehtävä on erottaa tarkasteltava ilmiö tai prosessi ympäristöstään. Taserajoilla tehdään näkyväksi merkittävä menetelmällinen ero: taserajojen sisäpuolella tapahtuvat energiamuunnokset ja hävikit otetaan huomioon analyysissä ja laskutoimituksissa kun taas taserajojen ulkopuolella ne huomioidaan vain muuntokertoimilla.

Hyvin määritellyt taserajat ovat tärkeitä, jotta tutkimuksen terminologia on yksikäsitteistä ja yhtenäistä. Niiden avulla varmistetaan, että jokaisen mittaria tai potentiaali-laskentaa varten tarvittavan lukeman kohdalla on selvää mitä energiavirtoja on laskettu mukaan ja missä vaiheessa energiaketjua. Tarkoituksena on välttää toisaalta saman energian laskeminen useaan kertaan, toisaalta katvealueiden jääminen tarkasteluun. Yhtenäisesti määriteltyjen taserajojen tehtävänä on myös varmistaa tulosten vertailtavuus eri kohteiden välillä.

Kun energiavirta ylittää taserajan, käytetään tavallisesti kertoimia ylävirrassa tapahtuneiden muunnosten, päästöjen, ym. huomioimiseen. Näiden kertoimien tulee olla yhteneväiset kautta koko analysoitavan järjestelmän.

Lisäksi rakennuksen sisäisten taserajojen avulla voidaan jakaa energiankulutusta eri käyttötarkoituksiin ja häviövirtoihin. Tällainen kulutuksen dekomponointi on olennaista kun halutaan selittää ilmiöitä kokonaiskulutuslukujen takana.

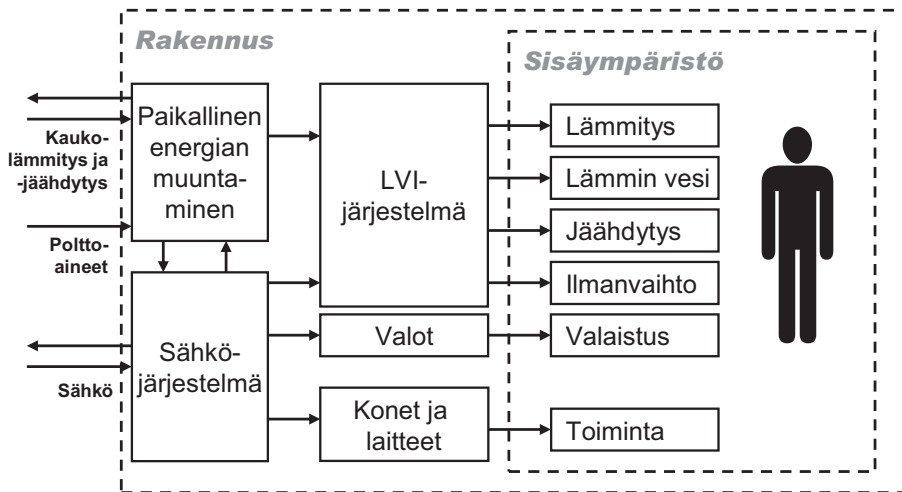
### Rakennuksen taserajat

Rakennukset kuluttavat energiaa suoraan lämmityksessä ja jäädytyksessä sekä epäsuorasti sähkönä valoissa, koneissa, laitteissa, ilmanvaihdossa, ym. Järjestelmät, joita rakennuksessa tavallisesti tarvitaan muuntamaan hankittu energia hyödyllisiksi palveluiksi, on esitetty kuvassa 3.3.

Kuvassa on esitetty myös merkittävimmät taserajat: *rakennus*, jolla on merkitty kohta, jossa ulkoa tulevat energiavirrat (polttoaineet, kaukolämpö, sähkö, suora auringon valo, ym.) saavuttavat rakennuksen, sekä *sisäympäristö*, jossa energiapalvelut varsinaisesti



sesti kulutetaan. Tarvittaessa voidaan rajata pienempiä yksiköitä omilla taserajoillaan, esimerkiksi tarkasteltaessa yksittäisen laitteen tai komponentin tehokkuutta.



Kuva 3.3. Rakennuksen taserajat.

On syytä huomata, että vaikka täällä hetkellä useimmat rakennukset vain kuluttavat energiaa, kuvassa on esitetty myös sähkön ja lämmön ulosvirtauksia, jotka tulevat kyseeseen paikallista energiantuotantoa hyödyntävissä rakennuksissa. Merkillepantavaa on myös, että rakennuksen käyttäjän, kuvassa oikealla, intressejä palvelee vain energiapalveluiden käyttäminen; kaikki järjestelmät kuvan vasemmalla laidalla ovat tarpeen yksinomaan näiden palveluiden tuottamiseksi.

### Taserajojen liittymäkohdat muihin ryhmiin

Rakennukset ovat verrattain selkeärajainen yksikkö energiatehokkuuden tutkimisen kannalta. Myös energiavirtoja sisään ja ulos rakennuksesta on yleensä hallittavissa oleva määrä. Monilta osin rakennusten energiatehokkuuden tutkiminen edellyttää kuitenkin muidenkin kuvan 3.3 ulkopuolisten osa-alueidenkin huomioimista. Seuraavilla sektoreilla on eniten liittymäkohtia rakennuksiin:

- Rakennusteollisuus. Rakennusmateriaaleihin on sitoutunut huomattavia määriä energiaa. Jotta tätä energiaa voidaan mitata, täytyy tutkia materiaalit tuottanutta teollisuutta. Täten rakennusteollisuuden energiatehokkuus on myöskin rakennusten energiatehokkuutta. Rakennusmateriaaleihin sitoutuneista energiamääristä on kohtalaisen hyvin saatavilla tietoja, sillä asiaa on tutkittu pitkään elinkaariselvitysten piirissä. Useimmissa energiatehokkuustarkasteluissa saatavilla olevat luvut materiaalien energiasisällöistä ovat riittäviä. Rakennuskohtaisesti asiaa on syytä laskea jos harkitaan poikkeavia rakenneratkaisuja, materiaaleja tai kierrätystä.
- Yhdyskunnat ja liikenne. Rakennuksilla on huomattava merkitys yhdyskunnan kokonaisenergiankulutuksessa, mutta merkittävässä asemassa on myös rakennusten sijainti, yhteydet ja käyttö. Esimerkiksi työpaikkojen ja palveluiden sijainti lähellä kotia vähentää liikenteen energiantarvetta huomattavasti. Etätyöt ja asioiden hoitaminen verkossa myös vähentää liikenteen energiankulutusta ja lisäksi pienentää rakennusten energiantarvetta koska liike- ja toimistotilaa tarvitaan vähemmän. Energiankulutuksen kokonaiskuvan kannalta on siis keskeistä ottaa mukaan tarkasteluun myös yhdyskunnat ja liikenne.
- Energiajärjestelmä. Ennen kuin energiavirrat saavuttavat rakennuksen, näillä on useimmiten pitkä toimitusten, muunnosten ja polttoaineenhankinnan muodostama energiaketju takanaan. Jotta voidaan laskea kuinka paljon primäärienergiaa on kulunut jokaista hyötyenergian yksikköä kohti, täytyy tuntea energiaketjun rakenne. Useimmissa tapauksissa keskiarvot ovat riittäviä energiakertoimiksi yksittäisten rakennusten kohdalla.

Taserajojen ylittävien energiavirtojen tapauksessa taserajojen ulkopuolisten ilmiöiden ja prosessien huomioimiseen riittää useimmissa tapauksissa keskiarvoille perustuvien kertoimien käyttäminen taserajalla. Joissain tapauksissa tosin kuvan 3.3 mukaisia taserajojen mukaista tarkastelua on syytä kuitenkin laajentaa:

- Jos tarkasteltavaa rakennusta tai rakennuksia palvelee oma, itsenäinen energiajärjestelmä. Jos esimerkiksi rakennukset on liitetty omaan lämpölaitokseen, tulee taserajalla soveltaa tälle laitokselle ominaisia kertoimia, eikä keskiarvoja. Lisäksi jos muutokset rakennuksissa ovat tarpeeksi mittavia vaikuttaakseen laitoksen toimintaan, tämäkin on syytä ottaa huomioon.

- Jos on odotettavissa muutoksia tarpeeksi huomattavassa osassa yhdyskunnan rakennuksia, se vaikuttaa koko energiajärjestelmään. Tällaisessa tapauksessa tulee lyhyen aikavälin tarkastelussa soveltaa *marginaalisia* kertoimia keskiarvojen sijaan, sillä ne kuvastavat paremmin muutosta primäärienergiassa ja kasvihuonekaasupäästöissä. Pitkällä aikavälillä täytyy huomioida energiajärjestelmän sopeutuminen muutoksiin, mikä voidaan tehdä esimerkiksi skenaariotarkasteluna.
- Jos rakennuksen käyttötapa on epätyypillinen tavalla, joka alentaa energiankulutusta, se pitää huomioida analyysissä. Esimerkiksi jos rakennus on suunniteltu siten että asukas työskentelee kotona, kun tämä aiemmin tarvitsi erillistä toimistoa, vältetty energiankulutus on syytä huomioida energiansäästönä.

Lisäksi yleisesti ottaen jos on odotettavissa huomattavia muutoksia taserajojen ulkopuolella taserajojen sisäisistä toimenpiteistä, ne tulee ottaa mukaan tarkasteluun.

### 3.3 Energiatehokkuuden mittarit

#### Mittareiden määrittelyn periaatteet

Energiatehokkuus on termi, jota käytetään vaihtelevissa merkityksissä eri yhteyksissä. Näin ollen ei myöskään ole olemassa yhtenäistä, kaikki tapaukset kattavaa tapaa mitata energiatehokkuutta. Energian muuntamisen tehokkuutta mitataan tavallisesti muunnosprosessista ulos saatavan ja sen kuluttaman energian suhdelukuna:

$$\frac{\text{Energia ulos}}{\text{Energia sisään}} \quad (3.1)$$

Prosesseissa, joiden lopputuote ei ole energiaa, mittaaminen on hankalampaa. Tarvitaan suure, joka kuvaa edustavalla tavalla palvelua, prosessia, hyödykettä, kulutusta tai tarvetta, joka aiheuttaa energian kysynnän. Yhdysvaltain energiaministeriö (USDOE 1995) käyttää tällaisesta suureesta nimitystä *kysyntäindikaattori* (demand indicator). Käytännössä energiatehokkuuden mittarina käytetään yleensä *energiaintensiteettiä*:

$$\frac{\text{Energia sisään}}{\text{Kysyntäindikaattori}} \quad (3.2)$$

Vertaaminen kaavaan 1 osoittaa, että energiantensiteetti on kääntäen verrannollinen energiatehokkuuteen eli mitä suurempi on prosessin energiatehokkuus sitä pienempi energiantensiteetti. Koska energiantensiteetti mittaa energiankulutusta saavutettuja tuloksia kohti, se vastaa energiatehokkuuden ydinkysymykseen: kuinka paljon täytyy energiaa kuluttaa jotta saadaan toivottu lopputulos? Matemaattisesti tämä voidaan muotoilla

$$E = I \times S, \quad (3.3)$$

jossa  $E$  on energiankulutus  $S$  määrälle energiantensiteetillä  $I$  tuotettua palvelua. Näistä syistä johtuen erilaiset energiantensiteetiluvut ovat nykyisin kenties tavallisin tapa mitata energiatehokkuutta eri talouden sektoreilla ympäri maailman (ks. esim. IEA 1997, 2008, EEA 2000, APEC 2000, USDOE 1995, UNSD 2009, Motiva 2007).

Energiatehokkuuden mittaaminen saattaa vaikuttaa yksinkertaiselta, kun sen määrittely riippuvan yksinomaan prosessin panosten ja tuotosten määrästä. Todellisuudessa kuitenkin kummankin mittaamiseen on lukuisia tapoja, joista yhden valitseminen sul-

kee muilla tavoilla saatavia etuja pois. Patterson (1996) jakaa energiatehokkuuden mittarit neljään luokkaan:

1. Termodynaamiset mittarit, jotka mittaavat sekä panoksia että tuotoksia energiasuurein (esim. lämmitysjärjestelmän terminen hyötysuhde).
2. Fysikaalis-termodynaamiset mittarit, joissa energiaa mitataan termodynaamisesti, mutta tuotosta fysikaalisesti (esim. rakennuksen energiankulutus neliometriä kohti).
3. Taloudelliset-termodynaamiset mittarit, jotka mittaavat tuotoksia markkinahinnoin ja energiankulutusta termodynaamisesti (esim. BKT:n energiantensiteetti).
4. Taloudelliset mittarit, jotka mittaavat sekä panoksia että tuotoksia rahassa (esim. energiameinojen osuus BKT:stä).

Jokaisella näistä lähestymistavoista on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Lisäksi jokaisen kategorian sisällä on vielä lukuisia vaihtoehtoisia mittareita. Vaikka valittaisiin esimerkiksi termodynaaminen mittari, pitäisi vielä päättää käytetäänkö primäärienergiaa vai hankittua energiaa, vai mitataanko exergiaa energian sijaan, ja miten allokoidaan energiankulutus jos lopputuotteita on kaksi tai useampia.

Myöskään kysyntäindikaattorin valinta ei ole yksinkertaista. Esimerkiksi autoissa käytetään yleisesti ajettua matkaa, onhan tavallisin mittari auton energiatehokkuudelle kulutus litroina sataa kilometriä kohti. Matka ei kuitenkaan ole ainoa asia, mikä vaikuttaa polttoaineen kulutukseen. Auton ja kuorman massat vaikuttavat myös, kuten vaikuttavat myös mm. ajotapa ja olosuhteet. Jotta eri ajosuoritteiden tehokkuutta voitaisiin verrata täydellisesti, kaikki kulutukseen vaikuttavat tekijät pitäisi huomioida mittarissa. Sellainen mittaustarkkuus on todellisuudessa mahdotonta saavuttaa. Näin ollen energiatehokkuusmittarit yleisesti ottaen tuottavat vain likiarvoja todellisesta energiatehokkuudesta.

Energiatehokkuusmittareiden muodostamista täytyisi ennen kaikkea ohjata kysymys mihin tarkoitukseen mittaria aiotaan käyttää. Rakennusten tapauksessa suunnittelijalla, rakentajalla, käyttäjällä ja viranomaisella on kaikilla toisistaan poikkeavia tavoitteita ja intressejä. Siten heillä voi olla myös erilaiset tarpeet mittareille. Toisaalta eri mittarit soveltuvat parhaiten tarkasteluihin, joiden painopiste on esimerkiksi sosiaalisissa, taloudellisissa tai ympäristöasioissa.

Yleisesti ottaen mitattaessa rakennuksen energiankulutusta, seuraavat asiat tulee huomioida:

- Elinkaari: energiaketjussa ennen rakennusta käytetty energia, materiaaleihin sitoutunut energia, kierrätyksellä vältetty ja tuotettu energia.
- Energian arvo: eri energiavirtojen poikkeavan arvon huomioiminen, oli kyseessä sitten fyysikaalinen arvo kuten kyky tehdä työtä, energian markkinahinta tai muu arvon mitta.
- Integraation merkitys ja useampien lopputuotteiden tuotanto allokointiongelmien (esim. lämmön ja sähkön yhteistuotanto).
- Referenssiarvot kun tehdään benchmarkingia tai lasketaan potentiaalia.

Tuotoksia mitattaessa tulee huomioida seuraavat asiat:

- Lopputuotteen laatu, koska pelkät fyysiset määrät eivät huomioi laatueroja.
- Vaihtuvien kuormien ja aikasarjojen merkitys, sillä indikaattorien täytyy sopeutua erilaisiin kulutustasoihin eri aikoina.

Mittareita muodostaessa täytyy päättää tavoitellaanko pientä määrää aggregoivia indikaattoreita, jotka ovat nopeita tulkita mutta voivat myös tuottaa harhaanjohtavia tuloksia jos summaamisessa menetetään tärkeää informaatiota, vai suurempaa joukkoa yksityiskohtaisempia tuloksia antavia mittareita, jotka vaativat enemmän tulkintaa ja arvotuspäätöksiä käyttäjältä.

Huomioiden luvussa o käsitellyt tarpeet, on selvää että nykyiset energiatehokkuuden mittarit – keskeisimpinä ominaisenergiankulutus bruttoalaa (ks. liite B) kohti ja laitekohtaiset hyötysuhteet – eivät kovin hyvin kata eri sidosryhmien moninaisia tarpeita. Siksi on ymmärrettävää että uusille mittareille on runsaasti kysyntää. Tällä hetkellä tärkein mittari on bruttoalan ominaisenergiankulutus (vrt. energiaintensiteetti, kaava 3.2):

$$\frac{\text{Kulutettu energia}}{\text{Bruttoala}} \quad (3.4)$$

Tätä mittaria voidaan ajatella laajennettavan kattamaan paremmin erilaiset tarpeet. Laskentatavan laajentaminen huomioimaan elinkaaren alku- ja loppupään edellyttää,

että käytön aikana kulutettuun energiaan lisäksi huomioidaan rakenteisiin sitoutunut energia, mukaan lukien niiden tuotannossa kulunut energia, sekä toisaalta rakennusta purettaessa kierrätyksellä vältetty energiankulutus. Näihin voidaan laskea mukaan myös korjausten aikana tapahtuva materiaalien kulutus ja kierrätys.

Käyttöaste voidaan ajatella huomioitavan nimittäjässä lisäämällä rakennetulle alalle sitä kuvaava kerroin. Kerroin saa arvon yksi kun rakennusta käytetään täydellä käyttöasteella, ts. niin paljon ettei käytön lisääminen ole käytännöllisin toimin mahdollista. Kertoimella nolla rakennusta ei käytetä lainkaan. Arvot nolasta yhteen kuvaavat käyttöasteita sillä välillä. Tällöin täyttä käyttöastetta alhaisemmat lukemat pienentävät nimittäjää ja siis kasvattavat ominaisenergiankulutusta.

Laatu voidaan samalla tavoin ajatella kuvattavan kertoimella nimittäjässä. Tällöin sisäympäristö, jonka laatu on niin korkea, ettei siinä käytännöllisin keinoin ole saatavissa parannuksia, saa arvon yksi. Rakennettu tila, jossa sisäympäristön laatu on niin alhainen että se on käyttökelvoton, saa arvon nolla. Muut laatutasot saavat arvon välillä nolasta yhteen. Puutteet laadussa pienentävät nimittäjää ja kasvattavat ominaisenergiankulutusta, ja kääntäen parannukset laadussa ilman vastaavaa energiankulutuksen lisäämistä pienentävät ominaisenergiankulutusta.

Näin laajennettuna ominaisenergiankulutuksen kaavasta tulee seuraavanlainen:

$$\frac{\text{Sitoutunut energia} + \text{Kulutettu energia} - \text{Kierrätetty energia}}{\text{Pinta-ala} \times \text{Käyttöaste} \times \text{Laatukerroin}} \quad (3.5)$$

Jos osoittajaan tulevat energiapanokset vielä merkittäisiin summana, jossa yksittäiset energiapanokset saisivat energian arvoa kuvaavat kertoimet, täydentäisi tällainen energiatehokkuuden mittaamista merkittävimmät nykyisten mittareiden puutteet.

Valitettavasti näin kokonaisvaltaisen mittarin laatiminen ei ole käytännössä mahdollista tai välttämättä toivottavaakaan. Vaikka elinkaaren energiavirtojen ongelmat (esimerkiksi rakennuksen käyttöikä, kierrätyksen huomioiminen ja hyvin erityyppisten energiavirtojen summaaminen) ratkaistaisiinkin, on käyttöasteen ja varsinkin laadun kaltaisten monimutkaisten käsitteiden tiivistäminen yhteen lukuarvoon paitsi hankalaa myöskin pahimmillaan harhaanjohtavaa.

Laatu esimerkiksi koostuu niin monesta osatekijästä (lämpöolosuhteet, ilmanlaatu, valaistus, ääniolosuhteet, vedenlaatu, sähkön laatu, huolto ja ylläpito, varsinaisen käytön laatu, ym.), joita mitataan niin monilla eri mittareilla, ettei sitä ole järkevää redu-

soida yhteen lukuun. Näin toimien menetettäisiin kohtuuttoman paljon tietoa eri laatu-tekijöistä, joiden kohdalla ihmisillä voi lisäksi olla erilaisia tarpeita ja preferenssejä.

Lisäksi rakennusmääräykset edellyttävät rakennuksen laatutasoksi tietyn vähimmäistason, jolla terveelliset ja turvalliset olot on saavutettavissa. Käytännössä siis laatuero ei voisi koskaan saavuttaa arvoa nolla, koska rakennus olisi tällöin käyttökielossa terveellisyys- ja turvallisuusvaatimusten vuoksi.

Käytännöllisempi lähtökohta mittareiden määrittelyyn on pyrkiä muodostamaan mittarijoukko, jossa erilaiset mittarit ja niiden yhdistelmät sopivat erilaisiin tarpeisiin. Sisäympäristön laatu joudutaan käytännössä jättämään kokonaan energiatehokkuusmittarien ulkopuolelle, sen mittaamisen monimutkaisuuden johdosta. Laadun mittaamiseen on jo olemassa mittaristoja, kuten sisäilmaluokitukset ja PromisE, ja uusia on kehitteillä. Laadun mittaamista aina energiatehokkuuden rinnalla suositellaan, sillä laatuerojen tuominen esiin on tärkeää eri rakennusten energiatehokkuutta verrattaessa.

## **Rakennusten mittarit**

Kuten edellä sanottiin, on energiatehokkuus mittareiden määrittäminen jatkuva prosessi. Tässä ehdotettavia mittareita ei ole tarkoitettu lopullisiksi, vaan pikemminkin ne vastaavat kirjoittajien tämänhetkistä näkemystä asiasta. Mikään mittari ei yksin anna kokonaiskuva energiatehokkuudesta. Siksi ehdotetaan käytettäväksi mittarijoukkoa, jossa kukin mittari kattaa jonkin energiatehokkuuden osa-alueen muita paremmin.

Valitut mittarit tavoittelevat erilaisten tavoitteiden tasapainoista huomioimista. On pyrittävä (1) kuvaamaan täsmällisesti rakennuksen todellinen energiatehokkuus, (2) huomioimaan kattavasti eri sidosryhmille merkitykselliset energiatehokkuuden osa-alueet, (3) huolehtimaan mittareiden sovellettavuudesta käytäntöön ja (4) valitsemaan mittarit joihin lähtötiedot on kohtuullisella vaivalla saatavilla. Mittareiden yhteiskäytöllä voidaan muodostamaan kattava kuva rakennuksen energiatehokkuudesta. Mittareiden valinta riippuu tilanteesta ja tehtävän tarkastelun tavoitteista.

## **Energiankulutuksen mittaaminen ja energian arvo**

Kaikkiin ehdotetuista mittareista sisältyy suure  $E$ , joka määrittää rakennuksessa tarkasteluajanjaksolla (esim. vuodessa) kulutettavaksi energiaksi mitattuna kWh:na. Vallitsevan käytännön mukaan  $E$  sisältää ainakin markkinoilta hankitun energian (*delivered energy, hankittu energia*). Joissakin tapauksissa lukuun lasketaan myös paikal-



lisesti hankittua energiaa kuten polttopuuta. Auringonvalo ja lämpöpumppujen hyödyntämä ympäristön lämpö jätetään miltei aina huomioimatta. Tämä voi olla hyväkin, sillä energiatehokkuusmittarit voivat hyvin kannustaa sellaisten luonnonvarojen käyttöön, joilla ei ole taloudellista arvoa ja merkitystä ympäristölle. Toisaalta vastaavasti polttopuut ja muut rajallisesti saatavilla olevat luonnonvarat on syytä sisällyttää  $E$ :hun vaikka ne olisivat ilmaisia jotta edistettäisiin niiden taloudellista käyttöä. Vähintäänkin mittareita käytettäessä täytyy selväsanaisesti tuoda ilmi mitä energioita  $E$  sisältää ja mitä ei.

Tällä hetkellä miltei kaikki hyötyenergiavirrat suuntautuvat sisään rakennuksiin. Tulevaisuudessa saattaa kuitenkin paikallinen energiantuotanto kehittyä, jolloin osa hyötyenergiavirroista voi suuntautua ulospäin rakennuksista. Tämä voidaan hyvin huomioida  $E$ :ssa summaamalla ulosvirtaukset negatiivisilla arvoilla.

Jotta energiankulutus tulisi mitattua kattavasti, tulee huomioida myös rakentamisessa, remontoinnissa ja purkamisessa kulunut ja mahdollisesti säästynyt energia. Tällä hetkellä rakennukseen sitoutunut energia jätetään usein huomiotta. Nykyisten rakennusten kohdalla tällainen tarkastelu voi antaa riittävän likiarvon rakennuksen energiatehokkuudesta, sillä rakennuksen käytönaikainen energiankulutus on yleensä sitoutunutta energiaa huomattavasti suurempi, tyypillisesti käytön aikana kuluu yli 80 % elinkaaren energiasta. Tilanne muuttuu kuitenkin sitä mukaa kun rakennusten energiatehokkuus paranee, sillä samalla kasvaa elinkaaren alku- ja loppupään suhteellinen merkitys kokonaisenergiankulutuksessa. Jo nykyisissä matalaenergiarakennuksissa sitoutuneen energian merkitys on sen verran suuri, ettei sitä ole syytä jättää tarkastelun ulkopuolelle.

Sitoutuneen energian laskemiseksi on olemassa menetelmiä ja eri rakennusmateriaalien sitoutuneen energian keskimääräisiä sisältöjä on saatavilla erilaisista julkaisuista (ks. esim. Hammond 2007). Jotta sitoutunut energia olisi yhteismitallista käytönaikaisen energiankulutuksen kanssa, on se annualisoitava. Tämä tapahtuu yksinkertaisesti jakamalla sitoutunut energia rakennuksen odotettavissa olevalla käyttöiällä.

Energian arvo on myös syytä huomioida energiatehokkuutta mitattaessa. Energian arvo voidaan mitata useilla eri perusteilla. Korkean exergiasisällön energiat virrat kelpaavat useampaan käyttötarkoitukseen kuin matalan exergian ja ovat siten arvokkaampia. Millä tahansa energiavirralla on rakennukseen saapuessaan vaihtelevan pituinen energiaketju takanaan, joten sen tuottamiseen käytetty primäärienergiämäärä voi olla moninkertainen verrattuna hyötyenergiaan. Lisäksi eri energiat virrat aiheuttavat vaihtelevia päästöjä ja kuluttavat eri luonnonvaroja, mikä vaikuttaa ympäristöarvoihin. Kaikilla

energiavirroilla on myös vaihteleva taloudellinen arvo. Energiavirtojen arvottomatta jättäminen vastaa niiden arvottamista samanarvoisiksi, mikä sekin on arvovalinta, eikä välttämättä lainkaan perusteltu. Siksi kaikki energiavirtojen arvottamiset, tai sen tekemättä jättäminen, tulee aina perustella energiatehokkuutta mitattaessa.

Rakennusten tapauksessa energiaketju sijaitsee uloimman taserajan ulkopuolella (ks.

Kuva 3.3). Siten hankitun energian arvo otetaan huomioon kertoimella  $p$ , jolla kerrotaan eri energiavirrat  $E_{\text{lämmitys}}$ ,  $E_{\text{sähkö}}$  jne. Arvot joita  $p$  saa voivat kuvastaa energian rahallista tai exergeettistä arvoa, CO<sub>2</sub>- tai primäärienergia-sisältöä tai muuta arvostusta. On erittäin tärkeää, ettei eri energiavirtoja summata ennen niiden kertomista  $p$ :llä. Näin ollen  $E$  lasketaan

$$E = p_1 E_1 + p_2 E_2 + \dots, \quad (3.6)$$

kun  $E_1, E_2 \dots$  ovat eriarvoisia energiavirtoja, mukaan lukien annualisoidut sitoutuneet energiat, ja  $p_1, p_2 \dots$  ovat vastaavia arvotuskertoimia. Lämmityksen ja jäädytyksen tapauksessa  $p$  voi sisältää ilmaston normalisointikertoimen. Normalisointimenetelmän valinta riippuu paikallisista olosuhteista (Suomen tapauksessa ks. esim. Motiva 2009).

### **Energian ominaiskulutus**

*Energian ominaiskulutus (specific energy consumption, SEC)*, jota jo käsiteltiin aiemmissa luvuissa, on yksinkertaisesti laskettava ja helposti tulkittava yleiskäyttöinen energiatehokkuuden mittari rakennuksille. Se määritellään

$$SEC = \frac{E}{A}, \quad (3.7)$$

kun  $A$  on tarkasteltava bruttoala neliömetreissä mitattuna. Erilaisia tapoja mitata rakennuksen pinta-alaa on esitetty liitteessä B. Tavallisesti  $A$  sisältää joko lämmitetyn pinta-alan tai kaiken rakennetun alan. Vain lämmitetyn alan sisällyttämisen etuna on, että tällöin luku mittaa paremmin lämmityksen tehokkuutta. Toisaalta joidenkin tilojen, kuten varastojen, pitäminen lämmittämättöminä on itsessään energiatehokas toimintatapa, joka kenties tulisi palkita energiatehokkuuden mittaamisessa. Silti edellinen laskentatapa antaa useimmissa tapauksissa paremman kuvan rakennuksen teknisestä tehokkuudesta. On myös ehdotettu, että pinta-alan sijaan olisi syytä mitata rakennuksen tilavuutta. Tätä voi olla syytä harkita rakennuksissa joissa esiintyy poikkeuksellisia

huonekorkeuksia, mutta useimmissa tapauksissa pinta-ala antaa riittävän hyvän kuvan tehokkuudesta ja tiedot ovat helpommin saatavissa.

SEC on jo laajalti käytössä, mikä helpottaa vertailua kansallisesti ja kansainvälisesti. Sen laskemiseksi tarvittavat tiedot ovat usein verrattain helposti saatavilla. Lukema on myös helppo tulkita. Vaikka SEC:llä on heikkoutensa, kuten käyttöasteen ja taloudellisten tekijöiden huomiotta jättäminen, sen käytön jatkamista muiden mittareiden ohessa suositellaan historiatietojen vertailtavuuden säilyttämiseksi.

### **Käyttöasteella korjattu energian ominaiskulutus**

Rakennuksen energiankulutus koostuu peruskulutuksesta, jota tapahtuu riippumatta rakennuksen käytöstä, sekä rakennuksen käyttäjien energiankulutuksesta. Koska peruskulutus, joka koostuu lämmityksestä, ilmanvaihdon minimitasosta ja muista jatkuvista energiapalveluista, on käynnissä riippumatta rakennuksen käytöstä, voidaan rakennuksen energiatehokkuutta parantaa kasvattamalla rakennuksen käyttöastetta. Lisähyötynä näin voidaan ehkäistä lisärakentamisen tarvetta. Esimerkiksi koulun liikuntasalin iltakäytöllä saatetaan välttää erillisten liikuntatilojen rakentaminen (ks. kpl. Käyttöasteen merkitys).

SEC:iä voidaan muokata niin, että se huomioi rakennusten vaihtelevat käyttöasteet. Kaavan 3.2 mukaisesti energian kysyntään vaikuttavat tekijät tulee huomioida jakajassa. Siksi SEC-kaavaa ehdotetaan muutettavan seuraavasti *käyttöasteen (utilization rate, UR)* huomioimiseksi:

$$SEC_{UR} = \frac{E}{uA} \quad (3.8)$$

Käyttöastetta kuvaa  $u$ , joka vuorostaan voidaan määritellä eri tavoin. Ilmeisin tapa on mitata toteutuneiden käyttötuntien määrää  $T_{toteutunut}$  suurimpaan mahdolliseen käyttötuntien määrään  $T_{max}$ :

$$u = \frac{T_{toteutunut}}{T_{max}} \quad (3.9)$$

$T_{max}$ :n ehdoton yläraja on 24 tuntia vuorokaudessa, joskin useimmissa tapauksissa on tätä alempia käytännöllisiä rajoitteita. Esimerkiksi toimistojen, liiketilojen ja julkisten rakennusten tapauksessa yöaika voidaan syystä jättää huomiotta. Voidaan ajatella

myös monimutkaisempia tapoja laskea  $u$ , kuten toteutuneiden henkilötuntien (eri henkilöiden kumulatiivinen oleskeluaika rakennuksessa vuorokauden kuluessa) määrä suhteessa suurimpaan mahdolliseen henkilötuntien määrään. Tämä saattaa olla tarpeen joissakin rakennustyypeissä, mutta useimmiten jo helpommin laskettavien käyttötuntien huomioiminen parantaa SEC:n käytettävyyttä tilojen tehokkaamman käytön vaikutusten mittaamiseen.

### **Käytön energiaintensiteetti**

$SEC_{UR}$  on mittari, joka huomioi sekä rakennuksen pinta-alan että sen käyttöasteen.  $SEC_{UR}$  ei kuitenkaan huomioi tilojen järjestelystä syntyvää tehokkuutta. Ajatellaan esimerkiksi kahta toimistorakennusta, jotka ovat kaikin tavoin, myös energiankulutukseltaan samanlaiset, paitsi että toisessa mahtuu työskentelemään 10 % enemmän työntekijöitä koska varastohuoneet on järjestetty tehokkaammin. Molemmat rakennukset saisivat kuitenkin saman  $SEC_{UR}$ -lukeman, vaikka toinen on selvästi tehokkaampi. Siksi yhdeksi mittariksi ehdotetaan yksinkertaisesti energiankulutuksen jakamista rakennuksessa vietetyillä henkilötunneilla ( $T_{hlö}$ ) eli *käytön energiaintensiteettiä* (*energy intensity of usage, EIU*)

$$EIU = \frac{E}{T_{hlö}}. \quad (3.10)$$

EIU korostaa energiankulutusta rakennuksen käyttäjää kohti ja huomioi siksi tilankäytön tehokkuuden erityisen hyvin. Toisaalta sen verrattavuus erityyppisten rakennusten kesken ei ole kovin hyvä. Lisäksi voidaan keskustella erittäin tiiviiden työ- ja asuinympäristöjen miellyttävyydestä. Siksi tätä energiatehokkuusmittaria on erityisesti syytä käyttää yhdessä ympäristön laadun mittarien kanssa.

### **Taloudellinen energiaintensiteetti**

Taloudellis-termodynaamisissa mittareissa tuotos mitataan sen markkina-arvolla ja energiankulutus fysikaalisilla yksiköillä (ks. kpl. Mittareiden määrittelyn periaatteet). Tällaisen mittarin mahdollisuus rakennusten tapauksessa riippuu siitä onko rakennuksen käyttäjälleen tuottamaa arvoa mahdollista mitata rahassa. Vuokrattujen rakennusten tapauksessa selvä ehdokas tällaiseksi mitaksi on luonnollisesti vuokra. Myös omistajiensa käyttämällä rakennuksilla on markkina-arvo, joka selviää myynnin yhteydessä. Muina aikoina niiden arvonmäärittämisessä voidaan käyttää verotusarvoja, tai se voidaan tehdä esimerkiksi vertaamalla samankaltaisten rakennusten myyntihintoja ja vuokria.

Jotkin rakennustyyppit, esimerkiksi eräät julkiset rakennukset, ovat hyvin harvoin kaupan. Niiden arvonmääritys on kenties hankalinta. Niiden tapauksessa voidaan käyttää karkeaa arviota tai taloudellinen mittaaminen voidaan yksinkertaisesti jättää tekemättä.

Hyvin toimivilla kiinteistömarkkinoilla rakennuksen omistamisen ja vuokraamisen kustannusten pitäisi olla samansuuruiset. Vuokra muodostuu siten, että se sisältää pääomakustannukset, verot, riskit, ylläpidon, ym. (KTI 2010). Siksi vuokraa tai samantapaisten rakennusten yleistä vuokratasoa ehdotetaan käytettäväksi rakennuksen taloudellisen arvon mittana tässä yhteydessä. Näin ollen *taloudellinen energiantensiteetti* (*economic energy intensity, EEI*) määritellään

$$EEI = \frac{E}{R}, \quad (3.11)$$

kun  $E$  on energiankulutus tarkasteluajanjaksolla, jolta maksetaan vuokra  $R$  euroissa mitattuna.

Tällaisen mittarin taustalla on ajatus, että vuokra määrittää eräänlaisen minimitason hyödyille, jonka vuokralainen katsoo rakennuksesta saavansa. Jos vuokralainen katsoisi maksavansa rakennuksesta enemmän kuin mitä siitä hyötyy, ei tämä pysyisi vuokralla siinä. Näin ollen EEI ainoana tässä mittarijoukossa antaa mahdollisuuden suhteuttaa energiankulutuksen sillä saavutettuun taloudelliseen hyötyyn, tai ainakin sen likiarvoon. Lisäetuna mittarilla on ainakin jonkinlainen verrattavuus talouden muiden sektoreiden energiatehokkuuteen.

EEI:n määritelmän mukaan korkeammasta vuokrasta seuraa korkeampi energiatehokkuus muuten samankaltaisille rakennuksille. Puhtaasti fyysisestä näkökulmasta tällainen tulos saattaa vaikuttaa järjettömältä. Taloudelliselta kannalta ihmisillä on kuitenkin jokin syy korkeamman vuokran maksamiseen. He kokevat saavansa vastineeksi jotain hyötyä, oli se sitten parempi sijainti, palvelutaso, maisema, ympäristöystävällisyys tai mikä tahansa muu. Jos samalla energiankulutuksella saavutetaan suurempi hyöty, lopputuloksen todella kuuluukin olla energiatehokkaampi.

EEI on taloudellis-termodynaaminen mittari. Jotta siitä saataisiin puhtaasti taloudellinen mittari, energiankulutusta tulisi myös mitata rahallisesti. Näin voidaan tehdä valitsemalla painotuskertoimeksi  $p$  energian hinta (ks. kaava 3.6). Näin mitaten voidaan arvioida energian kulutuksen kokonaistaloudellista järkevyyttä, verrattuna rakennuksesta saatuun taloudelliseen hyötyyn, olettaen että energian hinta todella määräytyy

kysynnän ja tarjonnan mukaan. Samalla rakennuksen käyttäjä saa tietoa energiamenon osuudesta rakennuksen kulurakenteesta.

Lopuksi on syytä huomauttaa, että läheskään kaikki energia ei rakennuksessa kulu rakennuksen itsensä tuottamien palveluiden tuottamiseen. Huomattava osuus energiasta käytetään rakennuksessa tapahtuvassa toiminnassa. Jos rakennuksessa harjoitetaan liiketoimintaa, syntyy arvoa ja aiheutuu kustannuksia, jotka eivät sisälly vuokraan. Liikerakennusten tapauksessa voikin olla järkevää käyttää muita taloudellisia tunnuslukuja, esim. liikevaihtoa, kuin vuokraa jakajassa, varsinkin jos liiketoiminta on energiainteensiivistä. Energian merkitys suhteessa muihin lopputuotteen tuottamiseen käytettyihin tuotannontekijöihin on kuitenkin hyvin vaikea määrittää. Siksi energiainteensiivisen liiketoiminnan tapauksessa EEI ei välttämättä ole toimiva indikaattori.

### **Energiasuorituskykyindeksi**

Vertailuanalyysi eli benchmarking mahdollistaa säästöpotentiaalien arvioimisen tavalla, joka ei ilmene suoraan muista mittareista. Tähän tarkoitukseen ehdotetaan *energiasuorituskykyindeksiä* (*energy performance index EPI*):

$$EPI = \frac{E_{\text{toteutunut}}}{E_{BAT}}, \quad (3.12)$$

jossa  $E_{\text{toteutunut}}$  on rakennuksen toteutunut energiankulutus ja  $E_{BAT}$  on samanlaisen parhaalla saatavissa olevalla teknologialla (*best available technology, BAT*) toteutetun rakennuksen energian kulutus optimaalisella huollolla ja tehokkaalla käytöllä. EPI saa yhtä suurempia arvoja kun rakennuksessa on tehokkuuden parantamisvaraa. Mitä suuremman arvon EPI saa, sitä enemmän parantamisen varaa on.

BAT käsitetään tässä yhteydessä teknologiana, joka on saatavilla markkinoilta ja jota voidaan soveltaa kohtuullisin taloudellisesti järkevin investoinnein. Tällä hetkellä saatavilla olevan teknologian tapauksessa rakennus kokonaisuutena on energian nettokuluttaja. Jos tulevaisuudessa kehitetään yleisesti saatavilla olevaksi teknologiaa, jolla päästään plusenergiarakennuksiin, yhtälö tuottaisi negatiivisia lukuja rakennuksille, jotka ovat energian nettokuluttajia. Tämä ei sinänsä ole ongelma, kunhan asia pidetään mielessä lukuja tulkittaessa. Jos  $E_{BAT}$  on nolla, EPI on määrittelemätön.

## Mittareiden valinta ja soveltaminen

Yleisesti ottaen sopivien energiatehokkuusmittareiden valitsemisen pitäisi perustua harkitulle tavoitteiden määrittelylle: miksi energiatehokkuutta mitataan? Minkä päätoimintojen avuksi mittareita käytetään? Esimerkkejä mahdollisista aihepiireistä, joissa mittareita voidaan soveltaa, on esitetty taulukossa 3.1. Samalla tulisi tehdä tarkastelun rajaukset mukaan lukien taserajat ja energiaketjun huomioiminen.

Taulukko 3.1. Esimerkkejä eri aihepiirien huomioimisesta mittarivalinnassa.

| Esimerkkejä aihepiireistä | Huomiointi mittarivalinnassa                     |
|---------------------------|--|
| Ympäristö                 | Ympäristöön liittyvät p-kertoimet, EPI           |
| Talous                    | Rahallinen p-kerroin, EEI                        |
| Parantamispotentiaali     | EPI  |
| Tilankäytön tehokkuus     | EIU, SEC <sub>UR</sub> , EEI                     |
| Elinkaari                 | Annualisoidut sitotutuneet energiat mukana E:ssa |
| Laatu                     | Mitataan erikseen                                |

Tässä esitettyjen mittareiden lisäksi muut energiatehokkuusmittarit saattavat mahdollistaa täydellisemmän kuvan muodostamisen useissa tapauksissa. Monissa rakennuksissa on tavallista, että yksi laite tai prosessi kuluttaa huomattavan osan energiasta. Esimerkiksi jäähallissa jäähdytyskone on merkittävä energiankuluttaja. Sellaisessa tapauksessa on järkevää erikseen mitata sen hyötysuhdetta, mikä voidaan hyvin liittää sovellettavien mittareiden joukkoon. Hyvin suuri joukko erilaisia energiatehokkuusmittareita käytettäväksi rakennuksissa ja niiden osissa on lueteltu esimerkiksi RET-projektissa (Heljo 2005).



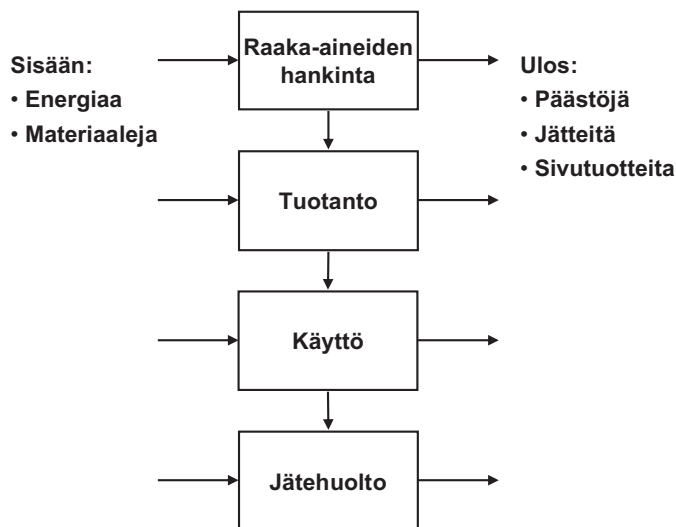
Kuva 3.4. Mittareiden soveltamisen esivalmistelut ja jälkitoimet.

Tavoitteiden määrittämisen jälkeen tulee koota kaikki tarpeellinen aineisto mukaan lukien kaikki energiavirrat ja sitoutuneet energiat, jotka on otettu mukaan tarkastelun

rajauksessa. Kun mittareita on sovellettu aineistoon, tulokset pitää tulkita jotta ilmiöt lukemien taustalla tulevat ymmärretyiksi. Lopuksi tunnistetaan energiatehokkuuden parannusmahdollisuudet. Tässä suositeltu ja kuvassa 3.4 esitetty mittareiden soveltamiskäytäntö perustuu LCA:ssa käytössä olevalle metodiikalle (ks. esim. Guinée 2002). LCA-metodiikkaa voidaan soveltaa laajemmaltikin mittareita käytettäessä.

## Mittarit ja elinkaari

Energiatehokkuuden mittaamisessa elinkaaren huomioiminen tulee väistämättä eteen. Energiaa kulutetaan aina tavaroiden ja palvelusten tuotannossa, tuotannon eri vaiheissa, hyödykkeitä käytettäessä ja niistä luovuttaessa. Jotta hyödykkeiden tarvitsema energia tulee oikein mitatuksi, täytyy mukaan laskea käytön lisäksi myös tuotanto, raaka-aineiden hankinta ja jätehuolto. Tällainen on se perusongelma, jota *elinkaariarviointi* (*life cycle assessments, LCA*) pyrkii ratkomaan kuvan 3.5 esittämällä tavalla.



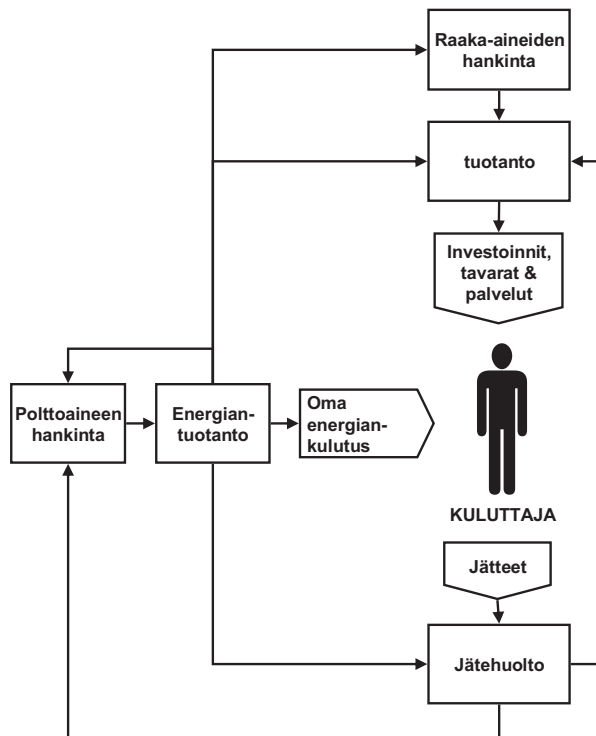
Kuva 3.5. Hyödykkeen elinkaaren tavanomainen esitystapa elinkaariarvioinnissa.

Energiatehokkuuden tapauksessa analyysiä helpottaa muiden tuotannontekijöiden kuin energian sulkeminen pois tarkastelun ulkopuolelle silloin kun niillä ei ole vaikutusta energiankulutukseen. Toisaalta analyysiä monimutkaistaa se, että kaikille hyödykkeen elinkaaren energiavirroille voidaan itselleen esittää tuotantoketju, joka muistuttaa kuvaa 3.5. Useimmissa tapauksissa raaka-aineiden hankinta on tarpeen jotta saadaan energiantuotannossa tarvittavaa polttoainetta. Energiantuotanto voimalaitok-



sessä tms. vastaa kuvan tuotanto-kohtaa. Energian tapauksessa ei käytön jälkeistä jätetuotantoa tarvita samassa mielessä kuin kouriintuntuvien tuotteiden kohdalla, sillä kaikki energia lopulta muuttuu lämmöksi.

Näin ollen energiatehokkuuden kohdalla elinkaariongelma on kuvassa 3.6 esitettyä muotoa. Kuluttajan omaa energiankulutusta täydentää tämän tekemien materiaalistien investointien (talo, ym.), tavaroiden ja palvelusten kuluttama energia. Kuvassa tavanomainen tuotteiden elinkaari on esitetty pystysuorana virtana, jonka keskiössä kuluttaja on, ja energiaketju on esitetty vaakasuorana energiavirtana. Tarkastelua monimutkaistaa se seikka, että osa kuluttajan jätteistä kierrätetään, mikä saattaa vähentää energiantarvetta ylävirtaan tuotantoketjussa. Osa jätteestä saatetaan myös käyttää suoraan energiantuotantoon.



Kuva 3.6. Tavanomainen elinkaaren esitystapa (pystysuora virta) täydennettynä energiaketjulla (vaakasuora).

Jos elinkaari koko monimutkaisuudessaan olisi tarpeen huomioida energiatehokkuutta mitattaessa, olisi tehtävä erittäin hankala. Siksi LCA:ssa tavallisesti tehdään ero analysoitavan järjestelmän ja tarkastelun ulkopuolelle rajattavan ympäristön välillä. Ympä-

ristön huomioinnissa riittää että käytetään keskiarvoja tai marginaalisia arvoja energia- ja materiaalivirtojen huomioimiseen. Tässä tarkastelussa analysoiden järjestelmän ja ympäristön rajaavat luvussa 3.2 esitetyt taserajat.

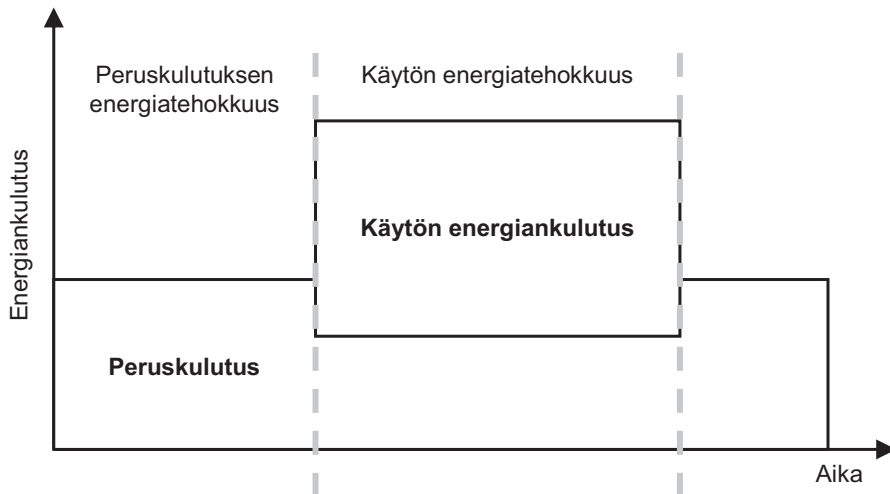
Rakennuksen elinkaarta tarkasteltaessa on syytä muistaa vanha sääntö, jonka mukaan suurin osa rakennuksen energiankulutuksesta lyödään lukkoon jo suunnitteluvaiheessa tehdyillä ratkaisuilla. Muutaman prosentin lisäpanostus rakennuskuluissa mahdollistaa merkittävät säästöt käytön aikaisessa energiankulutuksessa ja sen aiheuttamissa kuluissa.

### **Energian arvo mittaamisessa**

Energian arvo on myös syytä huomioida energiatehokkuutta mitattaessa. Energian arvoa voidaan mitata useilla eri perusteilla ja energiavirtojen arvottamatta jättäminen vastaa niiden arvottamista samanarvoisiksi, mikä sekkin on arvovalinta. Siksi kaikki energiavirtojen arvottamiset, tai sen tekemättä jättäminen, tulee aina perustella energiatehokkuutta mitattaessa. Energian arvoa käsitellään laajemmin luvussa Energiankulutuksen mittaaminen ja energian arvo.

### **Käyttöasteen merkitys**

Kuvan 3.7 mukaisesti rakennuksen energiankulutus koostuu käytöstä riippumattomasta *peruskulutuksesta* ja rakennuksen käytöstä johtuvasta käytön *energiankulutuksesta*. Peruskulutus muodostuu lämmityksestä, ilmanvaihdon minimitasosta, pumppujen ja joidenkin valojen energiankulutuksesta sekä muista vastaavista jatkuvasti käynnissä olevista energiapalveluista. Käytön energiankulutuksen aiheuttaa käyttäjien toiminta rakennuksessa: mm. valot, koneet ja laitteet sekä muutokset automaattisten järjestelmien kuten lämmityksen ja ilmanvaihdon toiminnassa. Käyttäjien lisäksi huoltotoimenpiteillä on merkittävää vaikutusta sekä peruskulutukseen, että käytön energiankulutukseen.



*Kuva 3.7. Peruskulutuksen ja käytön energiankulutuksen merkitys.*

Energiankulutuksen kuormilla on vaikutusta energiatehokkuuteen. Sekä itse peruskulutuksen että käytön energiankulutuksen tehokkuutta itsessään voidaan parantaa, mutta lisäksi rakennuksen käyttöasteen nostaminen voi parantaa energiatehokkuutta, kun puhtaan peruskulutuksen osuus pienenee. Tämä voidaan huomioida energiatehokkuuden mittareissa, kuten luvussa 'Käyttöasteella korjattu energian ominaiskulutus' on kerrottu. Lisäksi energiajärjestelmät täytyy mitoittaa kulutuksen ja eritoten huippukuorman mukaan. Näin ollen kulutuksen tasaaminen on itsessään tehokasta sekä lyhyellä aikavälillä – onhan huippukuorman tuotanto yleensä heikointa hyötysuhteeltaan – että pitkällä aikavälillä koska energiainfrastruktuuriin tarvitsee investoida vähemmän.

### 3.4 Potentiaalilaskennan periaatteet

Energiatehokkuuden määritelmää on käsitelty luvussa 3.3. Yleisesti ottaen taloudellinen energiatehokkuus tarkoittaa tietyn tavoitteen saavuttamiseen kulutetun energian määrää siten, että kun saman tavoitteen saavuttamiseksi on käytetty vähemmän energiaa, energiatehokkuus on parantunut.

Energiatehokkuuspotentiaali tarkoittaa kapean määritelmän mukaan jonkin hyödyn saavuttamiseksi käytetyn energiamäärän ja saman hyödyn saavuttamiseksi riittävän pienimmän mahdollisen energiamäärän erotusta. Tällöin ei kuitenkaan huomioida tarkasteltavan yhden kapean tavoitteen ulkopuolisia vaikutuksia: energiankulutus muualla taloudessa saattaa kasvaa tai muut tavoitellut hyödyt vähetä. Ajatellaan esimerkiksi autoa, jonka polttoaineenkulutus halutaan minimoida. Liiallisuuksiin vietyä lopputulos saattaa olla että käytetään energiaintensiivisiä materiaaleja jotka kumoavat polttoaineensäästön vaikutukset tai että autosta tulee niin kallis että sen ostajat joutuvat tinkimään muusta kulutuksestaan. Laajan määritelmän mukaan energiatehokkuuspotentiaali tarkoittaa jonkin hyödyn saavuttamiseksi käytetyn energiamäärän ja saman hyödyn saavuttamiseksi riittävän pienimmän mahdollisen energiamäärän erotusta, mukaan lukien muutokset muualla saavutetun hyödyn määrään ja energian kulutukseen.

|                | Pieni muutos   | Suuri muutos   |
|----------------|--|--|
| Lyhyt aikaväli | <p><b>Energiankulutus:</b><br/>kaikki energiavirrat ja sitoutunut energia keskimääräisin primäärienergiakertoimin.</p> <p><b>Taloudellisuus:</b><br/>kannattavuuslaskelma.</p> | <p><b>Energiankulutus:</b> kuten pienessä muutoksessa, mutta marginaalisin kertoimin</p> <p><b>Taloudellisuus:</b><br/>kannattavuuslaskelma.</p>   |
| Pitkä aikaväli |  | <p><b>Energiankulutus:</b><br/>skenaariotarkastelu tai muu tapa huomioida energiajärjestelmän muutokset.</p> <p><b>Taloudellisuus:</b><br/>Kansantaloudellisten vaikutusten arviointi mallintamalla tms.</p> |

Kuva 3.8. Energiankulutuksen ja taloudellisuuden huomioiminen eri tarkasteluissa.

Energiankulutuksen ja taloudellisuuden huomioimisen suositellut tavat on esitetty kuvassa 3.8. Jos tarkastelu tehdään yksittäisen rakennuksen tai niin pienen määrän rakennuksia mittakaavassa, ettei järjestelmätason muutoksia ole odotettavissa, tarpeeksi laaja tarkastelu energiatehokkuuspotentiaalin laskemiseksi saavutetaan, kun huolehditaan että mukana ovat kaikki energiavirrat, mukaan lukien sitoutunut energia, ja harkituille energiatehokkuusparannuksille tehdään kannattavuuslaskelma. Myös energian arvo tulee huomioida luvussa 'Energiakulutuksen mittaaminen ja energian arvo' esitetyllä tavalla. Sopiva primäärienergiakerroin on keskimääräinen kerroin, koska muutosten vaikutuksen odotetaan jäävän niin pieneksi että vaikutus kokonaisuuteen on häviävä. Energiatehokkuuspotentiaalin esittämiseen sopii tällöin aiemmin esitetty 'Energiatehokkuus suorituskykyindeksi'.

Laajemmassa mittakaavassa, kun muutoksia voidaan odottaa järjestelmätasolla esimerkiksi voimalaitosten ajojärjestyksessä tms., täytyy edellä mainittujen toimenpiteiden lisäksi arvioida muutoksia järjestelmätasolla ja sen vaikutuksia. Lyhyellä aikavälillä energian kulutuksen primäärienergiakertoimina täytyy käyttää marginaalisia kertoimia, jotta muutokset energijärjestelmän toiminnassa huomioitaisiin. Pitkällä aikavälillä täytyy huomioida myös energijärjestelmän sopeutuminen uuteen tilanteeseen. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi skenaariotarkasteluna. Taloudelliset vaikutukset tulee myös arvioida, esimerkiksi kansantalousmallilla. Energiatehokkuustoimien kannattavuutta ja toimivuutta arvioitaessa on syytä huomioida myös eräitä taloudellisia ilmiöitä:

- Ulkoiskustannukset, eli kustannukset jotka koituvat energiankäytöstä muille kuin siitä hyötyville ihmisille. Esimerkiksi päästöjen aiheuttamat terveys- ja ympäristöhaitat ovat ulkoiskustannuksia. Monien energianlähteiden kohdalla ulkoiskustannusten rahallinen arvo voi ylittää energian markkinahinnan. Lisäksi on hyödyllisiä ulkoisvaikutuksia. Esimerkiksi uutta tekniikka sovellettaessa pioneerikäyttäjien hankkima kokemusperäinen oppimishyöty on muidenkin käytettävissä, mutta pioneerikäyttäjät eivät saa siitä korvausta. Positiiviset ja negatiiviset ulkoisvaikutukset huomioiden monet energiatehokkuusinvestoinnit, jotka muuten olisivat kannattamattomia, ovatkin kannattavia.
- Rebound-efekti eli energiankulutuksen kasvu, joka on seurausta energiatehokkuuden paranemisesta. Syytä ilmiölle on monia: tehokkuus voi pienentää energiaintensiivisten tuotteiden hintaa, mikä kasvattaa niiden kysyntää, tai tehokkuuden paraneminen voi lisätä käytettävissä olevien tulojen määrää, mikä lisää kulutusta jne. Rebound-efekti voi olla suurempi tai pienempi kuin alun perin saavutettu energiansäästö.

- Energiatehokkuus suojautumiskeinona hintariskiä vastaan. Energiatehokkuusinvestointia voidaan pitää kertamaksuna, jolla energiakustannusten osuutta tulevissa menoissa pienennetään. Samalla pienenee tulevan menorakenteen herkkyys muutoksille energian hinnoissa. Tässä mielessä energiaterhokkuusinvestoinnit muistuttavat vakuutusta, jolla suojaudutaan hintariskiltä. Tämä vakuutusarvo jätetään usein huomiotta energiaterhokkuusinvestointien kannattavuuslaskennassa.

EPO-projektin yhteydessä on tehty tämäntapainen tarkastelu Suomen rakennusten lämmitysenergian teknisestä säästöpotentialista (Tuominen 2008c).

## 3.5 Johtopäätökset

### Päähavainnot

Rakennuksissa on suhteellisen suuri energiatehokkuuspotentiaali verrattuna muihin talouden sektoreihin johtuen osittain niiden suuresta osuudesta energiankulutuksesta ja osittain hyödyntämättömistä parantamismahdollisuuksista. Energiatehokkuuden mittarit ovat tarpeen sekä nykyisen energiatehokkuustason että parannuspotentiaalın arvioinnissa. Erilaisille mittareille on käyttöä eri käyttötarkoituksissa ja eri käyttäjille, riippuen heidän tarpeistaan ja tavoitteistaan. Universaalın mittarin kehittäminen kaikkiin tarkoituksiin ei ole mahdollista. Siksi tässä tutkimuksessa päädyttiin suosittelemaan mittarijoukkoa, josta valitaan oikea mittariyhdistelmä kuhunkin käyttötarkoitukseen. Energiatehokkuuden potentiaaleista Suomen rakennuskannassa on tämän tutkimuksen kuluessa tehty selvitys (Tuominen 2008c).

### Toimenpide-ehdotuksia

Rakennuksiin ehdotetaan käytettäväksi seuraavia energiatehokkuuden mittareita: energian ominaiskulutus (SEC), käyttöasteella korjattu energian ominaiskulutus (SEC<sub>UR</sub>), käytön energiaintensiteetti (EIU), taloudellinen energiaintensiteetti (EEI) ja energiasuorituskykyindeksi (EPI). Mittareiden kuvaukset ja käyttötapaehtoukset on esitetty luvussa 3.3. Energiatehokkuutta arvioitaessa tulisi ohessa arvioida myös toimenpiteiden taloudellisuus ja vaikutukset sisäympäristön laatuun.

Energiatehokkuuspotentiaalın arviointi riippuu tarkasteltavan kohteen mittakaavasta ja tarkasteltavasta aikavälistä. Pieniä muutoksia arvioitaessa riittää kun huomioidaan kaikki merkittävät energiavirrat ja sitoutunut energia sekä tehdään kannattavuuslaskelma. Sopivat primäärienergiakertoimet perustuvat keskiarvoille. Kun muutokset ovat tarpeeksi suuria, jotta niillä on järjestelmätason vaikutuksia, tulee primäärienergiaker-toimissa käyttää lyhyellä aikavälillä marginaalisia arvoja. Pitkällä aikavälillä täytyy huomioida energiajärjestelmän sopeutuminen, esimerkiksi skenaariotarkastelulla, ja taloudelliset vaikutukset, esimerkiksi kansantaloudellisella mallintamisella. Myös ulkoiskustannukset ja rebound-efekti on syytä ottaa mukaan tarkasteluun.

## Tutkimustarpeita

Energiatehokkuuden mittaamisen tutkimus on vasta alussa joten jatkotutkimustarpeita on runsaasti. Tutkimuksen kuluessa on tullut selväksi, että energiatehokkuuden mittaamisessa ja potentiaaliarvioinnissa on edelleen merkittävä perustutkimustarve. Käsitteistö, metodiikka, lähestymistapa ja muu tutkimuksen perusta kaipaavat edelleen työtä, jotta tutkimustulokset voivat saavuttaa parempaa yleistä hyväksyttävyyttä.

Toistaiseksi vähälle huomiolle jääneitä energiansäästöön vaikuttavia ilmiöitä ovat rebound-efekti sekä positiiviset ja negatiiviset ulkoisvaikutukset. Jotta energiansäästön lopulliset vaikutukset energiankulutukseen tunnettaisiin, on rebound-efekti otettava huomioon tutkimuksessa. Energiansäästön kokonaistaloudellisen kannattavuuden määrittämiseksi taasen ulkoiskustannusten selvittäminen on tarpeen.

Tässä tutkimuksessa laaditut energiatehokkuuden mittariehdotukset ovat hyvin yleisellä tasolla. Suositukset koskien niiden valintaa ja käyttötapaa erilaisissa käyttötarkoituksissa on luonteva jatkotutkimuksen aihe. Potentiaalilaskentamenetelmä vaatisi myös kehittämistä, etenkin järjestelmätason vaikutusten arvioimiseksi. Tätä varten yhdistetty jatkotutkimus, jossa on mukana rakennusten lisäksi ainakin yhdyskunnat ja energiajärjestelmä sekä mahdollisesti myös liikenne ja teollisuus, on tarpeen.



## Lähdeluettelo

APEC (2000), *Energy Efficiency Indicators*. Asia Pacific Energy Research Centre, Tokio.

EEA (2000), *Are we moving in the right direction?* European Environment Agency Environmental Issue Report No. 12, Kööpenhamina.

Euroopan komissio (2006), *Action Plan for Energy Efficiency: Realising the Potential*. COM(2006)545, Brysseli.

Guinée, J. (2002), *Handbook on Life Cycle Assessment*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Alankomaat.

Haas, R. (1997), Energy efficiency indicators in the residential sector. *Energy Polity*, Vol. 25, Nos. 7-9, pp. 789-802.

Hammond, G., Jones, G. (2007), *Inventory of Carbon & Energy*. University of Bath. <http://people.bath.ac.uk/cj219/>

Heljo, J. (2005), *Rakennusten energiatehokkuusindikaattoreiden kehittämisen perusperiaatteet*, Tampereen teknillinen yliopisto.

IEA (1997), *Indicators of Energy Use and Efficiency: Understanding the Link between Energy and Human Activity*. International Energy Agency, Pariisi.

IEA (2008), *Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency*. International Energy Agency, Pariisi.

IPCC (2007), *Summary for Policymakers – Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.

KTI (2010), *Vuokran muodostuminen*. KTI Kiinteistöalouden instituutti ry, Helsinki. [http://www.kti.fi/kti/doc/palvelut/kasitteet/vuokran\\_muodotuminen.pdf](http://www.kti.fi/kti/doc/palvelut/kasitteet/vuokran_muodotuminen.pdf)

Motiva (2007), *Energy Efficiency Policies and Measures in Finland*, Helsinki.

Motiva (2009), *Kulutuksen normeeraus*, <http://www.motiva.fi/kulutuksennormitus>

Patterson, M. (1996), What is energy efficiency? *Energy Policy*. Vol. 24, No. 5, pp. 377-390.

Tekes (2009), *Business Opportunities in the Mitigation of Climate Change 2004-2008*. Tekes Programme Report 4/2009.

Tilastokeskus (2009), *Buildings and free-time residences*. Tilasto saatavilla osoitteesta [http://www.stat.fi/til/rakke/index\\_en.html](http://www.stat.fi/til/rakke/index_en.html)

Tuominen, P. (2008a), *Energiatohokkuuden mittarit rakennuksissa*. EPO-projektin sisäinen raportti. Kirjallisuusselvitys 2.4.2008.

Tuominen, P. (2008b), *Allokaatio-ongelma kaukolämmön tuotannossa*. EPO-projektin sisäinen raportti. Kirjallisuusselvitys 15.4.2008.

Tuominen, P. (2008c), *The Potential Effects of Low Energy Buildings on the Finnish National Economy*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu.

UNSD (2009), *UNSD Environmental Indicators*. United Nations Statistical Division Environment Statistics. <http://unstats.un.org/unsd/ENVIRONMENT/qindicators.htm>

USDOE (1995), *Measuring Energy Efficiency in the United States' Economy: A Beginning*. Energy Consumption Series DOE/EIA-0555(95)/2, US Department of Energy, Washington, DC.

## **Liite B: Lista energiatehokkuuteen liittyvistä direktiiveistä**

EU:N DIREKTIIVIT EPO-TUTKIMUKSEN KONTEKSTISSA

Energiapalveludirektiivi (2006/32/EY)

Mittalaitedirektiivi (2004/22/EY)

Hyötylämmön tarpeeseen perustuvan CHP tuotannon edistäminen (2004/8/EY)

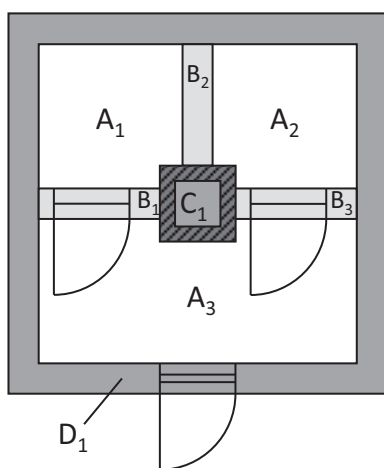
Kasvihuonekaasujen päästöoikeuksien kaupan järjestelmän toteuttamisen direktiivi (2003/87/EY)

Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi (2002/91/EY)

Sähkön tuotannon edistäminen uusiutuvista energialähteistä (2001/77/EY)

## Liite C: Rakennuksen pinta-alan mittaaminen

Lähde: Standardi SFS 5139 RT 12-10277 Rakennuksen pinta-alat



A<sub>1</sub> huoneala

A<sub>2</sub> huoneala

A<sub>3</sub> huoneala

B<sub>1</sub> rakennusosa-ala (ei kantava)

B<sub>2</sub> rakennusosa-ala (ei kantava)

B<sub>3</sub> rakennusosa-ala (ei kantava)

C<sub>1</sub> rakennusosa-ala

(runkorakennusosa, hormi)

D<sub>1</sub> rakennusosa-ala

(runkorakennusosa, ulkoseinä)

$A_1 + A_2 + A_3 + B_1 + B_2 + B_3 =$  huoneistoala

$A_1 + A_2 + A_3 + B_1 + B_2 + B_3 + C_1 + D_1 =$  kerrostasoala

Bruttoala = Kuvaa koko rakennuksen laajuutta. Bruttoala lasketaan rakennuksen kaikkien kerrostasojen kerrostasoalojen summana.

Asuntoala = Määritellään käyttötarkoituksen mukaan

Hyötyala = Tilaohjelmaan kuuluvien tilojen laajuus. Asuinhuoneistoissa huoneistoalana, muissa tiloissa huonealojen summana (sisäiset liikennetilat ja tekniset tilat ulkopuolella).

Kerrosala = Rakennuksen kerrosala on rakennusoikeuteen liittyvä käsite, jonka rakennuslain 131 a § määrittelee seuraavasti: ”Rakennuksen kerrosalaan luetaan kerrosten alat ja se ullakon ala, johon sijoitetaan asuin- ja työhuoneita taikka rakennuksen pääkäyttötarkoituksenmukaisia tiloja, sekä se kellarikerroksen ala, johon sijoitetaan työhuoneita tai rakennuksen pääasiallisen käyttötarkoituksen mukaisia tiloja”.

## 4. Logistiikka

Hanna Kalenoja, Erika Kallionpää ja Jarkko Rantala

TTY Tiedonhallinnan ja logistiikan laitos

## Tiivistelmä

Tämä raportti on tiivistelmä tutkimustuloksista ja tämän hetken käytännöistä energiatehokkuuden mittaamisesta ja arvioinnista logistiikkasektorilla. Logistiikassa energiatehokkuuden tai energiankulutuksen mittaamiseen ei ole vielä vakiintunutta käytäntöä ja tarkastelut on tyypillisimmin rajattu tuotteiden kuljetusketjuihin. Koko toimitusketjun kattava taserajaus sisältää raaka-aineiden hankinnan ja tuotannon, raaka-aineiden ja välituotteiden tulologistiikan, tuotannon, lähtölogistiikan sekä tuotteiden toimituksen asiakkaalle.

Teollisuusyritykset tarkastelevat logistiikan energiatehokkuutta tyypillisimmin taserajalla, joka kattaa tuotannon ja lähtölogistiikan. Energiatehokkuuden määritelmää olisi mahdollisuuksien mukaan toimitusketjujen tarkastelussa laajennettava kattamaan myös hankintaprosessi raaka-aineesta mahdollisiin välituotteisiin ja hankintalogistiikka. Tällöin energiatehokkuustarkastelu kattaa koko toimitusketjun ja sisältää myös markkinoinnin, toimitukset loppuasiakkaille ja paluulogistiikan.

Logistiikan energiatehokkuutta on tyypillisimmin mitattu kuljetussuoritepohjaisilla mittareilla, kuten kuljetusten energiankulutuksella. Toimitusketjun tasolla on tarpeellista laskea yhteen toimitusketjun eri osien energiankulutusarvoja, jolloin on mahdollista tarkastella koko logistisen ketjun energiatehokkuutta. Kumulatiiviset energiankulutusarvot ja hiilidioksidipäästöt soveltuvat hyvin energiatehokkuuden mittaamiseen ja niiden avulla on mahdollista tunnistaa eniten energiaa kuluttavia toimitusketjun osia ja energiatehokkuustoimenpiteitä. Logistiikan energiatehokkuustoimenpiteet kohdentuvat tuotesuunnitteluun, tuotannon suunnitteluun sekä lähtö- ja tulologistiikan suunnitteluun.

## **Abstract**

In the logistics there is not an established practice for the measurement of energy efficiency. Traditionally the focus of environment effects of logistics has been on transport chains of products. The system boundaries for whole supply chain include raw material acquisition and production, inbound logistics of raw material and intermediate products, production, outbound logistics and the delivery of the products to the customers. Many of the relevant measures to evaluate the energy efficiency of logistics are typically based on transport mileage, like energy consumption of transport chains. It is often necessary to sum up the energy consumption values from different phases of supply chain in order to be able to examine the energy efficiency of the whole supply chain. According to the results the cumulative energy consumption values and carbon dioxide emissions suit well as measures of the energy efficiency of supply chains. With these indicators it is possible to identify the supply chain phases, which consume most energy and also identify the energy efficiency measures. Energy efficiency actions in logistics focus on product design, production planning and on the inbound and outbound logistics.

## Symboliluettelo ja lyhenteiden selitykset

|                        |   |
|------------------------|---|
| BSC                    | Balanced Scorecard System   |
| E <sub>hankinta</sub>  | hankinnan ja tulologistiikan energiankulutus  |
| E <sub>tuotanto</sub>  | tuotannon energiankulutus   |
| E <sub>jakelu</sub>    | jakeluketjun (lähtölogistiikka) energiankulutus   |
| E <sub>paluu</sub>     | paluulogistiikan energiankulutus  |
| EPO                    | Energiatehokkuuden mittarit ja potentiaalit   |
| EPD                    | Environmental Product Declaration - tuotteen ympäristötuoteselostus   |
| GSCM                   | Green Supply Chain Management - ympäristöyöitäinen toimitusketjun hallinta  |
| kuljetusintensiiteetti | kuljetussuoritteiden määrä tuotteen määrää tai tuotteen arvoa kohti laskettuna (tonnikilometriä/euro, tonnikilometriä/tuotetonne) |
| kuljetussuorite        | kuljetettujen tonnien määrä x kuljetusetäisyys  |
| SCM                    | Supply Chain Management - toimitusketjun hallinta   |
| TEU                    | konttiliikenteen perusmittayksikkö, joka tarkoittaa ns. tavallista konttia (twenty foot equivalent unit)                          |
| TQM                    | Total Quality Management - kokonaisvaltainen laatujohtaminen  |



## 4.1 Johdanto

### Tavoite

Yritysten liiketoimintaympäristö on muuttunut nopeasti ja logististen prosessien hallinnasta on tullut yrityksille entistä tärkeämpi kilpailukeino. Talouskasvu ja toimintaympäristön muutokset lisäävät logistiikan merkitystä edelleen. Logistiikalla on kuitenkin vaikutuksia ympäristöön. Kun esimerkiksi toimitustiheyttä pyritään lisäämään, kuljetuserät pienenevät ja ajosuoritteet voivat kasvaa. Samalla kuljetusten energiankulutus ja päästöt kasvavat. Toisaalta taas tehokkaasti hoidettu logistiikka vähentää materiaalien tarvetta ja parantaa jakelujärjestelmän toimivuutta. Energiatehokkuudella voidaan vaikuttaa paitsi ympäristöön, myös syntyviin kustannuksiin.

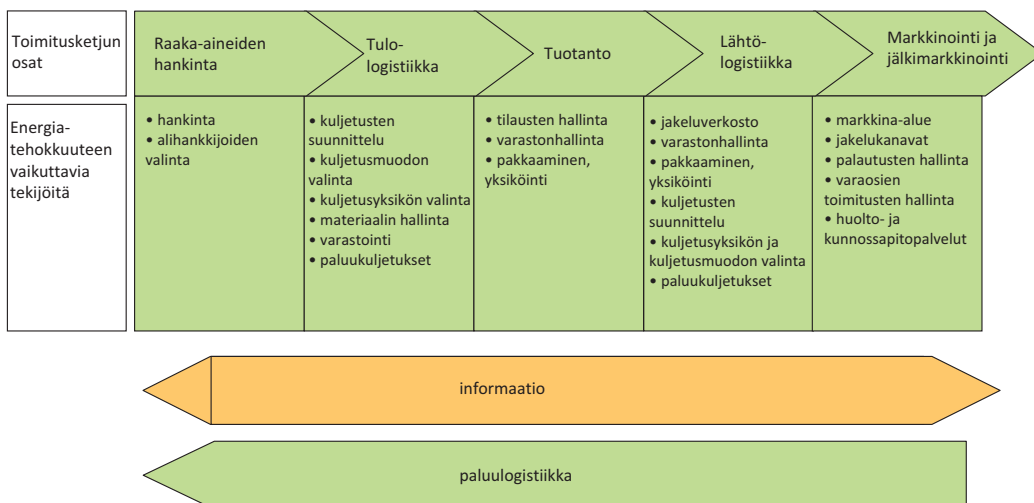
Kuljetukset ja niiden operaatioiden suunnittelu ja johtaminen on monissa yrityksissä osa laajempaa logistiikan strategista suunnittelua. Tämä mahdollistaa kuljetusten tehokkaamman koordinoinnin muiden logistiikan osa-alueiden kuten varastojohtamisen, tuotannon suunnittelun, tilausprosessin ja materiaalin käsittelyn kanssa. Siksi esimerkiksi kuljetusten ympäristövaikutuksia arvioitaessa on tärkeää ottaa huomioon sekä logistiikan yleiset trendit että ne ratkaisut, joita yritykset tekevät eri logististen osa-alueiden välillä. (Hensher ja Button 2003, McKinnon 2003)

Yhtenä tekijänä myös ilmastonmuutos on luonut uusia tavoitteita kuljetuspalvelujen kehittämiseksi Euroopassa. Hiilidioksidipäästöjen vähentämistavoitteet heijastuvat myös logistiikan kehittämissuuntauksiin (NTF Conference 2007). Logistiikan energiatehokkuutta on tähän mennessä mitattu lähinnä kuljetussuoritteena. Käytössä olevia kuljetusten energiatehokkuusindikaattoreita ovat mm. yksikköpäästökertoimet ja kuljetusintensivisyysluvut. Nämä indikaattorit eivät kuitenkaan yksin riitä kuvaamaan logistiikan koko energiatehokkuutta. Kokonaisvaltainen näkemys logistiikan energiatehokkuudesta saadaan ottamalla huomioon toisiinsa vuorovaikutussuhteessa olevat logistiikkaketjun eri toiminnot.

Hankkeen tavoitteena on ollut kehittää logistiikan energiatehokkuuden mittaamisen soveltuva mittaristo, jonka avulla on mahdollista arvioida energiatehokkuuden kehitystä sekä suunnitella logistiikan energiatehokkuutta parantavia toimenpiteitä. Logistiikan tutkimusosuuden päätulokset on koottu julkaisuun *Energiatehokkuus logistiikassa - Logistiikan energiatehokkuuden mittaaminen ja parantaminen*, joka on julkaistu liikenne- ja viestintäministeriön julkaisusarjassa.

## Kohteen kuvaus ja rajaukset

Energiatehokkuuteen vaikuttavia logistiikan osatekijöitä ovat muun muassa raaka-aineiden hankintaan, tuotantoon, varastointiin, kuljetuksiin, paluukuljetuksiin, markkinointiin ja jälkimarkkinointiin liittyvät toiminnot. Jotta energiatehokkuutta olisi mahdollista mitata ja tarkastella koko toimitusketjun aikana, toimitusketju on purettava yksityiskohtaisiin osiin. Teollisessa tuotannossa toimitusketjutarkasteluista tulee helposti erittäin laajoja, mikäli tarkastelu ulotetaan hankintalogistiikassa raaka-aineiden tuotantoon asti. Kuvassa 4.1 on kuvattuna energiatehokkuuden selittäviä tekijöitä toimitusketjun eri vaiheissa. Energiatehokkuuden kannalta on tärkeää huomata, että pienellä muutoksella yhdellä alueella voidaan vaikuttaa useampaan osatekijään ja saavuttaa sitä kautta merkittäviä etuja.



Kuva 4.1 Logistiikan energiatehokkuuden selittäviä tekijöitä.

## **Menetelmät**

Logistiikan energiatehokkuuden mittaamismenetelmiä ja kehittämistoimenpiteitä on kartoitettu kirjallisuustutkimuksella, joka on kohdennettu erityisesti energiatehokkuuden mittaamenetelmiin ja eri toimialoilla toteutettuihin logistiikan energiatehokkuuden kehittämistoimenpiteisiin. Työssä on laadittu kirjallisuustutkimukseen, case-tutkimuksiin ja asiantuntijahaastatteluihin perustuvat toimitusketjun mallit, joiden avulla on inventoitu logistiikan eri toimintojen energiantensiivisyyttä. Toimitusketjumallit kuvaavat tyypillisiä perusteollisuuden toimialojen logistiikan osa-alueita.

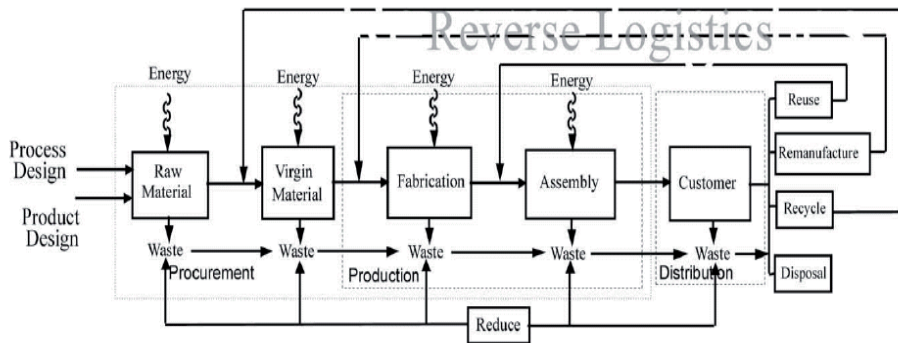
## 4.2 Taserajat

### Taserajat logistiikan energiatehokkuuden mittaamisessa

Energiatehokkuuden kokonaisvaltainen mittaaminen edellyttää, että käytössä on yhteinen eri toimialoille soveltuva mittaristo. Energiankulutuksen laskenta ja energiatehokkuuden mittaaminen ei ole täysin yksiselitteistä, vaikka primäärienergiankulutus olisikin määritettävissä. Energiatehokkuuden arviointi edellyttää laskennan taserajojen määrittämistä, jotta laskentaan sisältyisivät kaikki prosessin kannalta olennaiset vaiheet. Yleisesti erilaisten prosessien energiatehokkuuden laskennassa voidaan määrittää useita taserajoja riippuen siitä, miten energiatehokkuustarkastelu on rajattu (Tuomaala 2007).

Taserajojen määrittely on erityisen tärkeää silloin, kun tarkastellaan samanaikaisesti useita energiaa kuluttavia sektoreita, sillä sektorit ja niiden erilaiset toiminnot ovat useimmiten osittain päällekkäisiä. Taserajojen myötä on mahdollista välttyä siltä, että jokin prosessi tulee laskentaan useita kertoja, tai että jokin prosessi jää kokonaan laskennan ulkopuolelle. Lisäksi taserajat mahdollistavat eri sektoreiden vertailun.

Energiatehokkuutta on yleensä totuttu mittaamaan tuotantoprosessikohtaisesti, jossa rajaudutaan yleensä yhteen teollisuuslaitokseen. Logistiikan energiatehokkuuden mittaamisessa huomioon otetaan koko toimitusketju, jolloin mukaan tulevat myös muut logistiikan osatekijät. Kuvassa 4.2 on esitetty kuvaus organisatorisen toimitusketjun ja ympäristövaikutusten vuorovaikutuksesta. Kuvan mukainen toimitusketjun malli kuvaa yhden organisaation toimintaa ja liittämällä yhteen useiden organisaatioiden toimitusketjut voidaan kuvata organisaatioiden välisiä vuorovaikutuksia. Kuvan paluulogistiikkaa kuvaavat nuolet tuovat toimitusketjuun yleensä monia toimijoita. (Sarkis 2003)



Kuva 4.2 Toimitusketjun organisatorinen malli ympäristövaikutusten näkökulmasta. (Sarkis 2003)

Sarkis (2003) on tutkinut tuotteen elinkaaren ja ympäristömyötäisten toimenpiteiden vaikutusta yksittäisen organisaation näkökulmasta. Yhden organisaation toimitusketjun näkökulmasta toimitusketju sisältää hankinnan, tuotannon ja jakeluvaiheet. Hankinta sisältää raaka-aineiden tuotannon ja jalostuksen, tuotanto sisältää koko tuotteen tuotantoprosessin kokoonpanovaiheineen ja jakelu tuotteiden jakelun asiakkaille. Toimitusketjun mittaamisessa sovelletaan tyypillisesti monenlaisia suoritusmittareita, kuten kustannuksia, laatuindikaattoreita, joustavuutta, mutta myös ympäristövaikutuksia mittaavia indikaattoreita, kuten energiankulutusta ja hiilidioksidipäästöjä. (Sarkis 2003, Hervani et al. 2005)

### Logistiikan taserajat

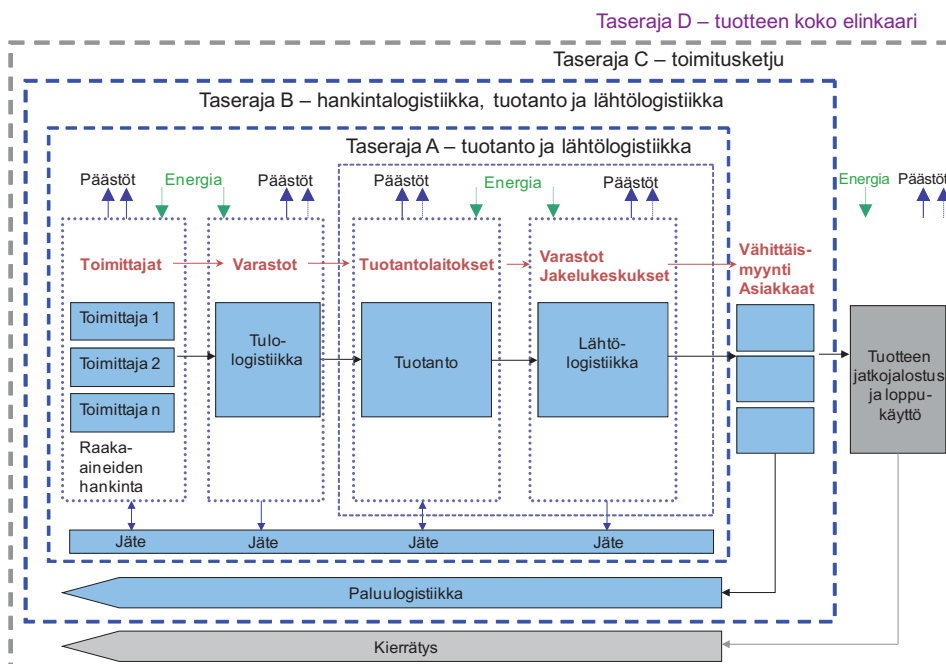
Kuvassa 4.3 on esitetty logistiikan energiatehokkuuden mittaamisen taserajat. Energia-  
tehokkuutta voidaan mitata neljällä erilaisella taserajalla:

- A - Tuotannon ja lähtölogistiikan taseraja
- B - Hankinnan, tuotannon ja lähtölogistiikan taseraja
- C - Toimitusketjun taseraja
- D - Tuotteen koko elinkaaren määrittämä taseraja

Teollisuusyritykset tarkastelevat energiatehokkuutta tyypillisimmin taserajalla A, joka koostuu tuotannosta ja lähtölogistiikasta. Koska raskas teollisuus on pääosin hyvin energiaintensiivistä, lähtölogistiikalla ei energiatehokkuuden mittaamisessa ole ollut kovin suurta painoarvoa. Monet vakiintuneet käytännöt, kuten päästökauppa ja standardit, rajaavat energiatehokkuustarkastelut ja hiilijalanjäljen laskennan tuotantoprosessiin. Tällöin lähtölogistiikkaan kohdistettuja energiatehokkuustoimia ei ole käytännössä edes mahdollista ottaa huomioon esimerkiksi osana päästökauppaa. Lähtölogistiikka on tuotannollisissa yrityksissä useimmiten osittain tai kokonaan ulkoistettu, mikä osaltaan vähentää yritysten kiinnostusta ja vaikutusmahdollisuutta logistiikan energiatehokkuuden kehittämiseen. Toisaalta suurten kuljetusvolyymien perusteellisuudessa kuljetusten ohjaus on teollisuuden omissa käsissä ja siten myös kiinnostuksen kohteena. Monissa tutkimuksissa (esimerkiksi Pohjola 1999) on havaittu, että yrityksillä on hyvä käsitys energiankulutuksesta taserajalla A, joka on tuotannollisille yrityksille usein luontevin raja energiatehokkuuden mittaamiselle.

Taseraja B laventaa energiatehokkuuden määritelmää kattamaan myös hankintaprosessin raaka-aineesta mahdollisiin välituotteisiin ja kattaa myös hankintalogistiikan. Tuotannollisilla yrityksillä on vain harvoin mahdollista liittää myös hankintaprosessi energiatehokkuustarkasteluihin. Kuljetustoiminnot ovat usein hankintalogistiikassa lähtölogistiikan tavoin ulkoistettuja, mutta kuten lähtölogistiikassakin esimerkiksi perusteellisuuden yritykset osallistuvat kuljetusten suunnitteluun ja ohjaukseen. Vaikka hankintavirroissa tuotteiden toimittajat vastaisivatkin kuljetusten järjestämisestä asiakkaalle, toimitusten reunaehdot tulevat silti pääsääntöisesti teollisuusyrityksiltä. Toimittajien valinta ja hankintatoimi yleensäkin on koettu yrityksissä tärkeäksi osa-alueeksi ja niihin liittyy usein myös tunnistettuja kehittämisalueita. Monet yritykset hyödyntävät tuotantoprosesseissaan jalostettuja raaka-aineita ja välituotteita, joilla on oma itsenäinen toimitusketjunsä. Taserajalla C energiatehokkuustarkastelu kattaa koko toimitusketjun ja sisältää myös markkinoinnin, toimitukset loppuasiakkaille ja paluulogistiikan. Energiatehokkuustarkastelun laajuuden kasvaessa laskennasta tulee yhä monimutkaisempi prosessi, johon sisältyvät kaikki toimitusketjun eri vaiheet raaka-aineesta asiakkaille tehtäviin toimituksiin asti.

Taseraja D sisältää koko toimitusketjun lisäksi tuotteen mahdollisen jatkojalostuksen ja koko elinkaaren aikaisen käytön sekä tuotteen käytöstä poiston ja kierrätyksen. Taseraja D edustaa tuotteen koko elinkaarta, jolloin tarkastelu edellyttää suhteellisen paljon lähtötietoja myös tuotteen käytöstä ja tuotteen käytöstä poistosta. (Hervani et al. 2005)



Kuva 4.3 Logistiikan energiatehokkuuden mittaamisen taserajat. (Kallionpää et al. 2010)

## Taserajojen liittymäkohdat muihin ryhmiin

### Teollisuus

Logistiikkasektorin taserajakuvauksella on tärkeä yhteys teollisuuden ja kaupan toimintasektoreihin, sillä toimitusketjun hallinnassa tehdyt päätökset kytkeytyvät tuotannon suunnittelussa tehtyihin ratkaisuihin. Vastaavasti hankinta- ja lähtölogistiikan toimintatavat heijastuvat tuotantoon. Logistiikan taseraja sisältää osaltaan teollisuuden, sillä ilman tuotannon sisällyttämistä taserajaan olennainen kaikkiiin toimitusketjun osiin vaikuttava vaihe jäisi pois laskennasta.

## **Rakennukset ja yhdyskunta**

Myös rakennusten energiatehokkuuden taserajoilla on yhtymäkohtia logistiikkasektoriin. Erityisesti varastoinnissa rakennusten energiankulutuksella voi olla huomattavakin merkitys, jos varastorakennus on lämmitetty, jäädytetty tai ilmastoitettu. Osaltaan yhtymäkohtia on havaittavissa myös yhdyskuntarakenteeseen, sillä alue- ja yhdyskuntarakenne määrittää erilaisten toimintojen sijoittumismahdollisuuksia ja vaikuttaa siten esimerkiksi kuljetustarpeisiin, eri kuljetusmuotojen toimintaedellytyksiin, kuljetusetäisyyksiin ja jakeluverkostorakenteeseen.

## **Energiajärjestelmä**

Logistiikkasektorin kytkeytyminen energiasektoriin on tunnistettavissa pääosin tuotannon kautta. Toisaalta yhteys on havaittavissa käännetysti siten, että energiajärjestelmien logistisissa prosesseissa erityisesti hankintaketjuissa logistiikan merkitys voi olla huomattavan suuri. Esimerkiksi bioenergian tuotannossa raaka-aineketjun logistiikka vaikuttaa huomattavasti koko toimitusketjun kumulatiiviseen energiankulutukseen.



## 4.3 Energiatehokkuuden mittarit

### Mittareiden määrittelyn periaatteet

Logistiikan toimialalla ei ole vakiintunutta tapaa mitata energiankulutusta tai energiatehokkuutta. Vakiintuneet toimitusketjun mittaamisen järjestelmät ovat keskittyneet kustannusten ja asiakastyytyväisyyden mittaamiseen erilaisin variaatioin. Yleisimmin energiatehokkuutta on mitattu rajaamalla tarkastelu kuljetusketjuihin koko toimitusketjun sijasta. Perinteisesti kuljetusketjujen ympäristövaikutusten tarkastelun painopiste on ollut toimitusketjujen keskeisten toimintojen analysoinnissa (Léonardi ja Baumgartner 2004). Siten suuri osa logistiikassa käytetyistä energiatehokkuuden mittareista on liittynyt kuljetussuoritteisiin ja kuljetusketjuihin.

Viime vuosina organisaatioiden ja toimitusketjun hallinnan suorituskyvyn mittaamiseen tutkimusalueena on kiinnitetty yhä enemmän huomiota. Erilaisia suorituskyky-mittareita on kehitetty eri toimialoja edustavissa yrityksissä. Toimitusketjun hallinnalla on ollut yhä merkittävämpi rooli yritysten strategioissa organisaatioiden tuottavuuden parantamiseksi. Empiirisiä analyysejä ja case-tutkimuksia toimitusketjun suorituskyvyn mittaamisesta ja mittareista on tehty verrattain vähän. (Gunasekaran et al. 2004)

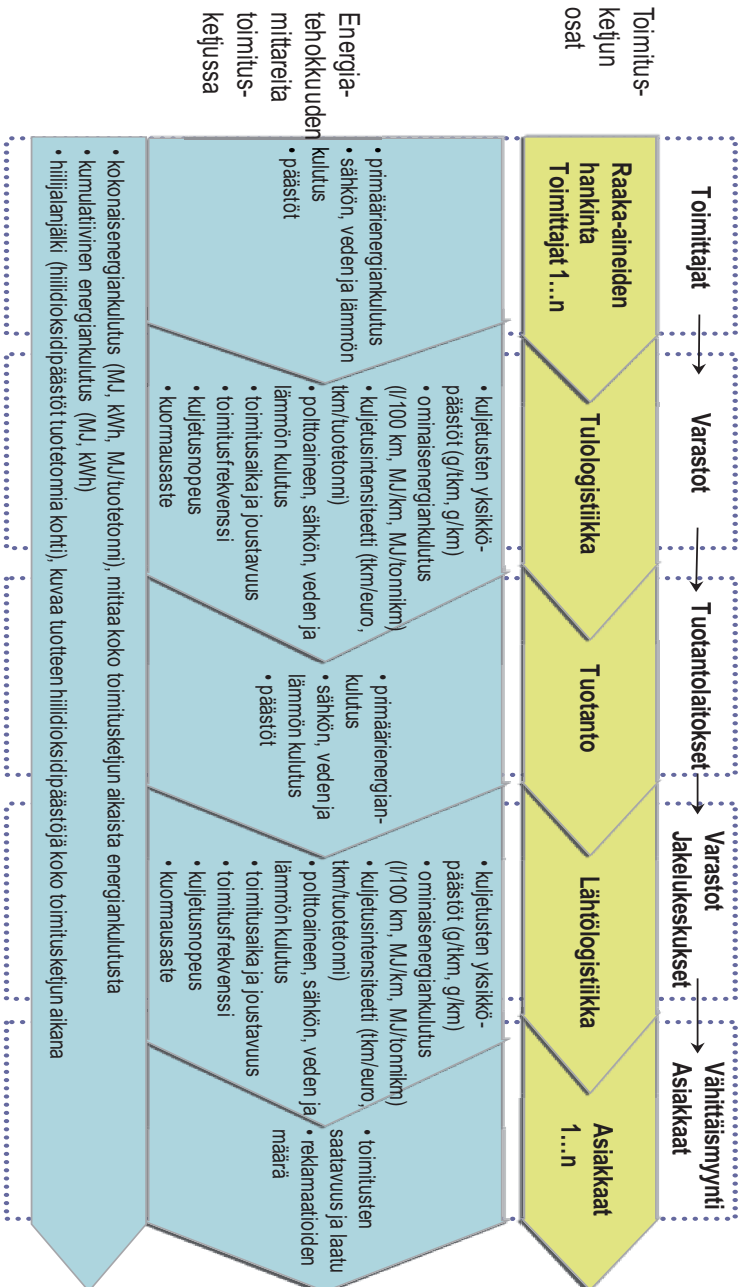
Toimitusketjun hallinnan mittarit voidaan jakaa strategisen tason, taktisen tason ja operatiivisen tason mittareihin. Monet mittarit vaikuttavat kaikilla näillä tasoilla ja koko toimitusketjun tarkastelu määrittää laajan joukon mittareita eri toiminnoista. Strategisen tason mittarit vaikuttavat ylimmän johdon päätöksiin ja ne heijastuvat yritysten rahoitussuunnitelmiin, kilpailukykyyn ja tavoitteisiin. Taktisen tason mittarit toimivat strategisen tason tavoitteiden varmistajina ja antavat palautetta keskitason johdon päätöksiin, mm. resursointiin. Operatiivisen tason mittareilla pyritään varmistamaan taktisen tason tavoitteita ja vaikutetaan päivittäiseen päätöksentekoon ja tavoitteisiin. (Gunasekaran et al. 2004).

Suorituskyvyn mittaaminen ympäristömyötäisen toimitusketjun hallinnassa, GSCM/PM (Green Supply Chain Management, Performance Management), on tarpeellista muun muassa kilpailullisista sekä säännöksiin ja markkinointiin liittyvistä syistä. GSCM/PM:n sovelluskohteita ovat ulkoinen raportointi, sisäinen kontrollointi ja analysointi. Mittaustulosten avulla yritykset voivat viestiä sidosryhmilleen tietoa toimintansa aiheuttamista ympäristövaikutuksista, etsiä parannusmahdollisuuksia esimerkiksi kier-

rätysmekanismeihin sekä seurata ympäristösäännösten noudattamista. (Hervani et al. 2005)

Toimitusketjun ja logistiikan energiatehokkuutta voidaan mitata usealla eri tavalla. Energiatehokkuutta voidaan mitata koko toimitusketjussa mittaamalla kukin toimitusketjun osa erikseen ja yhdistämällä tulokset yhdeksi tai useammaksi indikaattoriksi. Kokonaisvaltainen energiatehokkuuden mittaaminen on kuitenkin haastavaa, sillä toimitusketjut voivat olla monimutkaisia ja laajoja ketjuja tai verkostoja sisältäen useita eri partnereita ja toimintoja. Erilaisia ympäristövaikutuksiin ja energiatehokkuuteen liittyviä mittareita on käytössä useita, mutta varsinaista kokonaisvaltaista mittaristoa energiatehokkuuden mittaamiseen läpi toimitusketjun ei ole olemassa. Mittaamista ja mittareita voi olla myös hankala kohdistaa yhteen tiettyyn toimitusketjun osaan. Kokonaisvaltaisessa energiatehokkuuden laskennassa jokainen toimitusketjun osa tulee ottaa huomioon ja mittareiden tulisi kohdistua jokaiseen vaiheeseen. Toimitusketjujen osien integrointi helpottaa ja edesauttaa energiatehokkuuden mittaamista ja seuraamista.

Koko toimitusketjun energiatehokkuuden mittaamisessa yhdistetään hankintojen, tuotannon, varastoinnin, pakkausten, jakelun ja jätehuollon energiankulutus sähkön, lämmön ja veden kulutuksena sekä kuljetusten energiankulutuksena mitattuna. (Pohjola 1999) Kokonaisenergiankulutus voidaan määrittää myös asiakkaalle toimitettua tavaraa kohti (MJ/tuotetonni).



Kuva 4.4 Esimerkkejä logistiikan energiatehokkuuden mittareista toimitusketjun eri osissa. (Kallionpää et al. 2010)

Yleisesti ympäristöön liittyvät mittarit ovat tärkeitä johtamisen työkaluja arvioitaessa yhteiskuntavastuuta, ympäristövaikutuksia, suorituskykyä ja kustannuksia. Ympäristöön liittyviä suorituskykymittareita on kuvattu ISO 14301 -standardissa (environmental performance evaluation). Standardissa mainittuja energiaan liittyviä mittareita ovat mm. energiankulutus vuosittain tai tuotteittain, energiankulutus palvelua, asiakasta tai tuotettua tonnia kohden, tuotettujen palvelujen kumulatiivinen energiankulutus, energiankulutus primäärienergiaksi muutettuna, sivutuotteilla tuotettu energia tai prosesseilla ja energian säästöohjelmilla säästetty energia. (Hervani et al. 2005, Jasch 2000) Myös Toxic Release Inventory ja Global Reporting Initiative ovat koonneet ympäristöön liittyvän suorituskyvyn arviointiin käytettäviä erilaisia mittareita koskien muun muassa päästöjä, materiaalien käyttöä sekä panoksia ympäristöystävällisempien tuotteiden valmistamiseksi. (Hervani et al. 2005)

## **Logistiikan energiatehokkuuden mittarit**

### **Kuljetussuorite ja suoritekohtainen energiankulutus**

Kuljetusten rooli logistiikan ja toimitusketjujen energiatehokkuuden laskennassa ja tutkimuksissa on merkittävä. Hankinnan ja jakelun energiatehokkuutta voidaan mitata kuljetussuoritepohjaisilla mittareilla:

- *kuljetussuorite (tonnikilometrien määrä)*
- *ajosuoritekohtainen energiankulutus ( $E_{ajosuorite}$ , [litraa/100 km] [MJ/ajoneuvokm])*
- *kuljetussuoritekohtainen energiankulutus ( $E_{kuljetussuorite}$ , [MJ/tonnikm])*

Kuljetukset ja niiden energiatehokkuus onkin tärkeä osa logistiikkaa, mutta tarkasteltaessa koko toimitusketjun energiatehokkuutta ja sen parantamista, myös toimitusketjun osat ja toiminnot tulee ottaa huomioon.

Kansainvälinen EPD-järjestelmä (Environmental Product Declaration) sisältää määritelmän tuotteen ympäristövaikutusten laskemiseksi. Vielä toistaiseksi ympäristötuoteselostuksena sovellettu EPD ei ole sisältänyt kuljetusketjujen ympäristövaikutuksia, mutta myös kuljetukset on tavoitteena sisällyttää laskentaan. Kuljetuspalvelujen sisällyttämiseksi tuoteselostukseen on laadittu alustava suositus, jossa on esitetty mm. rajauksia päästöjen ja energiankulutuksen laskentaan. (EPD 2009)

Kuljetuspalvelujen laskentaan sisällytettäviin ydinprosesseihin kuuluvat kuljettaminen, kuljetusvälineiden ja kuormaussyksiköiden huolto ja kunnossapito sekä terminaalitoiminnot ja materiaalien siirto kuljetusketjun aikana. Hankintaprosesseihin kuuluvat EPD-taserajauksen mukaisesti liikennevälineiden ja pakkausyksiköiden tuotanto sekä tuotannon eri vaiheissa kulunut polttoaine ja sähköenergia siirtohäviöineen. Lähtölogistiikan prosesseihin kuuluvat ajoneuvojen ja pakkausyksiköiden käytöstä poisto, ajoneuvojen huollossa syntyneiden jätteiden käsittely ja pakkausjätteiden käsittely. (EPD 2009)

EPD-laskennassa sovelletaan yleisesti ”1 prosentin sääntöä”, jonka perusteella ne prosessien osat ja elinkaaren vaiheet, jotka vaikuttavat vähemmän kuin yhden prosentin verran tuotteen kokonaisympäristökuormitukseen, voidaan rajata pois laskennasta. Pois rajattujen prosessi- ja elinkaarivaiheiden yhteenlaskettu osuus ei kuitenkaan saa ylittää 10 prosenttia tuotteen koko ympäristökuormituksesta. EPD-järjestelmän laskentasuosituksissa on otettu kantaa myös kierrätyskuljetuksiin ja paluulogistiikkaan. Mikäli tuotantoon tai raaka-aineiden tuotantoon sisältyy kierrätysmateriaaleja, myös kierrätysprosessi siihen liittyvine kuljetuksineen tulee ottaa huomioon laskennassa. (EPD 2009)

### **Hiilidioksidipäästöt**

Logistiikan energiatehokkuutta on välillisesti mitattu myös hiilidioksidipäästöjen ja ominaisenergiankulutuksen avulla. Toimitusketjujen hallinnassa päästökertoimet ja energiatehokkuus voidaan suhteuttaa esimerkiksi materiaalitonniin määrään. (Aronsson ja Huge Brodin 2006)

Hiilijalanjäljellä tarkoitetaan tuotteen, tapahtuman, organisaation tai yksittäisen ihmisen tuottamien kasvihuonekaasupäästöjen määrää. Hiilijalanjäljen laskenta muistuttaa rajaukseltaan elinkaariarviointia. Hiilijalanjälki soveltuu hyvin tuotteiden välisten ilmastomuutosvaikutusten vertailuun ja erilaisten ilmastomuutosvaikutusta vähentävien toimenpiteiden suunnitteluun. Vielä tällä hetkellä hiilijalanjäljen mittaamiseen ei ole yhteisesti hyväksyttyä menetelmää ja erityisesti mittaamisen taserajat ovat epäselviä. Hiilijalanjälki on ääritapauksissaan voitu laskea ottamalla huomioon ainoastaan tuotteen välittömät hiilidioksidipäästöt tai laskemalla yksityiskohtaisesti tuotteen koko elinkaaren aikaiset välilliset tai välittömät hiilidioksidipäästöt. Ongelmallisin laskennan taserajaan liittyvä raja on, laajennetaanko hiilijalanjäljen laskenta tuotteen raaka-aineiden ja välituotteiden jalostuksen välillisiin hiilidioksidipäästöihin. Lisäksi vielä toistaiseksi ei ole yhtenevää käsitystä siitä, voidaanko laskenta rajata välittömiin tuotannon, prosessien tai yksilön toiminnasta aiheutuviin hiilidioksidipäästöihin. Parhail-

laan on valmisteilla tuotteille ja palveluille tarkoitettu hiilijalanjäljen laskentastandardi (ISO/CD 14067), jossa on kytkentä myös toimitusketjun vaikutusten arviointiin. (ISO 2011)

### **Toimitusaika ja toimitusnopeus**

Asiakastoiveiden täyttäminen ja tarpeisiin vastaaminen on logistiikan tärkeimpiä tavoitteita, jolloin toimitusajat, toimitustäsmällisyys ja toimitusvarmuus nousevat esille mitattavina laatutekijöinä. Toimitusaikaa ja toimitusnopeutta voidaan soveltaa myös välillisenä energiatehokkuuden mittarina. Kuljetusten joustavuus, saatavuus, täsmällisyys, toimitusvarmuus ja toimitusten laatu vaikuttavat myös energiatehokkuuteen. Kuormausaste voi myös kuvata energiatehokkuutta; mitä korkeampi kuormausaste, sitä parempi energiatehokkuus.

### **Kuljetusintensiteetti ja kuljetusjalanjälki**

Logistiikan välilliseksi energiatehokkuuden mittariksi soveltuu kuljetusintensiteetti, jolla tarkoitetaan toimialan tuotannon synnyttämien kotimaan kuljetussuoritteiden (tonnikm) suhdetta toimialan tuotannon arvonlisäykseen (euro):

$$\text{kuljetusintensiteetti} = \text{kuljetussuorite} / \text{toimialan tuotannon arvonlisäys} \quad (4.1)$$

Kuljetusintensiteetin yksikkö on tonnikilometri/euro. Kuljetusintensiteetti voidaan määrittää erikseen kuljetusmuodoittain, jolloin se on yhdistettävissä kuljetusmuoto-kohtaiseen energiankulutukseen. (Iikkanen 2004) Kuljetusintensiteetti voidaan ajatella myös kuljetusjalanjälkenä. Kuljetusjalanjälki kuvaa yhteen tuotetoniin sisältyvää koko toimitusketjun aikaista tonnikilometriä määrää:

$$\text{kuljetusjalanjälki} = \text{kuljetussuorite} / \text{tuotetonnien määrä} \quad (4.2)$$

Hiilidioksidijalanjälki on myös hyvä mittari energiatehokkuuden ja ympäristövaikutusten mittaamiseen. Hiilidioksidijalanjälki kuvaa toimitusketjun aikana syntyneiden suorien ja epäsuorien hiilidioksidipäästöjen määrää.

### **Muut mittarit**

Energiatehokkuuden mittaamisen näkökulmaa voidaan tarkastella erilaisten yrityksen strategisia valintoja korostavien tasapainotettujen mittaristojen kuten Balanced Scorecard -järjestelmän (BSC) avulla. Balanced scorecard on mittaamis- ja johtamistapa,

joka sisältää yrityksen strategisista painotuksista johdettuja sekä taloudellisia että operationaalisia ei-taloudellisia mittareita, joilla mitataan asiakastyytyväisyyttä, sisäisiä prosesseja ja organisaation innovaatiokykyä ja kehityskykyä. Mittarit pyrkivät antamaan johdolle kattavan yleiskuvan yrityksen tilasta kuvaten toiminnan tuloksia.

Balanced Scorecard koostuu tyypillisesti neljästä ulottuvuudesta, jotka ovat oppimisen ja kasvun näkökulma, taloudellinen näkökulma, asiakkaan näkökulma ja liiketoimintaprosessien näkökulma. Mittareiden kehittämisessä organisaatiota on analysoitava ja tietoa kerättävä kaikista näkökulmista. Balanced scorecardia on laajennettu käsittämään myös ympäristöllisen suorituskyvyn mittausta ja sitä voidaan hyödyntää myös energiatehokkuuden mittaamisessa. Järjestelmä voisi sisältää esimerkiksi seuraavia ympäristöön liittyviä mittareita: energiankulutus, kasvihuonekaasupäästöt, asiakaspalautukset ja kierrätystulot. Balanced scorecardia voidaan pitää lupaavana lähestymistapana, mikäli se toteutetaan tehokkaasti ja hyväksytään kaikissa organisaatioissa. (Hervani et al. 2005, Epstein ja Wishner 2001, Brewer ja Speh 2001)

Tsoufias ja Pappis (2008) kuvaavat erilaisia toimitusketjun hallinnan mittareita seuraavista toiminnoista ja perspektiiveistä: tuote- ja prosessisuunnittelu, tuotanto, pakkaaminen, kuljetus ja kerääminen, kierrätys ja tuotteen käytöstä poisto, ympäristönäkökulman huomioon ottaminen sisäisessä ja ulkoisessa liiketoiminnassa sekä muut johtamiseen liittyvät asiat. Energiatehokkuuteen liittyvistä mittareista he mainitsevat esimerkiksi kierrätettyjen materiaalien käytön osuuden ja polttoaineen kulutuksen jakelutoiminnoissa. Schwarz et al. (2002) korostavat toimitusketjun ympäristövaikutusten laskennassa mittareiden yhdistämistä eri toimitusketjun prosesseista. Perusmittarit ympäristömyötäisen toimitusketjun seurantaan ovat materiaali-intensiteetti, energiain-tensiteetti, veden kulutus ja päästöt.

### **Koko toimitusketjun energiatehokkuuden mittaaminen**

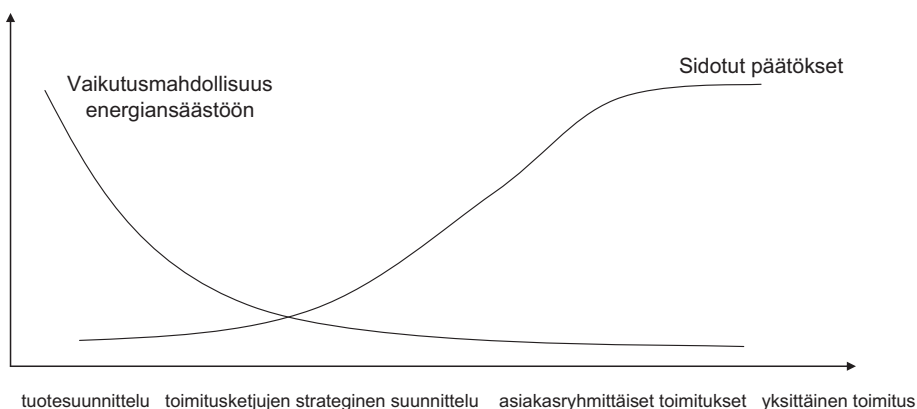
Koko toimitusketjun energiatehokkuuden (ET) tarkastelussa (yhtälö 4.3) on taseraja-tarkastelun mukaisesti (kuva 4.3) yhdistettävä toimitusketjun eri vaiheiden energian-kulutus, joka mittaa kumulatiivisesti koko toimitusketjua:

$$ET_{\text{logistiikka}} = (E_{\text{hankinta}} + E_{\text{tuotanto}} + E_{\text{jakelu}} + E_{\text{paluu}}) / t_{\text{tuote}} \quad (4.3)$$

## Mittarit ja elinkaari

Energiatehokkuuden ja ympäristövaikutusten kannalta kuljetuksiin vaikuttavat merkittävimmät päätökset tehdään toimitusketjun suunnittelun ja tuotesuunnittelun tasoilla (Aronsson ja Huge Brodin 2006). Operatiivisella tasolla mahdollisuudet vaikuttaa toimitusketjun ympäristövaikutuksiin tai energiatehokkuuteen ovat rajallisemmat, koska päätöksenteko tällä tasolla liittyy pääasiassa kuljetusmuodon valinnan tarkasteluun ja usein yksittäiseen toimituserään. Strategisen tason päätöksenteko sisältää puolestaan näkökulmia liittyen palvelutasoon, toimitusaikoihin ja toimitustiheyteen, materiaalivirtojen yhdistämiseen, paluulogistiikan hallintaan, eri teollisuudenalojen liiketoimintamalleihin sekä jakelujärjestelmien järjestelmätason rakenteisiin.

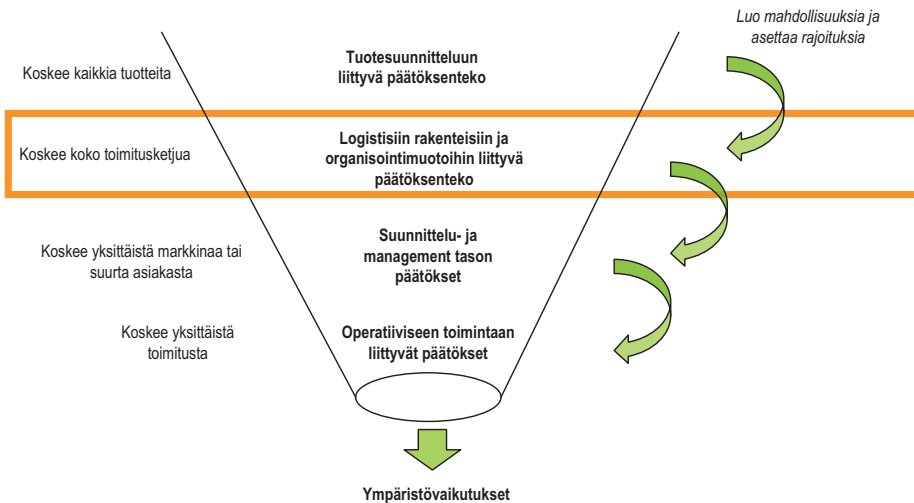
Kuvassa 4.5 on esitetty energiatehokkuuden elinkaarinäkökulma logistiikassa. Energiatehokkuuden parantamisen hierarkkiset toimenpiteet alkavat lyhyellä aikavälillä toteutettavista nykyisen toimitusketjun optimoinnista, jossa toteutusaikavälin voidaan arvioida olevan alle 5 vuotta. Toimitusketjun uudelleen suunnittelun ja esimerkiksi tuotesuunnittelun ja tuotannon suunnittelun toteuttamiseen kuuluu monia strategiseen päätöksentekoon liittyviä vaiheita, joiden läpivientiin kuluu tyypillisesti 5–15 vuotta. Toimintatapaa muuttavien innovaatioiden läpivientiin kuluu usein vuosikymmeniä. Operatiivisia tuotteen ympäristövaikutuksia vähentäviä toimenpiteitä on mahdollista toteuttaa niin lyhyen aikavälin operatiivisissa päätöksissä kuin pitkän aikavälin strategisissa päätöksissäkin. Ekotehokkuuden kehittämisen on ennakoitu edellyttävän toiminnallisia innovaatioita, jotka mahdollistavat kokonaan uusia toimintatapoja. (Tukker et al. 2001)



Kuva 4.5 Elinkaarinäkökulma logistiikan energiatehokkuudessa.



Logistiikan kehittämisessä on tunnistettavissa yritysten hierarkkiset päätöksentekoprosessit. Usein strategisella tasolla tehdyt päätökset rajaavat myöhemmissä vaiheissa tehtäviä taktisia ja operatiivisia päätöksiä. Kuva 4.6 esittää logistiikan osa-alueiden hierarkkisuuksi päätöksenteon näkökulmasta. Strategiset päätökset, jotka liittyvät esimerkiksi tuotesuunnitteluun ja tuotevalikoimaan, ohjaavat toimitusketjun rakennetta ja hallinnointia. Toimitusketjun rakenne puolestaan rajaa kuljetuserien, toimitustapojen ja yksittäisen kuljetuksen suunnittelun mahdollisuuksia. Siirryttäessä hierarkiatasolla alemmas mahdollisuudet energiatehokkuuden parantamiseen pienenevät. Energiatehokkuutta tulisikin tarkastella päätöksenteossa kaikilla hierarkiatasoilla samanaikaisesti kuin kustannuksia, aikaa ja muita palvelutasotekijöitä. (Aronsson ja Huge Brodin 2006)



Kuva 4.6 Logistiikan osa-alueiden hierarkkisuus. (Aronsson ja Huge Brodin 2006)

## Energian arvo mittaamisessa

Eri primäärienergianlähteillä tuotetun energian arvoja ei tulisi laskea yhteen, koska ne eivät ole aidosti summattavia. Logistiikan toimialan energiatehokkuuslaskelmissa on kuitenkin ollut välttämätöntä summata eri toimitusketjun osien energiankulutusarvoja, jotta koko ketjua olisi mahdollista tarkastella samanaikaisesti. Tällöin joudutaan laskemaan yhteen esimerkiksi tuotannossa kuluvaa sähköenergiaa, varastoinnissa kuluvaa lämpöenergiaa ja kuljettamisessa kuluvaa energiaa, vaikka primäärienergian lähteet ovat näissä energiankulutusvaiheissa erilaisia. Laskentatuloksista tulisikin aina olla jälkikäteen purettavissa energiankulutus primäärienergianlähteittäin.

## Käyttöasteen merkitys

Toimitusketjun ja erilaisten kuljetusketjujen energiankulutuksen laskenta sisältää aina epävarmuuksia, jotka liittyvät esimerkiksi käytettyyn ajoneuvotyyppiin, ajoneuvojen välisiin eroihin polttoainekulutuksessa ja ominaispäästöissä, kuljettajan ajotapaan, ajo-olosuhteisiin, käytetyn polttoaineen ominaisuuksiin, todelliseen kuljetusetäisyyteen, täyttöasteeseen ja kuormatilan allokointiin eri kuljetusasiakkaille. Parhaimmillaankin ympäristövaikutusten laskentaan käytettävät arvot ovat laajaan aineistoon perustuvia keskiarvoja, jotka kuvaavat karkealla tasolla eri kuljetusketjujen ympäristövaikutuksia. (Bäckström 2008)

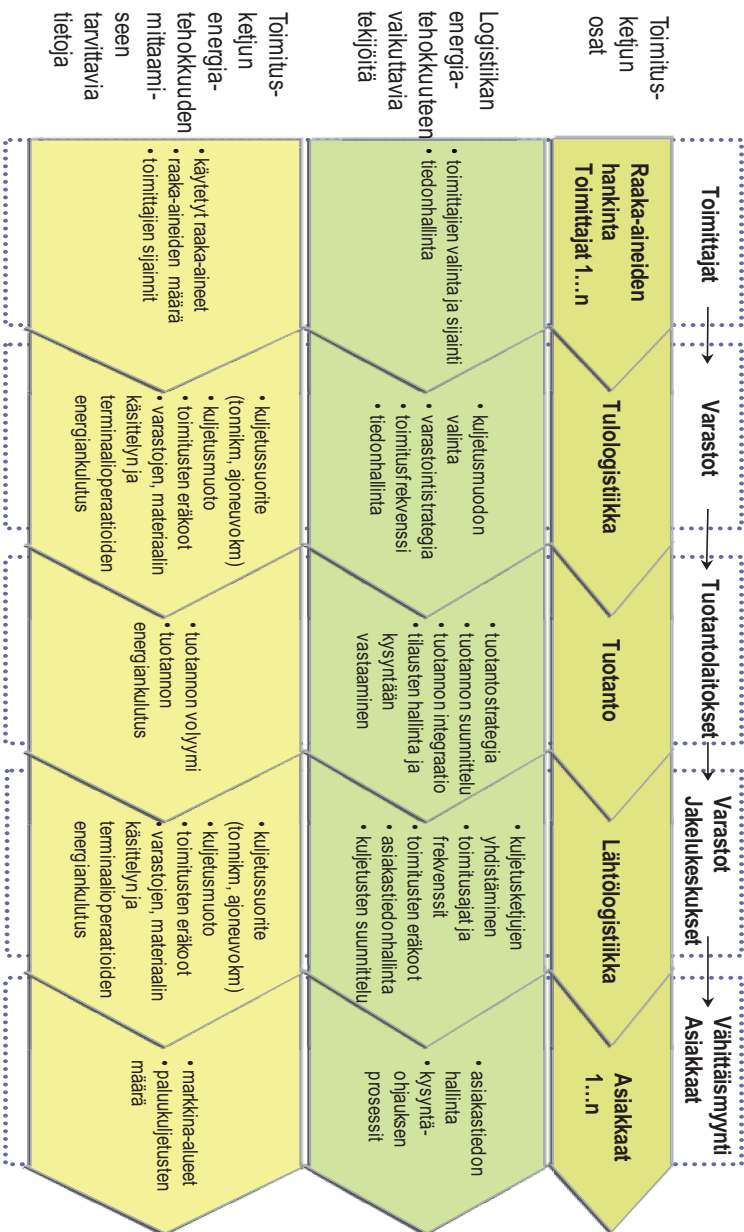
Kuljetusten kuormitusasteen laskennassa yleisesti mitoitettavat tekijät ovat (Bäckström 2008):

- jakelu – pinta-ala, tilavuus
- bulkkikuljetukset – kokonaisuudessa, tilavuus
- lentoliikenne – kokonaisuudessa
- konttikuljetukset – TEU-määrä
- RoRo-alukset – kuorma-auton tai perävaunun vaatima tila (pinta-ala).

Eurooppalainen CEN (European Committee for Standardization) on aloittanut kuljetusten energiankulutuksen ja kasvihuonekaasupäästöjen arviointia koskevan standardointityön vuonna 2008. Kuljetuksia käsittelevä standardi (CEN / TC 320 Methodology and calculation, declaration and reporting on energy consumption and GHG emissions in transport services) valmistuu vuonna 2011. Sen tavoitteena on luoda yhtenäiset laskentatavat ja käsitteet kuljetusketjujen tarkasteluun ja tuottaa tietoa hiilijalanjäljen laskentaan.

## 4.4 Potentiaalilaskennan periaatteet

Logistiikka on luonteeltaan välillinen toimiala, jonka energiatehokkuus riippuu ensisijaisesti teollisuuden ja kaupan toimintojen asettamista vaatimuksista. Kuljetustarve ratkaisee useimmiten lähtö- ja tulologistiikan energiantarpeen, sillä energiankulutus riippuu kuljetussuoritteiden lisäksi esimerkiksi käytettävästä kuljetusmuodosta ja toimitusten eräkoosta. Toimitusketjun eri osavaiheissa on useita energiatehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä (kuva 4.7). Energiatehokkuuden mittaamiseen liittyy monia rajauskysymyksiä, erityisesti ns. taserajan määrittämisessä (kuva 4.3), sillä koko toimitusketjun kattava tarkastelu lähestyy elinkaariarviointia. Laskennan tulokset riippuvat siitä, kuinka paljon välillisiä vaikutuksia laskennassa otetaan huomioon. Jos esimerkiksi toimitusketjujen energiankulutuslaskennassa kuljetusketjujen osalta huomioon otetaan myös liikenneinfrastruktuurin rakentaminen ja ylläpito sekä ajoneuvojen tuotanto ja huolto, energiankulutus on suurempi kuin otettaessa huomioon vain kuljetukseen kuluva energia.



Kuva 4.7 Esimerkkejä logistiikan energiatehokkuuteen vaikuttavista tekijöistä ja energiatehokkuuden mittaamiseen tarvittavista lähtötiedoista toimitusketjun eri osissa. (Kallionpää et al. 2010)

Logistiikan energiatehokkuuspotentiaali on toimialakohtainen, sillä esimerkiksi perusteellisuudessa tuotannon ja hankintalogistiikan osavaiheet korostuvat enemmän kuin kokoonpanoteollisuudessa ja kaupan logistiikassa, jossa puolestaan lähtölogistiikan merkitys on tyypillisesti suurempi. Perusteellisuudessa tulo- ja lähtölogistiikan energiatehokkuuspotentiaali oli tarkastelluissa case-yrityksissä suhteellisen pieni, sillä kuljetusketjuissa hyödynnetään jo nykyisellään energiatehokkaita kuljetusmuotoja ja kuormausasteet ovat bulkkikuljetuksissa keskimäärin suuria. Myös perusteellisuuden tulo- ja lähtölogistiikassa on kuljetusketjuvertailujen perusteella energiatehokkuuden kehittämispotentiaalia.

Case-tarkasteluiden (Kallionpää et al. 2010) perusteella paperi- ja metalliteollisuudessa raaka-aineiden hankinta ja vastaa 20–28 % tuotteen kokonaisenergiankulutuksesta ja tuotantovaiheen osuus on noin kaksi kolmasosaa energiankulutuksesta. Kuljetusten osuudeksi tarkastelluissa toimitusketjuissa muodostui 11–13 % koko energiankulutuksesta. Kirjallisuushavaintojen perusteella kaupan logistiikassa ja kokoonpanoteollisuudessa logistiikan energiatehokkuuspotentiaali on suurempi kuin perusteellisuuden toimitusketjuissa. Myös kokoonpanoteollisuudessa, elintarviketeollisuudessa ja huonekaluteollisuudessa kuljetusketjujen osuuden tuotteen kokonaisenergiankulutuksesta on havaittu olevan suurempi kuin metalli- ja paperiteollisuudessa.

Logistiikan energiatehokkuuspotentiaalin arvioinnissa on tunnistettavissa strateginen, taktinen ja operatiivinen aikaväli. Operatiivisella lyhyen aikavälin toimenpidetasolla energiatehokkuuspotentiaali liittyy lähinnä yksittäisten toimitusten kuljetusketjujen suunnitteluun, esimerkiksi kuljetusmuodon valintaan ja kuormausasteeseen. Taktisella ja strategisella tasolla painopiste siirtyy tuotannon ja hankintalogistiikan suunnitteluun, jossa tarkastelu laajenee väistämättä yhdestä toimitusketjusta toimitusketjujen muodostamaan verkostoon. Strategisella tasolla tehtävät valinnat, kuten esimerkiksi tuotantostrategia, hankintakanavien valinta ja raaka-aineiden toimittajien valinta, vaikuttavat koko toimitusketjun energiatehokkuuteen huomattavasti enemmän kuin operatiivisen tason toimenpiteet. Toimitusketjun teoreettinen energiatehokkuuspotentiaali on huomattavasti suurempi kuin taloudellinen potentiaali, sillä strategisissa valinnoissa painottuvat ensisijaisesti taloudellisuusnäkökulmat, joihin vaikuttavat energian hinnan lisäksi esimerkiksi toimitusketjun laatuvaatimukset.

Logistiikan energiatehokkuuspotentiaalin laskennassa on tärkeää tarkastella koko toimitusketjua, jolloin toimitusketjun eri osien vuorovaikutussuhteet on mahdollista ottaa huomioon potentiaalin laskennassa. Logistiikassa koko toimitusketjun energiatehokkuuspotentiaalia ei ole mahdollista laskea laskemalla yhteen eri osavaiheiden energian-

tehokkuuspotentiaaleja, koska osavaiheiden energiatehokkuus riippuu muista logistiikkaketjun osista. Logistiikan energiatehokkuuspotentiaalia ei olekaan mielekästä tarkastella minimoimalla yksittäisen toimitusketjun osan energiankulutusta, koska ketjun eri osat ovat vuorovaikutussuhteessa keskenään ja yksittäisen ketjun osan tarkastelu johtaisi kokonaisuuden kannalta epäedulliseen osaoptimointiin. Esimerkiksi minimoimalla lähtölogistiikan energiankulutusta voitaisiin teollisuudessa päätyä hankinta-alueen kaventamiseen muutamia lähellä sijaitseviin raaka-ainelähteisiin, joka vaikuttaisi osaltaan esimerkiksi tuotannon suunnitteluun ja sitä kautta tuotannon energiankulutukseen.

## 4.5 Johtopäätökset

### Päähavainnot

Energiatehokkuutta ei vielä yleisesti käytetä logistiikassa varsinaisena mittarina, mutta energiatehokkuuden merkitys logistiikassa on kasvanut muun muassa globalisaation ja ilmastonmuutoksen vaikutuksesta. Logistiikan energiatehokkuuden tarkasteluissa korostuu usein kuljetusten osuus ja niiden aiheuttamat päästöt. Kokonaisuuden kannalta on kuitenkin tärkeää, että energiatehokkuuslaskelmissa otetaan huomioon kuljetusten lisäksi myös muut toimitusketjun toiminnot hankinnasta aina lopputuotteen jakeluun asiakkaalle. Kuljetusten tarpeeseen ja määrään vaikuttamiseksi tarkastelun painopisteen tulisi olla yksittäisien toimitusten sijasta strategisten päätöksentekoprosessien tarkastelussa, koska kuljetukset ja niiden tarve perustuvat tuotesuunnittelun, tuotannon, toimitusten ja hankinnan prosesseihin. Toimitusketjun hierarkkisessa päätöksenteossa energiatehokkuuden kannalta tärkeimmät päätökset tehdään juuri tuotannon suunnittelussa ja tuotesuunnittelussa.

Energiatehokkuuden kokonaisvaltainen mittaaminen edellyttää, että käytössä on yhteinen eri toimialoille soveltuva mittaristo. Energiankulutuksen laskenta ei ole täysin yksiselitteistä, vaikka primäärienergiankulutus olisikin yksiselitteisesti määritettävissä. Energiatehokkuuden arviointi edellyttää laskennan taserajojen määrittämistä, jotta laskentaan sisältyisivät kaikki prosessin kannalta olennaiset vaiheet. Logistiikan mittaamisen taserajoissa on tunnistettavissa useita erilaisia rajauksia, joissa suppeimmillaan tarkastellaan lähtölogistiikkaa ja laajimmillaan koko toimitusketjua raaka-aineiden hankinnasta tulologistiikkaan, tuotantoon, lähtölogistiikkaan ja asiakastoimintuksiin asti.

Logistiikan energiatehokkuutta voidaan mitata esimerkiksi kokonaisenergiankulutuksena, hiilijalanjäljellä, polttoaineen kulutuksena, sähkön kulutuksena, veden kulutuksena, lämmön kulutuksena, kuljetusten yksikköpäästönä, ajoneuvokohtaisena energiankulutuksena, suoritekohtaisena ominaisenergiankulutuksena, toimitusaikana, toimitusfrekvenssinä, kuormausasteena, toimitusvarmuutta mittaamalla, kuljetussuoritteena tai kuljetusintensiteetin avulla. Vaikka logistiikan energiatehokkuuteen on olemassa erilaisia mittareita, koko toimitusketjun kattava mittaamisen menetelmä puuttuu. Koko toimitusketjun tarkastelu on tärkeää paitsi kokonaisuuden mittaamiseksi ja osaoptimoinnin välttämiseksi, myös energiaa kuluttavien osavaiheiden tunnistamisessa ja energiatehokkuustoimenpiteiden kohdistamisessa.

Logistiikan energiatehokkuuden mittaamisen tavoitteena on tuottaa tietoa koko toimitusketjun energiatehokkuudesta kattuen ketjun eri toiminnot, kuten hankinnan, kuljetamisen, tuotannon, varastoinnin jne. Kumulatiivinen energiankulutus soveltuu hyvin energiatehokkuuden indikaattoriksi, sillä se kuvaa energiankulutusta koko toimitusketjussa ja sen eri yksittäisissä osissa. Kumulatiivisia energiankulutuslukuja tarkasteltaessa on huomattava, että vaikka jonkin toiminnon osuus vaikuttaa kokonaiskulutukseen suhteutettuna pieneltä, voi yksittäisen toimitusketjun osan merkitys koko toimitusketjun energiatehokkuuden kannalta olla tärkeä. Mittaamisen onnistumisen kannalta tarkasteltavat toimitusketjut tulee kuvata tarkasti ja tarvittavia tietoja tulee kerätä toimitusketjun jokaiselta osalta.

Toimitusketjujen energiatehokkuuden mittaamisessa on tärkeää tunnistaa siihen liittyvät mittaamisen ongelmat. Jokainen yksittäinen mittari mittaa todellisuutta aina vaja-  
vaisesti, eivätkä ne yhteensä kuvaa kokonaisuutta välttämättä tarkasti. Mittareiden valintaan tulee myös kiinnittää huomiota, jotta mitataan oikeita asioita oikealla tavalla. Tuotekohtaisen koko toimitusketjun energiankulutuksen laskeminen edellyttää huolellista tarkastelua erityisesti toimitusketjun alkupäässä eli raaka-aineiden kuljetusten ja valmistuksen osalta, jotta energiankulutus voidaan kohdistaa oikein kullekin tuotteelle.

Laskentatulosten perusteella energiatehokkuuden kannalta edullisimmat toimitusketjut ovat yleensä myös kustannustehokkaimpia. Tyypillisesti ympäristövaikutusten vähentämistä tavoittelevat logistiikkaoperaattorit ovat myös tehokkaita kumppaneita prosessiteollisuuden yrityksille. Strategiset päätöksentekoprosessit korostuvat kustannustehokkaiden ja ympäristövastuullisten toimitusketjujen muodostamisessa.

## **Toimenpide-ehdotuksia**

Tärkeimmiksi logistiikan osa-alueiksi energiatehokkuuden kehittämisen näkökulmasta on tunnistettu raaka-aineiden hankinta, tuotantostrategia ja tuotannon suunnittelu, kuljetusten yhdistely, kuljetusmuodon valinta, pakkausten suunnittelu, tuotteiden kierätykset ja tiedon hallinta.

Toimitusketjun hierarkkisessa päätöksenteossa energiatehokkuuden kannalta tärkeimmät päätökset tehdään tuotannon suunnittelussa ja tuotesuunnittelussa. Energiatehokkuuden kannalta eniten potentiaalia on tuotesuunnittelussa, tuotannon suunnittelussa ja hankintaprosessien kehittämisessä. Metall- ja paperiteollisuudessa energiatehokkuuden kannalta tärkeimpiä toimia ovat hankintalogistiikan ja tuotannon suunnittelun toimenpiteet. Lähtölogistiikan ja kuljetusten suunnittelun merkitys jää perus-



teollisuudessa pienemmäksi kuin muiden toimenpideryhmien, mutta myös näiden alueiden toimenpiteillä voidaan vaikuttaa niin energiatehokkuuteen kuin kustannustehokkuuteenkin. Tulos ei ole suoraan yleistettävissä muille teollisuuden toimialoille.

## **Tutkimustarpeita**

Logistiikan energiatehokkuustutkimuksessa olisi tärkeää suunnata eri toimialoille toimitusketjun energiatehokkuustarkasteluja ja koota tehdyistä tarkasteluista toimialakohtaisia tunnuslukuja energiatehokkuustoimenpiteiden suunnitteluun. Tässä tutkimuksessa tehdyt perusteellisuuden case-tarkastelut osoittavat, että toimialakohtaiset erot toimitusketjun energiatehokkuudessa ovat huomattavan suuria. Eri toimialoilta saatavien esimerkkien perusteella olisi mahdollista muodostaa toimialakohtaisia toimitusketjun yleisiä kuvauksia, joiden avulla olisi mahdollista tunnistaa energiatehokkuuden parantamisen kannalta tärkeitä toimenpiteitä.

Jo nykyisin tarjolla on keskimääräisiä laskenta-arvoja sisältäviä arviointi- ja laskentatyökaluja kuljetusketjujen tarkasteluun, mutta muiden toimitusketjun osien energiankulutusarvoja ei ole vastaavalla tavalla saatavissa. Tämä helpottaisi myös toimialojen keskinäistä vertailua sekä eri toimialoille vakiintuneiden toimintatapojen energiatehokkuuden vertailun.

Globaalissa toimintaympäristössä toimitusketjuista muodostuu helposti hyvin monimutkaisia, sillä raaka-aineiden hankinta-alueet ja toisaalta valmiiden tuotteiden markkina-alueet ovat usein maailmanlaajuisia. Yleisten toimitusketjukuvausten avulla energiatehokkuustarkasteluja olisi karkealla tasolla mahdollista tehdä, vaikka koko toimitusketjun osalta lähtötietoja ei olisi käytettävissä.

## Lähdeluettelo

- Aronsson, H. & Huge Brodin, M. 2006. The environmental impact of changing logistics structures. *The International Journal of Logistics Management*. Vol. 17, No. 3, 2006. p. 394-415.
- Bäckström, S. 2008. Beräkning av miljödata för godstransporter. NTM Nordiska Nätverket för Transporter och Miljö.
- Brewer, P.C. & Speh, T.W. 2001. Adapting the balanced scorecard to supply chain management. *Supply Chain Management Review*, Vol. 5 No. 2, p. 48
- ISO, 2011. ISO/CD 14067 Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification and communication. International Organization for Standardization. Saatavilla <http://www.iso.org>.
- EPD 2009. Environmental Product Declaration. PCR Basic Module. CPC Division 65: Freight Transport Services. Version 1.0 Dated 2009-02-17. [www.environdec.com](http://www.environdec.com)
- Epstein, M.J. & Wisner, P.S. 2001. Using a Balanced Scorecard to Implement Sustainability. *Environmental Quality Management*. Winter 2001. Vol. 11, Iss. 2, pp 1-10.
- Gunasekaran, A., Patel, C. & McGaughey, Ronald E. 2004. A framework for supply chain performance measurement. *International Journal of Production Economics* 87 (2004). pp. 333-347.
- Hensher, D.A. & Button K.J. 2003. *Handbook of Transport and the Environment*. Elsevier Ltd. 2003.
- Hervani, A., Helms, M. & Sarkis, J. 2005. Performance measurement for green supply chain management. *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 12 No. 4, 2005 pp. 330-353.
- Iikkanen, P. 2004. Toimialojen kuljetusintensiteetit. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisu 26/2004. Helsinki.
- Jasch, C. 2000. Environmental performance evaluation and indicators. *Journal of Cleaner Production*, Vol 8, No. 1. pp. 79-88.

Kallionpää, E., Rantala, J. & Kalenoja, H. 2010. Energiatohokkuus logistiikassa – logistiikan energiatohokkuuden mittaaminen ja parantaminen. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 25/2010. Helsinki.

Léonardi, J. & Baumgartner, M. 2004. CO<sub>2</sub> efficiency in road freight transportation: Status quo, measures and potential. *Transportation Research Part D* 9 (2004). p. 451–464

McKinnon, A. 2003. Logistics and environment. In: Hensher D.A. and Button K.J. (editors): *Handbook of Transport and the Environment*. Elsevier Ltd. p. 665–685.

NTF Conference. 2007. Innovative Logistics – an answer to the environmental challenge?

Pohjola, T. 1999. Environmental modelling system – A framework for cost-effective environmental decision-making processes. *FEMDI Research Series* 12. Helsinki.

Sarkis, J. 2003. A strategic decision framework for green supply chain management. *Journal of Cleaner Production* 11 (2003) 397–409.

Schwarz, J., Beloff, B. & Beaver, E. 2002. Use Sustainability Metrics to Guide Decision-Making. *Chemical Engineering Progress*. Vol. 98, Issue 7, p. 58–63.

Tsoufias, G.T. & Pappis, C.P. 2008. A model for supply chains environmental performance analysis and decision making. *Journal of Cleaner Production*, Vol 16, pp. 1647–1657.

Tukker, A., Eder, P., Charter, M., Haag, E., Vercalsteren, A. & Wiedmann, T. 2001. Eco-design: The State of Implementation in Europe - Conclusions of a State of the Art Study for IPTS. *The Journal of Sustainable Product Design* 1: 147–161, 2001

Tuomaala, M. 2007. Conceptual Approach to Process Integration Efficiency. Doctoral dissertation. Otamedia. Espoo.

## **Logistiikan tutkimusosion julkaisut**

Kallionpää, E., Rantala, J. & Kalenoja, H. 2010. Energiatehokkuuss logistiikassa – logistiikan energiatehokkuuden mittaaminen ja parantaminen. Liikenne- ja viestintämministeriön julkaisuja 25/2010. Helsinki.

Kalenoja, Hanna, Kallionpää, Erika & Rantala, Jarkko. 2009. Measuring energy efficiency in supply chain management. Logistics Research Network Annual Conference 2009, 9th – 11th September 2009, Cardiff, UK.

Rantala, Jarkko, Kallionpää, Erika & Kalenoja, Hanna. 2009. Decision-making processes of energy efficient supply chains – Case study of heavy industry. Logistics Research Network Annual Conference 2009, 9th – 11th September 2009, Cardiff, UK.

Kalenoja, Hanna, Kallionpää, Erika & Rantala, Jarkko. 2011. Indicators of energy efficiency of supply chains. International Journal of Logistics. Vol. 14, No 2, April 2011, pp. 77–95.

## 5. Prosessiteollisuus

Mari Tuomaala ja Pekka Ahtila

Aalto-yliopisto, Energiatekniikan laitos

## Tiivistelmä

Teollisuudessa energiatehokkuutta mitataan lähinnä Ominaisenergiankulutusmittarin (engl. Specific Energy Consumption, SEC) ( $MWh/t_{tuote}$ ) ja Energiatehokkuusindeksin, EEI avulla. Ominaisenergiankulutusluku kuvaa energiankulutuksen muutoksia yhdessä valitussa kohteessa. Se ei sovellu hyvin eri prosessien vertailuun. Mittarin käytön haaste on sen kyvyttömyys tulkita energiatehokkuuden muutoksiin vaikuttavia tekijöitä. Energiatehokkuusindeksi suhteuttaa energiankulutuksen johonkin valittuun referenssiin, esim. laitoksen omaan parhaaseen suorituskykyyn. Indeksiä käytetään, kun halutaan seurata toteutunutta suhteessa tavoitteeseen.

Arviot teollisuuden energiansäästöpotentiaaleista perustuvat tällä hetkellä pääasiassa vertailuihin siitä, kuinka siirtyminen uuteen valmistusteknologiaan, energiatehokkaiisiin laitteisiin ja komponentteihin alentaisi kulutusta eri teollisuussektoreilla (esim. IEA, 2007). Energiansäästöpotentiaalien laskeminen on vielä vaikeaa. Tämä johtuu mm. siitä, että energiatehokkuus on osa muita tavoiteltavia ominaisuuksia (häiriötön tuotanto, tuotelaatu, jne.) eikä sitä siten voi tarkastella irrallaan näistä tekijöistä. Lisäksi laskennan ja kokonaisvaltaisen seurannan haasteita lisää prosessien integrointi. Integraatit rakentuvat laitteista ja osaprosesseista, joiden energiatehokkuutta seurataan. Tämän lisäksi saavutettuja säästöjä tulisi voida arvioida laajemmin koko tehtaan tasolla. Yksi tutkimuksen päähavainnoista on se, että prosessissa aikaansaadun lämmönsäästön kanavoituminen primäärienergia- ja CO<sub>2</sub>-säästökseen koko tehtaan tasolle on tapauskohtaista. Yksittäisien esimerkkitapauksien perusteella yleistäminen voi siten joko yliarvioida tai aliarvioida valtakunnan ja globaalien tason potentiaalia.

Prosessiteollisuuden energiatehokkuuden edistämisen kannalta on tärkeää, että prosessien mittaamisvalmiuksia tehostetaan edelleen, jotta saadaan täsmällistä tietoa prosessin nykytilasta ja sen suhteesta tavoitteisiin. Teollisuuden energiatehokkuuden mittaamisessa ja niiden kytkemisessä osaksi johtamista on vielä paljon kehitystyötä jäljellä. On tärkeää, että mittaamistavat ovat kansainvälisesti hyväksytyjä, jotta niitä voitaisiin käyttää laitosten välisen vertailun apuvälineenä.

## Abstract

This document describes the results from the process industry sector. In industry, energy efficiency is usually measured using the Specific energy consumption, SEC (MWh/t<sub>product</sub>) and Energy efficiency index, EEI. The indicator SEC describes the performance of the process in question. It cannot be recommended to be used as a basis for comparing various production processes. There are also some challenges in the use of the indicator SEC. One difficulty of the measure SEC is that it is affected by other factors such as the production rate. The Energy efficiency index is e.g. used in the follow up. Very typically the process performance is compared with a known reference, e.g. the best performance of the process.

Quantitative information of industrial energy efficiency potential is obtained mostly by studying how much savings would be achieved via technology changes and through use of energy efficient equipment and components (e.g. IEA, 2007). The challenge in calculating the energy efficiency potentials lie in a difficulty to optimize the energy efficiency as part of other target criteria, such as uninterrupted production and product quality. Also, the integration of processes causes challenges. Research findings indicate that e.g. heat-savings in processes accumulate to primary energy and CO<sub>2</sub> savings in a case-specific manner. Thus, scaling the analyses results obtained from single case studies may either under or overestimate the savings potential on a national and global level.

In practice, it is important to further enhance the process measurement capabilities in order to obtain accurate information about the energy efficiency and its relation to the targets. There are still many development needs related to energy efficiency indicators and their use as management tools. It is important that the indicators are widely accepted so that they can be used in industrial benchmarking.

## Symboliluettelo ja lyhenteiden selitykset

|          |  |
|----------|--|
| CHP      | Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto                 |
| EEI      | Energiätehokkuusindeksi (Energy efficiency index)    |
| kWh      | Kilowattitunti                                       |
| LCA      | Elinkaariarviointi (Life Cycle Assessment)           |
| SEC      | Ominaisenergiankulutus (Specific energy consumption) |
| Taseraja | 1. laskenta-alue. Lyh. sanasta energia- ja massatase |



## 5.1 Johdanto

### Tutkimuksen tausta ja tavoitteet

Euroopan komissio hyväksyi vuonna 2008 strategian ilmastotoimista. Sen mukaan jäsenvaltioiden tulee vähentää niiden yhteisiä kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 20 % ja lisätä uusiutuvien energialähteiden osuutta 20 %:in loppukulutuksesta vuoteen 2020 mennessä. Lisäksi Euroopan komissio on asettanut suuntaa antavan tavoitteen vähentää primäärienergian kulutusta 20 %:lla verrattuna vuoden 2020 ennakoituun energiankulutukseen. Tämä korostaa tarvetta parantaa energiatehokkuutta EU:ssa. Energiatehokkuuden mittaamiseksi ja tehostamispotentiaalien laskemiseksi ei ole kuitenkaan ollut yhteistä menetelmää. Tämän vuoksi tammikuussa 2008 käynnistettiin tutkimus Energiatehokkuuden mittarit ja potentiaalit, EPO edistämään tutkimusta tällä alueella (Tekes, 2009).

Tutkimuksen tavoitteeksi asetettiin: 1) kehittää yhdenmukainen, koko energiaketjun kattava energiatehokkuuden käsitteistö ja mittaristo, 2) luoda energiatehokkuuden potentiaalien laskentatapa, 3) laskea kehitetyn laskentatavan (1+2) avulla saavutettavissa oleva energiatehokkuuden tehostamispotentiaali, 4) tuottaa ehdotus tulevaisuuden kansalliseksi energiatehokkuuden painopistealueiksi ja luoda perusta uusille koko energiaketjua palveleville liiketoimintamalleille. Tutkimus kattoi sektorit: energiantuotanto, teollisuus, rakennukset, yhdyskunnat, liikenne ja logistiikka.

Ensimmäisen tutkimusvuoden jälkeen todettiin, että kokonaisuutta 3 (potentiaalinen laskenta) ei ole millään sektorilla realistista tavoitella alun perin kuvattuna kaltaisena. Tämä johtui siitä, että kehityksen todettiin olevan tavoiteosa-alueella 2 (potentiaalisten laskentamenetelmät) vasta alkutaipaleella. Potentiaalisten laskenta päätettiin toteuttaa case-laskelman omaisesti (ks. EPO-tutkimusraportti, osa 2).

Tämä raportti käsittelee osa-aluetta teollisuus ja lähinnä sen osakokonaisuutta prosessiteollisuus. Koko hankkeen tuloksia sektorikohtaisine eroavaisuuksineen on käsitelty tutkimuksen yhteenveto-osassa.

## **Prosessiteollisuussektorin tutkimus**

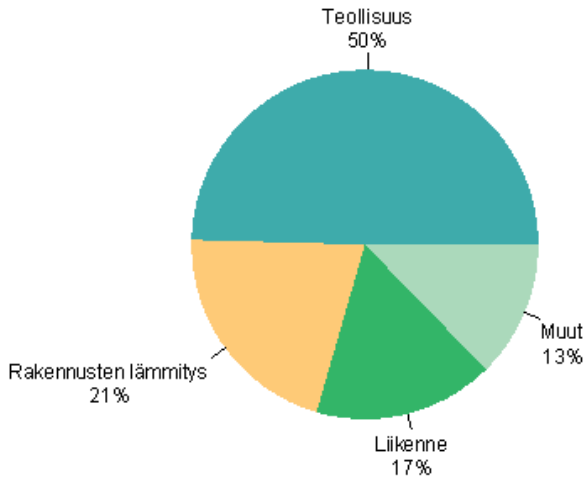
Prosessiteollisuudessa energiatehokkuutta mitataan yleensä käyttäen mittaria Ominaisenergiankulutus (specific energy consumption, SEC) tai käyttäen Energiatehokkuusindeksiä (energy efficiency index, EEI). Näihin liittyvä mittaamisen problematiikka on energiatehokkuustutkimuksessa pääpiirteissään tunnettu (Tutkimustavoite 1). Näin ollen teollisuuden osa-alueen tavoitteiksi asetettiin kattavan kehityksen tilaa ja tutkimushaasteita kuvaavan tilanneraportin tuottaminen (state-of-art). Samoin ovat tiedossa periaatteet ja haasteet liittyen potentiaalien laskentaan (Tutkimustavoite 2). Tämä osa-alue on tutkimuksellisesti varsin kesken ja haasteita on paljon. Tämän vuoksi tutkimusresurssit suunnattiin kyseisen osa-alueen kehittämiseen. Tavoitteena oli selvittää energiansäästön ja hiilidioksidipäästöjen toteutumisen mekanismeja prosessiteollisuuden tehdasintegraateissa. Tämä luo ymmärrystä koskien energiansäästöpotentiaalien laskentaa (Tutkimustavoite 3). Kattava tilanne-arvio on edellytys kansallisen tutkimuksen ja kehitystoimien painopisteiden arvioimiseen sekä niihin liittyvien alustavien johtopäätöksien tekemiseen koskien liiketoimintamalleja (Tutkimustavoite 4).

Teollisuuden energiatehokkuuden mittaustavat ovat jalostuneet etenkin benchmarking –tarpeisiin teollisuusaloittain. Esimerkkeinä voidaan mainita kemianteollisuuden benchmarking –organisaatiot Solomon Associates Inc. ja Philip Townsend Associates. Metsäteollisuuden benchmarking –työtä on kuvattu esimerkiksi lähteessä Francis ja Brownie (2008). Perinteisiä energiatehokkuuden tutkimussuuntia ovat laite- ja prosessikehitys sekä numeeristen analyysi- ja laskentatyökalujen kehitys ml. simulointi, matemaattinen ohjelmointi ja optimointi, tuotannonohjaus.

## **Kohteen kuvaus ja rajaukset**

Tämä tutkimus koskee energiatehokkuuden mittaamista energiantensiivisessä prosessiteollisuudessa. Pääpaino tarkasteluissa on metsäteollisuudessa ja terästeollisuudessa, mutta myös petrokemianteollisuutta tutkittiin.

Teollisuuden osuus on noin puolet (n. 50 %) koko Suomen energiankulutuksesta (kuva 5.1). Pääosa teollisuuden energiankäytöstä kohdistuu energiantensiiviseen teollisuuteen kuten massa- ja paperiteollisuuteen ja metallurgiseen teollisuuteen.



Kuva 5.1. Energian loppukäyttö sektoreittain vuonna 2008. Lähde: Tilastokeskus (2009).

## Menetelmät

Tutkimus aloitettiin tuottamalla kirjallisuuden avulla state-of-art kuvaus koskien prosessiteollisuuden energiatehokkuuden mittareista ja potentiaalien laskentaa. Kirjallisuustyön tarkoituksena oli tuottaa käsitys koskien energiatehokkuuden mittaamisen valmiustilaa.

Tutkimusresurssit suunnattiin aihealueeseen, jossa tiedetään olevan paljon kehitystyötä jäljellä. Näin ollen resurssit suunnattiin tutkimaan energiansäästön toteutumisen mekanismeja prosessiteollisuuden tehdasintegraateissa. Menetelmänä käytettiin case – tutkimusta, joiden yhteydessä tehtiin useita esimerkkilaskelmia. Case -tarkastelut on raportoitu tieteellisiin artikkeleihin, joista yhteinen johtopäätös on tiivistetty väitöskirjaksi (Siitonen, 2010). Tässä raportissa on viittauksia case-tutkimuksissa tehtyihin havaintoihin.

## 5.2 Taserajat

### Taserajat teollisuuden energiatehokkuuden mittaamisessa

Teollisuusprosessien (energia-) tehokkuuden mittaamisen lähtökohta on mittauskohteen määrittely ja rajaaminen (Tuomaala, 2007). Käytännössä rajaaminen ei aina ole yksiselitteistä. Esimerkiksi yksikköprosessien rajapinnat voivat olla epäselviä. Laskennan taserajojen asettaminen on yksi energiatehokkuuden mittaamisen haasteista (ks. kappale 5.3).

Mittaamisen taserajojen avulla määritellään arvioitava kohde. Se on merkityksellinen vaihe varsinkin, jos eri kohteista saatuja tuloksia halutaan vertailla keskenään. Vertailu on mielekästä vain silloin, kun kohteet ovat samankaltaisia. Tämä seikka korostuu, kun saman toimialan yrityksiä ja niiden osaprosesseja vertaillaan toisiinsa. Taserajoja tarkastelemalla voidaan havaita päällekkäisiä mittausalueita tai välttää katvealueita. Taserajojen määrittäminen on oleellista, kun halutaan määrittää tuotteiden valmistuksen vaatima energiankulutus tai valmistuksen aiheuttama CO<sub>2</sub> -päästö. Asian ajankohtaisuutta on kuvattu seuraavilla esimerkeillä:

- Tehtaan ominaisenergiankulutus (MWh/t<sub>tuotteet</sub>) saadaan jakamalla laitoksen kokonaisenergiankäyttö tuotannon määrällä. Ominaisenergiankulutuslukua voidaan pienentää siirtämällä esivalmistus- ja jatkokäsittelyvaiheita laskennan ulkopuolelle. Näin tapahtuu, jos tehdas siirtyy ostamaan puolivalmisteita sen sijaan, että valmistaisi ne itse.
- Tehtaan hiilidioksidipäästöön (esim. t<sub>CO<sub>2</sub>/a</sub>) tai tuotteen ominaishiilidioksiditehokkuuteen l. hiilijalanjälkeen (CO<sub>2</sub>/t<sub>tuote</sub>) voidaan vaikuttaa samalla tavoin kuin energiankäytön laskennassa. Suuri yksittäinen päätös on se, kuinka energiantuotannon päästöt huomioidaan laskelmissa.

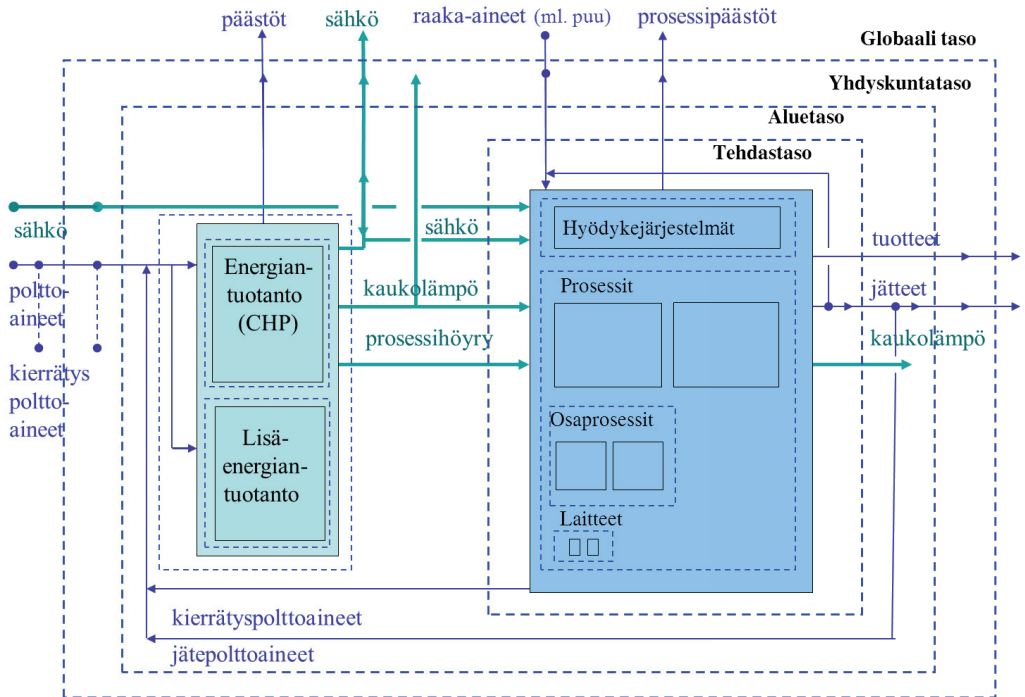
## Teollisuuden taserajat

Prosessiteollisuuden energiatehokkuuden laskennan taserajoja on esitetty kuvassa 5.2. Kuvassa esitetty prosessilaitos on yksinkertaistettu ja yleistetty. Tämä johtuu siitä, että todelliset tuotantoprosessit ovat yksilöitä eikä kaikkiin tapauksiin soveltuvaa kuvausta voida tehdä.

Kuvan 5.2 tuotantoprosessi muodostaa tasealueen ”tehdas”. Sen alajoukko on ”prosessi”, jonka alajoukko edelleen on ”osaprosessi” ja ”laite”. Esim. massa- ja paperinvalmistuksen tehdastaso sisältää kaikki toiminnot alkaen raaka-aineiden käsittelystä ja päättyen tuotteiden pakkaamiseen. Prosessitaso voi olla esimerkiksi paperikone. Paperikoneen yksi osaprosessi on paperin kuivatusprosessi. Kuivatusprosessin yksi laite on lämmönvaihdin.

Tuotantoprosessi ja sen yhteydessä oleva energiantuotantolaitos muodostavat ”alueen” l. tehdasalueen. Energiantuotanto on pääasiassa yhdistettyä sähkön- ja lämmöntuotantoa (Combined Heat and Power, CHP), jolloin se on integroitu valmistusprosessin kanssa. Tehdasalueella voi olla myös lisäenergiantuotantoa, yleensä lämmöntuotantoon. Energiantuotanto voi olla integroitu läheisen yhdyskunnan kanssa. Tällöin tehdas tuottaa ylijäämälämpöä hyödynnetään rakennusten lämmityksessä (kaukolämpö). Tämä korvaa yhdyskunnan omaa energiantuotantoa. Alueella voidaan hyödyntää prosessin sivuvirtoina syntyviä polttoainevirtoja. Polttoaineita ovat esimerkiksi kaasut ja kuoret sekä erilaiset energiapitoiset jäte- ja sivuvirrat kuten biolietteet.

Tehdasalue on osa ympäröivää yhdyskuntaa (tasot: ”yhdyskunta” ja ”globaali taso”). Tehdas toimittaa yhdyskuntaan energiaa, tuotteita, jätteitä ja päästöjä. Tehdas saa yhdyskunnasta raaka-aineita, polttoaineita ja sähköä. Polttoaineet ovat tuontipolttoaineita, kotimaisia polttoaineita, kierrätyspolttoaineita tai jätteitä.



Kuva 5.2. Teollisuuden energiatehokkuuden mittaamisen taserajat. Vihreä (vahva) nuoli tarkoittaa energiavirtaa ja sininen (ohut) nuoli tarkoittaa materiaalivirtaa.

## Taserajojen liittymäkohdat muihin ryhmiin

Prosessiteollisuuden tehdasintegraattien energiatehokkuuden tarkastelu kytkeytyy tutkimushankkeen muihin osa-alueisiin: energiantuotanto, rakennukset, yhdyskunnat, logistiikka. Sektoreilla on seuraavat kytkennät:

### Energiantuotanto

Energiantuotannon tehokkuuden laajin tarkastelu huomioi koko energiantuotantoketjun: polttoaineen hankinnan, konversion, siirron ja jakelun. Polttoaineketjun energiatehokkuuteen vaikuttaa jalostus- ja kuljetusketjun tarvitsema energiamäärä ml. polttoaineen laatutekijät (mm. kosteus). Osa teollisuuden polttoaineista saadaan sivuvirtoina tehdasalueelta ja osa polttoaineista tuodaan ulkopuolelta.

Tavoitteena on yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon (CHP) maksimoiminen, jonka tuotannon hyötysuhde on huomattavasti korkeampi kuin sähkön (ja myös lämmön) erillistuotannon hyötysuhde. Yhdistetyn tuotannon hyödyntäminen edellyttää, että energian tuotanto ja käyttö on integroitu ts. että lämmölle (prosessihöyrylle) on käyttökohde.

### **Yhdyskunnat ja rakennukset**

Teollisuuden tehokkuuden tarkastelu kytkeytyy näihin osa-alueisiin ”aluetasolla” kuvassa 5.2. Tällöin tuotantolaitoksen yhteydessä oleva voimalaitos huolehtii sekä prosessien että yhdyskunnan lämmöntarpeesta. Integrointi mahdollistaa energiantuotannon toteutuksen tehokkaimmalla mahdollisella tavalla (ks. energiantuotanto). Integroinnilla voidaan korvata yhdyskunnan omaa energiantuotantoa.

### **Logistiikka**

Tuotteiden valmistus on osa tuotteiden toimitusketjua ja tuotteen elinkaarta. Valmistuksen energiatehokkuus on siten yksi osa näiden ketjujen energiatehokkuutta.

## 5.3 Energiatehokkuuden mittarit

### Mittareiden määrittelyn periaatteet

Prosessiteollisuudessa *energiatehokkuus* mitataan yleensä ominaisenergiankulutuksena (Specific energy consumption, SEC). Luku ilmaisee energiankäytön suhteessa tuotannon määrään (MWh/t). Toinen tyypillinen energiatehokkuusmittari on ominaisenergiankulutusluvusta jalostettu dimensioton Energiatehokkuusindeksi (Energy efficiency index, EEI).

Energiatehokkuus (tunnusluvulla SEC ilmaistuna; yhtälö 1) paranee, kun 1) sama määrä tuotetta tuotetaan pienemmällä energiamäärällä, 2) suurempi määrä tuotetta tuotetaan samalla energiamäärällä tai 3) suhteessa suurempi määrä tuotetta tuotetaan kasvaneella energiamäärällä (ts. osoittaja [MWh] kasvaa vähemmän kuin nimittäjä [t]) (EC, 2008).

Kirjallisuudessa esiintyviä muita energiatehokkuustermejä ovat: energia intensiteetti (energy intensity; IEA 2007) tai energiaintensiteetti -arvo (energy intensity value; Worrell et al., 2008) tai energiankulutusintensiteetti (energy consumption intensity; Tanaka, 2008).

Teknistä näkökulmaa painottava ominaisenergiankulutusluku on *fysikaalitermodynaaminen* mittari (esim. [GJ/t], [MWh/t]) (yhtälöt 5.1 - 5.3). Energiankäyttöön liittyvä tieto voidaan ilmaista myös muilla tavoin: energiankäyttö voidaan muuttaa CO<sub>2</sub> päästökseksi, jolloin mittari korostaa *ympäristö- tai ilmastonäkökulmaa* (yhtälö 5.4) tai tuotannon määrä voidaan muuttaa sen taloudelliseksi arvoksi, jolloin mittari korostaa taloudellista näkökulmaa.



## Prosessiteollisuuden mittarit

### Ominaisenergiankulutuksen mittaaminen

Yleisin energiatehokkuuden mittari on ominaisenergiankulutus (Specific Energy Consumption, SEC) (EC, 2008):

$$SEC = \frac{\textit{Energy used}}{\textit{Products produced}} \quad (5.1)$$

missä ominaisenergiankulutus on yleensä GJ/t.

Teollisuusprosessit käyttävät useimmiten energiaa eri muodoissa ts. polttoaineita, höyryä ja sähköä. Tällöin loppuenergiankäyttöä kuvastava SEC lasketaan seuraavasti (EC, 2008):

$$SEC = \frac{E_{\textit{Fuels}} + E_{\textit{Steam}} + E_{\textit{Electricity}}}{\textit{Products produced}} \quad (5.2)$$

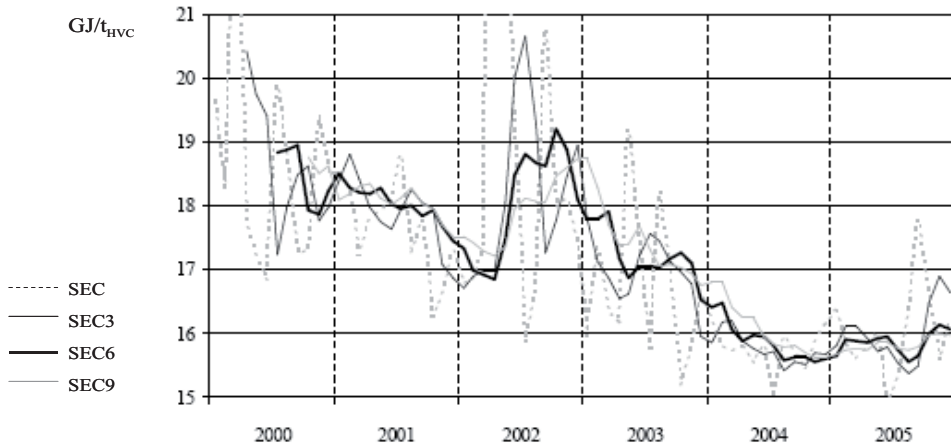
missä  $E_{\textit{Fuels}}$  on polttoaineen kulutus,  $E_{\textit{Steam}}$  on höyrynkulutus ja  $E_{\textit{Electricity}}$  on sähkön kulutus.

Teollisuusprosessien käyttämä loppuenergia tulee muuttaa yhteismitalliseen muotoon ennen niiden laskemista yhteen. Tämä tehdään käyttämällä primäärienergiakertoimia. Primäärienergiankäyttöä kuvaava SEC lasketaan seuraavasti (EC, 2008 muokattu):

$$SEC = \frac{E_{\textit{Fuels}} + E_{\textit{Steam}}/\eta_{\textit{Steam}} + E_{\textit{Electricity}}/\eta_{\textit{Steam}}}{\textit{Products produced}} \quad (5.3)$$

missä  $\eta_{\textit{steam}}$  on höyryntuotannon hyötysuhde ja  $\eta_{\textit{electricity}}$  on sähköntuotannon hyötysuhde. Tyypillisesti sähköntuotannolle käytetään hyötysuhdetta 40 % ja höyryntuotannolle hyötysuhdetta 85 %.

Kuvassa 5.3 on esimerkki ominaisenergiankulutuskuvaajasta (SEC) petrokemianteollisuudesta viiden vuoden seurantajaksolla. Energiankulutus kattaa sähkönkulutuksen, lämmönkulutuksen ja polttoaineiden käytön. Kuvasta voidaan havaita, että ominaisenergiankulutus vaihtelee ajan funktiona.



Kuva 5.3. Esimerkki petrokemiantehtaan ominaisenergiankulutus (SEC, GJ/t<sub>HVC</sub>) perustuen kuukausikeskiarvoihin vuosina 2000...2005 sisältäen liukuvat keskiarvot edelliseltä 3 kuukaudesta (SEC3), 6 kuukaudesta (SEC6) ja 9 kuukaudesta (SEC 9) (Auvinen, 2008).

Kun energiankäyttö on muutettu hiilidioksidipäästökseksi, voidaan lukea kutsua ominaishiilidioksidipäästökseksi (specific CO<sub>2</sub> production, CO<sub>2</sub> efficiency):

$$\eta_{CO_2} = \frac{CO_2 \text{ emissions}}{\text{products produced}} \quad (5.4)$$

missä  $\eta_{CO_2}$  on hiilidioksiditehokkuus, jonka yksikkö on (t CO<sub>2</sub>/t<sub>product</sub>).

Ominaisenergiankulutusluvusta, SEC, voidaan muodostaa dimensioton energiatehokkuusindeksi EEI, Energy efficiency index (EC, 2008):

$$EEI = \frac{SEC_{ref}}{SEC} \quad (5.5)$$

missä  $SEC_{ref}$  on referenssiprosessin energiankulutus. Vertailuarvo voi olla esimerkiksi laitoksen jonkin tietyn vuoden kulutusarvo. Se voi olla myös muu referenssikulutus, kuten BAT (best available technique) arvo. Indeksia EEI käytetään esim. prosessin energiankulutuksen pitkäaikaiseen seurantaan. Yhtälöä 5.5 käytetään myös käänteislukuna.

## Mittaamisen haasteet

Energiatehokkuuden mittaamisen haasteet voidaan tiivistää seuraavasti:

- Tuotoksen (nimittäjän) määrittäminen (yhtälö 5.1)
- Laskennan taserajan määrittäminen (kappale 5.2)
- Energian arvon huomioiminen
- Energian kohdentamis l. allokointikysymykset
- Energiatehokkuuteen vaikuttavien tekijöiden määrittäminen.

Tuotos eli yhtälön 5.1 nimittäjä tarkoittaa teollisuuden tuottamaa tuotetta, esimerkiksi teräs- tai paperilaatua. 'Tuote' on yleensä selkeä käsite tuotantolaitoksen näkökulmasta. Sen määrittäminen nousee haasteeksi lähinnä prosessien energiatehokkuuslukujen vertailussa, koska erilaisten tuoteominaisuuksien aikaansaaminen vaatii erilaisen prosessin, joka taas vaikuttaa laitoksen energiankulutukseen. Asia on merkittävä myös silloin, kun yksittäisten laitosten luvuista halutaan muodostaa koko laitoksen yhteinen energiatehokkuusluku.

Taserajan määrittelyyn liittyviä kysymyksiä on käsitelty kappaleessa 5.2 ja energian arvoon liittyviä kysymyksiä on käsitelty myöhemmissä luvuissa.

Energian kohdentaminen eli allokointi nousee kysymykseksi mm. silloin, kun tuotantolaitos tuottaa useampaa tuotetta samanaikaisesti (monituotetuotanto) tai jaksoissa (jatkuvaloiminen sarjatuotanto) ja energiankulutus halutaan kohdistaa eri tuotteille.

Toinen laaja allokoitokysymys liittyy polttoaineen ja CO<sub>2</sub> päästöjen allokoimiseen sähkölle ja lämmölle CHP tuotannossa.

Luettelon viimeisenä kohtana mainittu 'energiatehokkuuteen vaikuttavien tekijöiden määrittäminen' tarkoittaa kaikkia niitä tekijöitä, jotka saavat aikaan kuvan 5.3 kaltaisen ominaisenergiankulutuksen vaihtelun. Suurin lukuun vaikuttava tekijä on kapasiteetin käyttöaste. Muita lukuun vaikuttavia tekijöitä ovat mm. ympäristön lämpötila ja raaka-aineiden laatu.

IEA (2007) mukaan energiaintensiivisyys on riippuvainen laitoksen koosta, puolijalosteiden käytöstä, käytetystä teknologiasta, raaka-aineiden laadusta, prosessien tehokkuudesta ja energian kierrätysasteesta.

Lähteessä (Sivill ja Ahtila, 2009) tutkittiin energiategokkuusindeksin muodostamista integroidussa sellu- ja paperitehtaassa. Energiategokkuusindeksi muodostettiin vertaamalla seurantajakson energiankulutusta tuotanto-osastojen samalla tuotantomäärällä määritettyyn peruskäyrään (baseline function). Tutkimus vahvisti käsitystä, että tuotantomäärän ja käyntiajan lisäksi energiategokkuuteen vaikuttaa myös muut tekijät. Näitä ovat prosessin syklisyys ja tuotetun tuotteen laatu. Havainnon hyödyntämisen haasteena on laitoskohtaisten peruskäyrien määrittäminen.

Terästeollisuutta käsittelevissä lähteissä Karbuz (1998) ja Farla ja Blok (2001) on havaittu, että energiategokkuuslukujen käyttöä rajoittavat: vaihtelevat käytännöt liittyen taserajojen määrittelyyn, erot laskennassa käytetyissä lämpöarvoissa sekä erot koksien ja koksikaasun käytön laskennassa. Kansainvälisissä vertailuissa ei yleensä tehdä eroa sen suhteen, pohjautuuko valmistus malmiraaka-aineen käyttöön vai kierrätysteräksen käyttöön.

## **Mittarit ja elinkaari**

Energiategokkuutta ja elinkaarikysymyksiä voidaan tarkastella kahdesta eri näkökulmasta. Voidaan tarkastella: 1) laitoksen elinkaarikysymyksiä tai 2) tuotteiden elinkaarikysymyksiä.

## 1) Laitoksen elinkaari

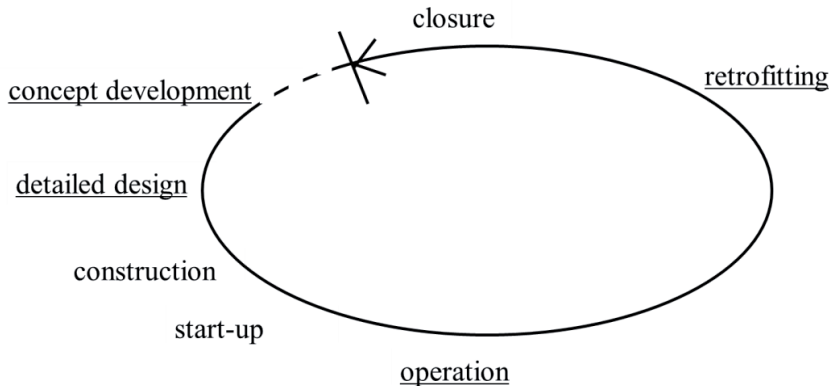
Tuotantolaitoksen elinkaaren vaiheet on esitetty kuvassa 5.4. Siinä laitoksen elinkaari on jaettu seitsemään vaiheeseen, joista energiatehokkuuden tarkasteluiden kannalta mielekkäitä ovat suunnitteluvaiheet, käyttövaihe sekä korjaus/ kunnostusvaihe (kuvassa alleviivattu). Laitoksen energiatehokkuuden mittaaminen on kaikissa vaiheissa samankaltaista ja mittarina voidaan käyttää ominaisenergiankulutusta. Sen sijaan lähestymistapa energiansäästöpotentiaalien laskentaan on jokaisessa vaiheessa hieman erilainen. Näitä periaatteita on tarkasteltu potentiaalilaskentaan liittyvässä kappaleessa 5.4.

## 2) Teollisuustuotteiden elinkaari

Perinteisessä elinkaariarvioinnissa (LCA) arvioidaan tuotteen valmistamiseen vaatimien syötteiden ja tuotosten eri ympäristövaikutuksia mm. ilmaston muutokseen ja rehevöitymiseen liittyen.

Tuotteiden valmistus on osa ketjua, joka alkaa raaka-aineiden hankinnasta ja päättyy tuotteen loppusijoitukseen. Valmistuksenaikainen energiankulutus määräytyy ensisijaisesti laitoksen tyyppin (prosessin) perusteella. Siitonen et al. (2010a) tarkasteli eri maiden prosessiteollisuuden ominaisenergiankulutuskertoimia ja vertaili niitä tietoihin koskien raaka-aineiden kierrätysastetta. Tutkimuksessa havaittiin, että primääriraaka-aineita käyttävän tehtaan energiankulutus on pääsääntöisesti aina suurempi kuin kierrätysraaka-aineita käyttävän tehtaan.

Elinkaariarvioinneissa arvioidaan tuotteen kierrätettävyyttä tapauskohtaisesti. Tulevaisuudessa tulisi voida tuottaa täsmällisiä laskennallisilla tietoja tuotteeseen sitoutuneesta (materiaalien ja valmistuksen sitomasta) energiamäärästä ja edelleen tuotteeseen sitoutuneesta CO<sub>2</sub> -määrästä. Energia voidaan hyödyntää myöhemmissä elinkaaren vaiheissa. Reaktioenergian laskemista endotermisessä prosessissa kokeiltiin tutkimuksen aikana esimerkinomaisesti case-tarkastelussa kohteena petrokemian eteenikrakeri (Tuomaala et al., 2009).



Kuva 5.4. Teollisuuslaitoksen elinkaaren vaiheet (Tuomaala, 2007).

### **Energian arvo mittaamisessa**

Energian arvoa voidaan mitata monilla eri tekijöillä. Yrityksille energian arvo tarkoittaa yleensä sen taloudellista arvoa, joka toimii päätöksenteon kriteerinä. Energian arvo voi tarkoittaa myös energian jalostusastetta. Lisäksi energian arvolla voidaan tarkoittaa sen exergia-arvoa.

### **Energian arvo eri energiamuotojen yhteenlaskennassa**

Teollisuusprosesseissa käytetään polttoaineita (MWh), sähköä (MWh) ja lämpöä (MWh). Niillä kaikilla on erilainen jalostusarvo. Tämä tulisi huomioida lukujen käytössä ja laskelmissa. Eri jalostusarvon omaavia energioita ei tulisi laskea yhteen ennen jakeiden muuttamista yhteismitalliseen muotoon.

Jalostusarvo voidaan huomioida muuttamalla eri energiamuodot primäärienergiaksi. Tämä tehdään huomioimalla tuotantohyötysuhteet (yhtälö 5.3). Muuntamiseen käytetään usein kirjallisuudessa esitettyjä vakiohyötysuhdekertoimia (esim. EC 2008). Niiden käyttö ei kuitenkaan anna täysin oikeaa tulosta, koska sähkö ja lämpö voidaan tuottaa eri tavoin. Vakiokertomien käyttö suosii tapauksia, jossa sähkö tai lämpö on tuotettu huonommalla hyötysuhteella ja aliarvostaa tapauksia, joissa sähkö tai lämpö on tuotettu paremmalla hyötysuhteella kuin vertailutapauksessa, esim. CHP. Teoreettisesti oikeiden laskelmien tuottaminen edellyttäisi, että loppuenergian muunnokset primäärienergiaksi tehtäisiin tapauskohtaisesti. Toistaiseksi tällaista laskentamenetelmää ei ole olemassa.

## Energian exergia -arvo

Teollisuudessa exergia tarkoittaa lähinnä energian kykyä tuottaa mekaanista työtä tai sähköenergiaa. Energia on sitä arvokkaampaa mitä korkeampi on sen exergia –arvo. Energian laatu on täten erilainen polttoaineella, sähköllä ja lämmöllä (Taulukko 5.1).

Taulukko 5.1. Eri energianlähteiden energia- and exergiasisältö (Ahtila et al., 2010).

| Energianlähde   | Energiasisältö   | Exergiasisältö                |
|---|------------------|-------------------------------|
| Sähkö   | 1 kJ             | 1 kJ                          |
| 3 bar kylläinen höyry   | 2725 kJ/kg       | 680 kJ/kg <sup>1</sup>        |
| 12 bar kylläinen höyry  | 2784 kJ/kg       | 876 kJ/kg <sup>1</sup>        |
| Maakaasu  | 49.2 MJ/kg (LHV) | 51.2 MJ/kg (LHV) <sup>2</sup> |
| <sup>1</sup> $e_{\text{steam}} = h^{\text{''}}_{\text{steam}} - h(T_0) - T_0(s^{\text{''}}_{\text{steam}} - s(T_0))$<br><sup>2</sup> $e_{\text{fuel}} = 1.04 \cdot \text{LHV}$ (Szargut, 2005)<br>$T_0 = 293\text{K}$ , $h$ on entalpia, $s$ on entropia, " on kylläinen höyry, ' on kylläinen vesi |                  |                               |

Taulukko 5.1 osoittaa, että exergiasisältö ja energiasisältö on sama sähköllä ja lähes sama maakaasulla. Lämmön exergiasisältö on huomattavasti sen energiasisältöä alhaisempi. Korkeapainehöyryn exergiasisältö on suurempi kuin matalapainehöyryn. Toisin sanoen sen kyky tehdä mekaanista työtä on suurempi. Tämä tarkoittaa, että sähkö ja polttoaineet ovat korkea-arvoisia energianlähteitä. Korkea-arvoisten energialähteiden käyttöä tulee aina minimoida. Teollisuusprosesseissa tulee pyrkiä alhaisen exergia-arvon omaavien lämpöjen hyödyntämiseen (CHP-) sähköntuotantopotentiaalini maksimoimiseksi (Ahtila et a. 2010).

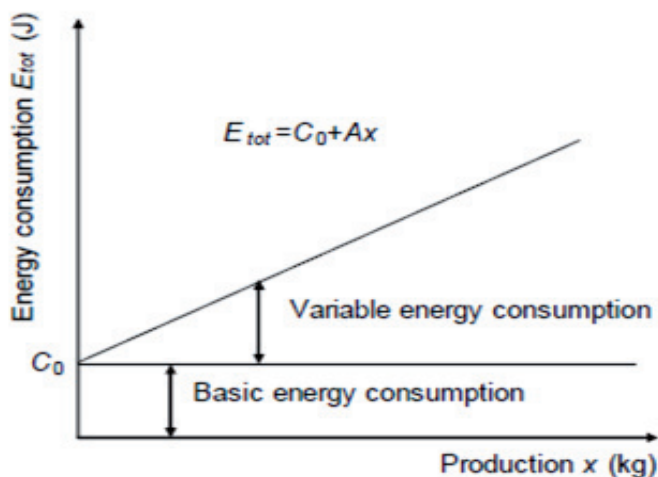
Toistaiseksi ole olemassa käytäntöjä Exergia-arvon huomioimiseen energiatehokkuuslaskelmissa. Käytäntönä on, että energian laatu huomioidaan muutamalla loppuenergiat primäärienergiaksi (yhtälö 5.3).

## Käyttöasteen merkitys

Energiankulutus muodostuu tuotannosta riippumattomasta kulutuksesta (ns. laitoksen peruskuormasta) ja tuotannosta riippuvasta kulutuksesta.

Laitoksen peruskuorma tarkoittaa sitä kulutusta, joka laitoksessa on sen ollessa valmiustilassa ilman, että tuotantoa syntyy. Peruskuorma muodostuu koneiden ja massojen lämpimänä pitämisestä, prosessien (esim. biologinen vedenpuhdistus) pitämisestä toimintakuntoisena, ilmanvaihdosta ja valaistuksesta. Tuotannosta riippuva kulutus tarkoittaa sitä lisäkulutusta, joka syntyy tuotteiden tuotannosta. Se koostuu reaktioihin tarvittavasta energiasta sekä siirtämiseen ja liikuttamiseen tarvittavasta energiasta. Näitä ovat pumppujen ja telojen käyttö, kierrätys, jne.

Kuvassa 5.5 on perinteinen esitystapa energiankulutuksen jakautumisesta peruskuormaan ja muuttuvaan energiankulutukseen. Käyrän täsmällinen muoto on toimiala- ja prosessikohtainen. Energiankulutuksen minimi voi olla myös (vasta) suunnittelupisteessä (Sivill ja Ahtila, 2009).



Kuva 5.5. Peruskuorma ja tuotannosta riippuva energiankulutus (Sivill ja Ahtila 2009 alkuperäislähteestä muokattuna).



## 5.4 Potentiaalilaskennan periaatteet

Arvioita teollisuuden energiansäästöpotentiaaleista tehdään mm. vertailemalla sitä, kuinka siirtyminen uuteen valmistusteknologiaan, energiatehokkaisiin laitteisiin ja komponentteihin alentaisi kulutusta eri teollisuussektoreilla (esim. IEA, 2007).

Energiansäästöpotentiaalien teorialähtöiseen ja kokonaisvaltaiseen laskentaan ei ole olemassa valmiita kaikenkattavia menetelmiä. Osamenetelmiä on olemassa (esim. pinch-analyysi, exergia-analyysi), mutta niiden teollisuuskäyttö on vielä suhteellisen vähäistä. Tähän on erilaisia käytännön syitä kuten selvitystyön hinta ja resurssien siltavuus. Lisäksi menetelmien hyödyntämistä rajoittaa se, että ne eivät sovellu hyvin laajojen integraattien tarkasteluun, kaikille teollisuudenaloille tai kaikkien tuotantotilanteiden huomioimiseen (prosessien dynaamisuus).

Tutkimuksen aikana jäsennettiin potentiaalien laskentaan liittyviä periaatteita. Näitä on selvitetty seuraavissa kappaleissa.

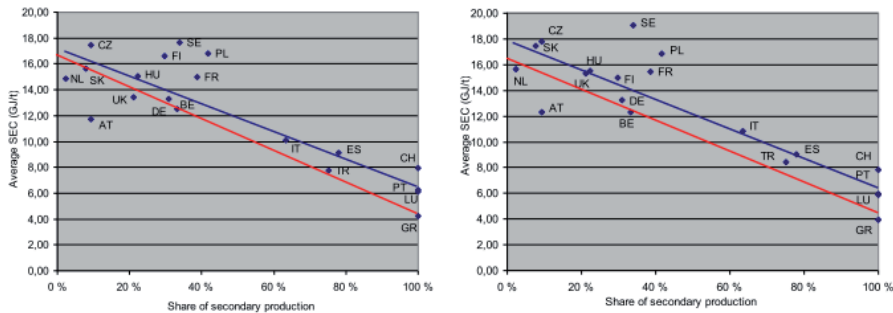
### **Muiden kriteerien huomioiminen**

Energiankäytön tehostamisessa on huomioitava myös erilaisia muita tekijöitä ts. energiatehokkuus on ”vain” yksi tavoiteltava prosessin ominaisuus muiden huomionarvoisten tekijöiden joukossa. Näitä ovat mm. häiriötön tuotanto, tuotelaatu ja materiaalin käytön tehokkuus. Energiatehokkuuspotentiaalilaskeminen edellyttää oletuksien tekemistä näistä tekijöistä.

Tehokkuus voidaan luokitella esimerkiksi energiatehokkuuteen, materiaalitehokkuuteen ja käyttötehokkuuteen l. laitoksen käytön tehokkuuteen (Tuomaala, 2007). Tehokkuuden eri osa-alueet ovat vuorovaikutuksessa toistensa kanssa. Mm. käytön tehokkuus, jonka yleinen mittari on kapasiteetin käyttöaste, ja materiaalien kierrätysaste vaikuttavat laitoksen energiatehokkuuteen. Joissain tilanteissa toisen parantaminen johtaa toisen heikkenemiseen. Esimerkiksi paperiteollisuudessa kuidun talteenoton tehostaminen suodatusta lisäämällä voi johtaa sähkönkulutuksen kasvuun.

## Tuloksia case-tarkasteluista

Siitonen et al. (2010a) vertaili eri maiden (teräs- ja massa- ja paperiteollisuuden) energiatehokkuuslukuja materiaalin kierrätysasteen funktiona tilastotietoja apuna käyttäen. Tutkimuksen perusteella ilmeni, että ominaisenergiankulutus kansallisella tasolla korreloi kansallisen kierrätysasteen kanssa. Tarkastelu osoitti, että ominaisenergiankulutusluvut olivat parhaat (pienimmät) niillä mailla, joissa kierrätysraaka-ainetta käytettiin paljon. Tämä herättää kysymyksiä kansallisten tilastotietojen vertailukelpoisuudesta ja tietojen soveltuvuudesta vertailuiden pohjaksi. Lisäksi voidaan kysyä tulisiko esimerkiksi primääriraaka-aineita jalostavien tehtaiden (suurempia) energiankulutuksia allokoida kierrätysraaka-ainetta käyttäville tehtaille. Selvityksessä ei tutkittu korrelaatioita muiden tekijöiden kanssa.



The upper blue line in the figures shows the linear trend line of scattered points and the lower red line the theoretical curve between the world best practice final energy intensity values of primary production and secondary production (for continuous casting and hot rolling of bars).

a)

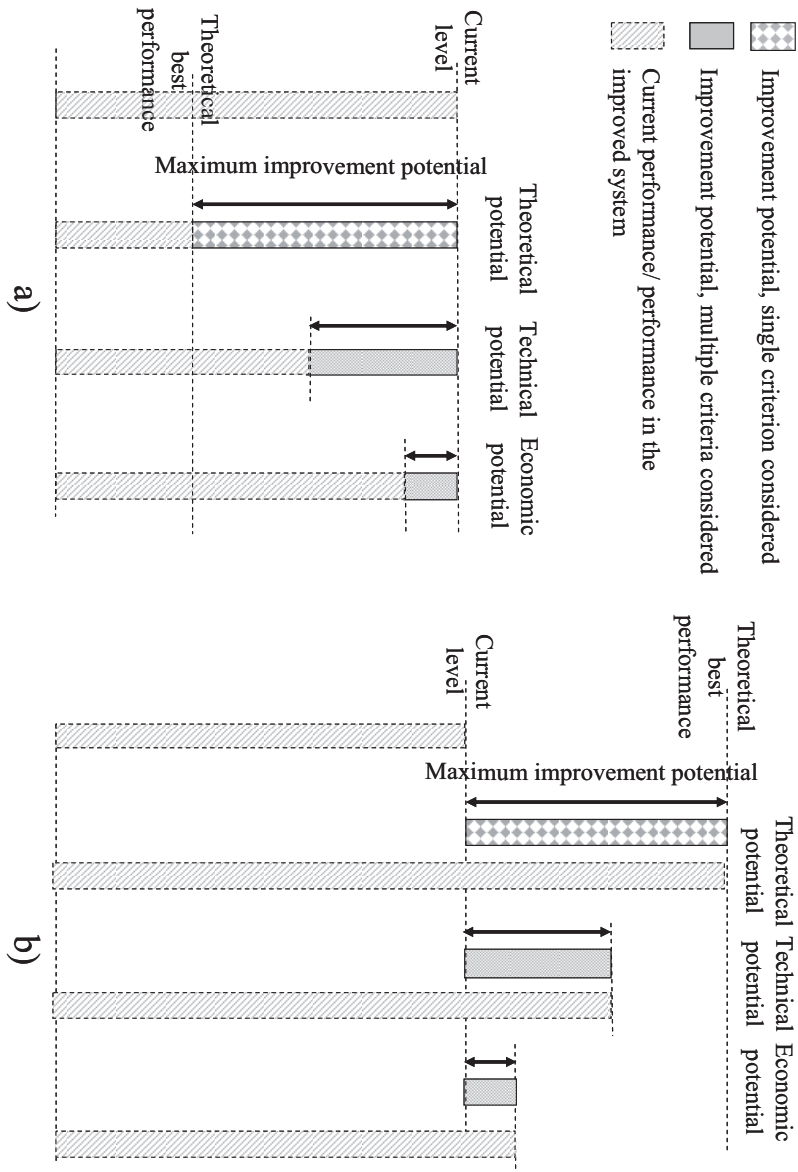
b)

*Kuva 5.6. Kierrätysraaka-aineen (sekundäärituotannon) osuuden vaikutus terästehtaan energiatehokkuuslukuun perustuen a) IEA:n dataan vuodelta 2007 ja b) Eurostatin dataan vuodelta 2006 (Siitonen et al. 2010a).*

Selvityksessä Siitonen et al. (2010b) tutkittiin terästehtaan ominaisenergiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä monimuuttujamenetelmien avulla. Tuloksen perusteella ominaisenergiankulutukseen eniten vaikuttavia tekijöitä ovat tuotantoaste ja romun käyttöasteet. CO<sub>2</sub>:n määrään vaikuttaa eniten koksen kulutus. Ominaisenergiankulutukseen vaikuttavat tekijät tulisi tuntea hyvin, jotta tehtaiden energiatehokkuuspotentiaali voitaisiin laskea. Todettiin myös, että energiatehokkuuslukuja tutkittaessa tulisi tietää miten laskennassa on huomioitu tehdasalueen oma energiantuotanto ja puolivalmisteiden käyttö.

## **Teoreettinen, tekninen ja taloudellinen potentiaali**

Potentiaalilaskennan periaatteita on esitetty kuvassa 5.7. Kuvan mukaisesti prosessin parannuspotentiaali voi olla teoreettinen, tekninen ja taloudellinen. Teoreettinen potentiaali tarkoittaa suurinta mahdollista parannuspotentiaalia jonkun kriteerin suhteen (voi olla myös muu kuin energiatehokkuustavoite). Tekninen potentiaali edustaa sitä parannuspotentiaalia, joka on saavutettavissa olemassa olevan teknologian avulla (esim. BAT). Tekninen potentiaali pienempi kuin teoreettinen potentiaali, koska tekninen ratkaisu ei yleensä mahdollista ideaalin järjestelmän rakentamista. Lisäksi potentiaali pienenee, kun käytännön työssä on huomioitava myös muita kriteereitä. Taloudellisesti edullisemman vaihtoehdon tavoittelu saattaa aiheuttaa sen, että alkuperäisistä tavoitteista tingitään lisää, jolloin toteutunut parannuspotentiaali on myös teknistä potentiaalia alhaisempi.



Kuva 5.7. Potentiaalitarkastelun teoreettinen viitekehys (Tuomaala et al. 2010). Tapauksessa a) kriteerin arvon pieneminen on tavoiteltava ominaisuus (esim. energi-ankäyttö) ja tapauksessa b) kriteerin arvon suureneminen on tavoiteltava ominaisuus (esim. kuidun saanto).

## **Energiatehokkuuspotentiaalit ja laitoksen elinkaari**

Prosessien parantaminen on sidoksissa laitoksen elinkaareen (kuva 5.4). Laitosparannukset tulevat kysymykseen ns. korjausvaiheessa (retrofitting), kun laitosta halutaan uudistaa. Vanhojen laitoksien parannuspotentiaali voi täten olla suuri. Potentiaalien laskenta ja toteutuminen noudattaa tällöin kuvan 5.7 periaatteita. Uudistamista rajoittavat taloudelliset seikat. Uudet laitokset rakennetaan energiatehokkaiksi. Näin ollen uusimpien laitoksien parannuspotentiaali on usein pienempi kuin vanhojen laitosten.

## **Energiatehokkuuspotentiaali ja laitoshierarkia**

Teollisuuden tehdasintegraateista voidaan erottaa erilaisia tarkastelun tasealueita kuvan 5.2 mukaisesti. Energiansäästöpotentiaalierviöiden tuottaminen osaprosessi- ja prosessitasoilta edellyttää kehittyneiden prosessianalyysimenetelmien käyttöä (esim. pinch-analyysi). Energiansäästötoimien vaikutuksia tulisi arvioida mahdollisimman laajasti. Ts. olisi tiedettävä, miten osaprosesseissa tehdyt muutokset vaikuttavat koko laitoksen energiatehokkuuteen.

### Tuloksia case-tarkasteluista

Siitonen et al. (2009c) tutki lämmönsäästön toteutumista tehdasintegraatissa. Tuloksen mukaan lämmönsäästön kumuloituminen primäärienergiänsäästöksi ja CO<sub>2</sub> – päästövähennyksi riippuu tehtaan energiantuotantomuodosta. Jos energiantuotanto on CHP –tuotantoa, lämpökuorman aleneminen alentaa sähköntuotantoa, ellei muuta käyttökohdetta lämmölle löydy. Mahdollinen sähköntuotannon aleneminen on kompensoitava kansallisella tasolla. Selvitystyön pääjohtopäätöksenä todettiin, ettei yksittäisten laitosten energiansäästötoimenpiteistä voi suoraan johtaa energian tai CO<sub>2</sub>:n säästöpotentiaalia kansallisella tasolla. Yksittäisien energiansäästökatselmuksien tuloksien yleistäminen voi johtaa säästöpotentiaalien yli- tai aliarvioimiseen.

Lisäksi tutkimuksen aikana selvitettiin, että tehtaiden mahdollisuudet optimoida ajotilanteita vallitsevien polttoaine-, päästö- ja hyödykehintojen perusteella vaikuttavat siihen, miten laskettu säästöpotentiaali lopulta toteutuu (Siitonen ja Ahtila, 2009).

## 5.5 Johtopäätökset

### Päähavainnot

Energiatehokkuuden mittaamisen haasteet teollisuudessa on pääpiirteissään tunnettu. Näin ollen tämän tutkimuksen aikana pyrittiin tuottamaan kattava kehityksen tilaa ja tutkimushaasteita kuvaava tilanneraportti.

Energiatehokkuutta mitataan pääasiassa Ominaisenergiankulutuksena, SEC ( $MWh/t_{tuote}$ ) sekä Energiatehokkuusindeksin, EEI avulla. Ominaisenergiankulutusluvun käyttöä rajoittaa sen soveltumattomuus eri prosessien vertailuun. Luku on myös altis prosessissa tapahtuville muutoksille, etenkin kapasiteetin käyttöasteelle. Tämän vuoksi ominaisenergiankulutusmittaria käytettäessä on syytä ilmaista myös mittaustulosta selittäviä tekijöitä. Energiatehokkuusindeksi suhteuttaa energiankulutuksen johonkin valittuun referenssiin, esim. laitoksen omaan parhaaseen suorituskykyyn. Energiatehokkuusindeksiä käytetään mm. analysoimaan laitoksen toteutunutta energiatehokkuutta. Energiatehokkuuden mittaamisessa ominaisenergiankulutuksen avulla on yleisesti tunnistettuja haasteita: 1) nimittäjän määrittäminen, 2) taserajan määrittäminen, 3) energian arvon huomioiminen, 4) energian allokointikysymykset ja 4) energiatehokkuuteen vaikuttavien tekijöiden määrittely.

Energiansäästöpotentiaalien laskentaan ei ole olemassa yksiselitteisiä lähestymistapoja. Osamenetelmiä on olemassa (esim. pinch-analyysi, exergia-analyysi), mutta niiden teollisuuskäyttö on vielä suhteellisen vähäistä. Potentiaalilaskentaan liittyy paljon erilaisia avoimia kysymyksiä. Teollisuuden energiansäästöpotentiaaleja arvioidaankin lähes yksinomaan vertailemalla prosesseista saatavia tilastotietoja erilaisiin tavoitearvoihin.

Haasteet energiansäästöpotentiaalien laskemisessa johtuvat mm. siitä, että energiatehokkuus on osa muita tavoiteltavia ominaisuuksia kuten häiriötön tuotanto, tuotelaatu ja materiaalin käytön tehokkuus. Energiatehokkuuspotentiaalien laskeminen edellyttäisi oletuksien tekemistä näistä tekijöistä. Lukujen tuottamiseen pelkästään päälaitteista liittyy monia vaikeuksia (vrt. taajuusmuuttajilla saavutettava energiansäästöpotentiaali). Laskennan haastetta lisää myös laitoshierarkia, jolloin muutokset yhdessä kohteessa voivat vaikuttaa toiseen kohteeseen.

Tutkimuksen pääresurssit suunnattiin tuottamaan tietoa energiansäästön toteutumisen mekanismeista. Yksi päähavainnoista on, että lämmönsäästön kanavoituminen primäärienergia- ja CO<sub>2</sub>-säästökseen on tapauskohtaista. Näin ollen yksittäisten prosessien tarkasteluiden perusteella tehtävät johtopäätökset voivat joko yliarvioida tai aliarvioida valtakunnan ja globaalin tason muutospotentiaalia. Asiaan vaikuttaa tehtaan energiantuotantotapa ja lisäksi integraatin sisäiset päätöksentekopisteet ts. energiantuottajan mahdollisuus optimoida tuotantoa hintojen (polttoaineen hinta, päästöoikeuksien hinta, sähköstä saatava hinta, lämmöstä saatava hinta) mukaan. Tutkimuksen aikana todettiin myös, että energiankulutus on voimakkaasti sidoksissa materiaalitehokkuuteen. Tarkastelu osoitti, että ominaisenergiankulutusluvut olivat parhaat (pienimmät) niillä mailla, joissa kierrätysraaka-ainetta käytettiin paljon.

### **Toimenpide-ehdotuksia**

Energiatehokkuuden johtaminen teollisuudessa linkittyy: prosessien käyttöön, kustannusjohtamiseen (mm. investoinnit) ja operatiiviseen johtamiseen ml. strategia, tavoitteet ja viestintä, suorituksen mittaaminen, mittaaminen ja palkitseminen, ihmisten motivointi. Energiatehokkuudella on siis keskeinen rooli yrityksen toiminnassa, mutta siihen vaikuttamisessa ei ole yhtä yksittäistä toimintatapaa. Oikeiden mittausmenetelmien ja potentiaalien laskentatapojen löytäminen on keskeinen osa energiatehokkuuden edistämistyötä.

Kehityksen edistämiseksi voidaan käynnistää erilaisia toimia:

#### 1) Prosessimittausvalmiuksien tehostaminen

Prosessimittausvalmiudet ovat edellytys energiatehokkuusmittaus- ja raportointijärjestelmien käyttöönotolle. Mittausvalmiuksien lisääminen edesauttaisi energiatehokkuuden johtamisen tehostamista.

#### 2) Kansallisen tutkimushankkeiden kokoaminen ja tiedonjaon mekanismit

Teollisuuden energiatehokkuustutkimukset ovat usein suhteellisen tapauskohtaisia ja yksityiskohtaisia (kosteuden säädön parantaminen, kylmäketjujen energiankäytön tutkimus, lämmönsiirron parantaminen jne.). Hankkeet edistävät energiatehokkuutta merkittävästi valituissa sovellutuskohdeissa, mutta niiden lisäksi tarvittaisiin myös yleisiä ja yhteisiä hankkeita. Kattavat teemat tulee olla tavoitteena, jotta energiatehokkuustutkimus etenisi tehokkaalla tavalla ja eri teollisuussektoreiden yhteisiä tavoitteita pal-

vellen. Kansallisen yhteistyön tiivistäminen edesauttaisi myös tiedonjakoa ja siten tehostaisi tutkimusresurssien käyttöä.

### 3) Kansainvälinen yhteistyö mittaamisen- ja laskennan alalla

Ilmastokysymysten noustessa kuluttajien tietoisuuteen voidaan olettaa, että mm. paineet tuotteiden hiilijalanjälkien laskemiseen lisääntyvät. Yritysten on jatkossa kyettävä toimittamaan yhä täsmällisempiä tietoja valmistamistaan tuotteista. Kansainvälistä työtä tarvitaan, mm. kun määritellään laskennan taserajoja tai päätetään miten osavalmisteiden ja kierrätysmateriaalin käyttö huomioidaan. Yhteistyön tarkoituksena olisi varmistaa, että toimitetut luvut ovat yhdenmukaisia ja vertailtavissa toisiinsa.

## **Tutkimustarpeita**

Energiatehokkuuden mittareiden ja energiansäästöpotentiaalin laskentamenetelmien kehittäminen edellyttää pitkäjänteistä tutkimustyötä. Raportissa mainittuja teollisuuden yksityiskohtaisia tutkimusaiheita ovat mm.:

- ominaisenergiankulutukseen vaikuttavat tekijät ja niihin liittyvät mittaristot eri teollisuuskohteissa
- integraatteihin soveltuvien primäärienergiakertoimien laskentaperusteet
- prosessianalyysimenetelmien jatkokehittäminen (mm. exergia)
- energiatehokkuuden johtamiseen liittyvä tutkimus
- prosessianalyysimenetelmien käytön edistämiseen liittyvä tutkimus
- energiatehokkuuspotentiaalien laskentamenetelmien jatkokehitystyö.



## Lähdeluettelo

Ahtila P., Holmberg H., Tuomaala M., Turunen T. (2010) Energy management in drying, Chapter 9. Teoksessa: Papermaking Part 2, Drying, Volume 9. Ed. Markku Karlsson, Sarjassa: Papermaking Science and Technology. Paperi ja Puu Oy. Helsinki, Finland.

Auvinen H., (2008) Measuring energy and CO<sub>2</sub> efficiency in the petrochemical industry by using energy balance analysis. M.Sc. Thesis. Helsinki University of Technology. Espoo.

EC (2008). Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency, Chapter 1: Introduction and definitions, pp. 1-46. Saatavilla: [ftp://ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/ene\\_bref\\_0608.pdf](ftp://ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/ene_bref_0608.pdf), (pvm. 15.1.2010).

Farla, J.C.M. & Blok, K. (2001). The quality of energy intensity indicators for international comparison in the iron and steel industry. *Energy Policy* 29 (7), 523-543

Francis D.W., Browne T.C. (2008). Reporting Guidelines for Energy Use in Pulp and Paper Operations. FPInnovations – Paprican, Vancouver, BC, Canada.

IEA (2007). Tracking industrial energy use and CO<sub>2</sub> emissions OECD/IEA, Paris.

Karbus, S. (1998). Achieving accurate international comparisons of manufacturing energy use data. *Energy Policy* 26(12), 973-979.

Szargut J. (2005) The Exergy Method: Technical and Ecological Applications. WIT-Press, UK, USA.

Siitonen, S. (2010). Implications of energy efficiency improvement for CO<sub>2</sub> emissions in energy intensive industry. Ph.D.(Tech) thesis. Aalto University School of Science and Technology. Espoo.

Siitonen S., Tuomaala M., Ahtila P. (2010a) Influences of material recycling on energy efficiency, case: iron and steel industry. International Conference of Applied Energy 21st -23rd April 2010, Singapore.

Siitonen S., Tuomaala M., Ahtila P. (2010b) Variables affecting energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions in the steel industry. *Energy Policy*, 38, pp. 2477-2485.

Siitonen S., Tuomaala M., Suominen M., Ahtila P. (2009c). Implications of process energy efficiency improvements for primary energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions at the national level. *Applied Energy*, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.09.024.

Sivill L., Ahtila P. (2009). Energy efficiency index as an energy efficiency indicator for integrated pulp and paper mills – a case study. *The First International Conference on Applied Energy 2009*.

Tanaka, K. (2008). Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy. *Energy Policy* 36, 2887-2902.

Tekes (2009). *ClimBus – Business Opportunities in the Mitigation of Climate Change 2004–2008*. Tekes Programme Report 4/2009. Final Report. Helsinki 2009.

Tilastokeskus (2009). Final energy consumption by sector 2008. Saatavilla: [http://www.stat.fi/til/ehkh/2008/04/ehkh\\_2008\\_04\\_2009-03-24\\_kuv\\_017\\_en.html](http://www.stat.fi/til/ehkh/2008/04/ehkh_2008_04_2009-03-24_kuv_017_en.html)

Tuomaala M. *Conceptual Approach to Process Integration Efficiency*. PhD Thesis. Helsinki University of Technology, Espoo 2007.

Tuomaala M., Holmberg H., Auvinen H. (2009). Enthalpy of formation as part of energy efficiency analyses – case: olefin plant. *Chemical Engineering Transactions* 18 (2009) 543-548, Part 2, DOI:10.3303/CET0918088 TAI CHISA 2009 /PRES2009, May 11-13, Rome, Italy (oral presentation)

Tuomaala M., Hurme M., Leino A-M, (2010) Evaluating the efficiency of integrated systems in the process industry–Case: Steam cracker, *Applied Thermal Engineering* 30 pp. 45–52.

Worrell, E., Neelis, M., Price, L., Galitsky, C., & Zhou, N. (2008). *World Best Practice Energy Intensity Values for Selected Industrial Sectors*. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, pp. 5-17.

## Teollisuuden tutkimusosion julkaisut

T. Haikonen, M. Tuomaala, H. Holmberg and P. Ahtila Energy Efficiency in Biorefineries – A Case Study of Fischer-Tropsch Diesel Production in Connection with Pulp And Paper Mill. The Annual Conference of the Canadian Pulp and Paper Industry, 1-3 Feb., 2011, Canada, pp.144-147.

Siitonen, S. (2010). Implications of energy efficiency improvement for CO<sub>2</sub> emissions in energy intensive industry. Ph.D.(Tech) thesis. Aalto University School of Science and Technology. Espoo.

Siitonen S., Tuomaala M., Ahtila P. (2010) Influences of material recycling on energy efficiency, case: iron and steel industry. International Conference of Applied Energy 21st -23rd April 2010, Singapore.

Siitonen S., Tuomaala M., Ahtila P. (2010) Variables affecting energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions in the steel industry. Energy Policy, 38, pp. 2477-2485.

Siitonen S., Tuomaala M., Suominen M., Ahtila P. (2009). Implications of process energy efficiency improvements for primary energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions at the national level. Applied Energy, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.09.024.

Holmberg H., Tuomaala M., Haikonen T., Ahtila P. (2011) Allocation of fuel costs and CO<sub>2</sub> emissions to heat and power in an industrial CHP plant: Case integrated pulp and paper mill. Applied Energy, doi:10.1016/j.apenergy.2011.11.040

Euroopan komission strategian yhtenä tavoitteena on parantaa energiatehokkuutta EU:ssa. Energiatehokkuuden mittaamiseksi ja sen parannuspotentiaalin laskemiseksi ei kuitenkaan ole yhtenäistä menetelmää.

Energiatehokkuuden mittarit ja potentiaalit (EPO) –tutkimushankkeessa tutkittiin näitä kysymyksiä. Tutkimuksessa tarkasteltiin viittä sektoria: yhdyskunnat, rakennukset, (prosessi-) teollisuus, liikenne ja logistiikka sekä energiantuotanto. EPO - tutkimushanke toteutettiin osana Tekesin ClimBus tutkimusohjelmaa v. 2008 - 2011.



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO



ISBN 978-952-60-4503-0  
 ISBN 978-952-60-4504-7 (pdf)  
 ISSN-L 1799-487X  
 ISSN 1799-487X  
 ISSN 1799-4888 (pdf)

**Aalto-yliopisto**  
 Insinöörیتieteiden korkeakoulu  
 Energiatekniikan laitos  
[www.aalto.fi](http://www.aalto.fi)

**KAUPPA +  
 TALOUS**

**TAIDE +  
 MUOTOILU +  
 ARKKITEHTUURI**

**TIEDE +  
 TEKNOLOGIA**

**CROSSOVER**

**DOCTORAL  
 DISSERTATIONS**