



**Aalto-yliopisto**  
Insinöörیتieteiden  
korkeakoulu

Toni Lahtinen

## **Alueellinen energiaoptimointi**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 24.2.2020

Valvoja: Professori Markku J. Virtanen

Ohjaajat: DI Marko Tulamo, DI Tuomo Liesaho

---

**Tekijä** Toni Lahtinen

---

**Työn nimi** Alueellinen energiaoptimointi

---

**Maisteriohjelma** Sustainable Energy in Buildings and Built Environment**Koodi** ENG3068

---

**Työn valvoja** Professori Markku J. Virtanen

---

**Työn ohjaajat** DI Marko Tulamo, DI Tuomo Liesaho

---

**Päivämäärä** 24.2.2020**Sivumäärä** 132+7**Kieli** suomi

---

### Tiivistelmä

Energiamurroksen myötä energiajärjestelmät ovat radikaalin muutoksen partaalla. Perinteiset energiajärjestelmät kehittyvät kohti integroituja älykkäitä energiajärjestelmiä, joiden joustavuus mahdollistaa uusiutuvien ja hajautettujen energiavarojen laaja-alaisen ja tehokkaan hyödyntämisen. Teknisten suunnitteluvaihtoehtojen moninkertaistuminen sekä energiajärjestelmien vahva linkittyminen nykyisiin institutionaalisiin rakenteisiin haastavat alueelliset energia-analyysit käymään läpi kaikki eri vaihtoehdot tehokkaalla, objektiivisella ja läpinäkyvällä tavalla – myös sellaiset perinteisistä poikkeavat vaihtoehdot, jotka eivät suoraan sovellu nykyisiin teknisiin, poliittisiin tai institutionaalisiin rakenteisiin. Tästä johtuen alueellisten energiajärjestelmien suunnittelussa tarvitaan strategista lähestymistapaa.

Työssä tutkitaan, mitä tarkoitetaan alueellisella energiaoptimoinnilla, ja kuinka sitä voidaan hyödyntää osana alueellista strategista energiasuunnittelua. Aihetta lähestytään laajanäkökulmaisesti painottaen erityisesti kokonaisvaltaisen ymmärtämisen ja suunnittelun tärkeyttä. Työ sisältää kattavan kirjallisuustutkimuksen, jossa alueellinen energiaoptimointi linkitetään intuitiivisella ja havainnollistavalla tavalla olennaiseksi osaksi kestävien ja edistyksellisten alueellisten energiajärjestelmien suunnittelua. Kirjallisuustutkimukseen pohjautuen työssä luodaan myös alueellista energiaoptimointia hyödyntävä alueellisen strategisen energiasuunnittelun viitekehys, joka pyrkii erityisesti antamaan valmiuden käytännölliseen optimointimenetelmiä hyödyntävään alueelliseen strategiseen energiasuunnitteluun.

Alueellisen energiaoptimoinnin huomataan edesauttavan kattavaa, objektiivista ja tehokasta alueellisten energiajärjestelmien suunnitteluvaihtoehtojen tarkastelemista jo suunnitteluprosessin alkuvaiheessa minimaalisella manuaalisen työn vaatimuksella. Optimointimenetelmien avulla erilaisten tavoitteenasetteluiden ja lähtötietojen sekä tulevaisuuden skenaarioiden vaikutusta optimaalisiin ratkaisuvaihtoehtoihin voidaan tutkia perinpohjaisesti ja interaktiivisesti. Lisäksi alueellinen energiaoptimointi mahdollistaa kompleksisten edistyksellisten energiajärjestelmien synergiavaikutuksien systemaattisen tunnistamisen ja hyödyntämisen. Näin ollen alueellisella energiaoptimoinnilla voidaan merkittävästi tukea alueellisia energiajärjestelmiä koskevaa päätöksentekoa edellyttäen kuitenkin, että sitä hyödynnetään strategisen energiasuunnittelun kontekstissa. Alueellisen energiaoptimoinnin luotettava suorittaminen vaatii myös kokonaisvaltaista edistyksellisiä energiajärjestelmiä ja optimointimenetelmiä koskevaa ymmärrystä ja asiantuntijuutta.

---

**Avainsanat** alueellinen energiaoptimointi, strateginen energiasuunnittelu, alueellinen energiasuunnittelu, kestävä energiajärjestelmä, optimointi, uusiutuva energia

---



---

**Author** Toni Lahtinen

---

**Title of thesis** Regional energy optimization

---

**Master programme** Sustainable Energy in Buildings and  
Built Environment

**Code** ENG3068

---

**Thesis supervisor** Professor Markku J. Virtanen

---

**Thesis advisors** Marko Tulamo M.Sc. (Tech.), Tuomo Liesaho M.Sc. (Tech.)

---

**Date** 24.2.2020

**Number of pages** 132+7

**Language** Finnish

---

### Abstract

Energy systems are experiencing a radical change due to the energy transition. Traditional energy systems are evolving towards integrated smart energy systems that are highly flexible, which is an essential precondition for efficient and extensive utilization of renewable and distributed energy resources. The proliferation of potential technical design solutions along with the strong connection between energy systems and existing institutional structures require regional energy analyses to be exhaustive in efficient, objective and transparent manner. Furthermore, regional energy analyses should be capable of identifying and analyzing such advanced technical solutions that do not comport with the current technical, political or institutional structures. Therefore, a strategic approach is crucial in regional energy planning.

In this thesis, the purpose of regional energy optimization and its implementation as a part of strategic regional energy planning is studied. The topic is approached from a comprehensive viewpoint emphasizing especially the importance of holistic understanding and design. A comprehensive literature research is conducted in which the connection between regional energy optimization and sustainable advanced energy systems is highlighted in an intuitive and illustrative way. In addition, a framework for strategic regional energy planning that utilizes regional energy optimization is presented. The main objective of the framework is to offer readiness for performing practical strategic energy planning involving optimization methods.

Regional energy optimization is found to support a comprehensive, objective and efficient analysis of regional energy systems' design solutions already in the early stage of a design process with minimal manual work requirement. By utilizing optimization methods, the impact of different objectives, initial data, and scenarios on the optimal design solutions can be analyzed thoroughly and interactively. Regional energy optimization also enables systematic identification and thus utilization of the synergy effects emerging in complex advanced energy systems. Consequently, regional energy optimization supports significantly regional decision making process concerning regional energy systems, although presuming that it is utilized within a context of strategic regional energy planning. Moreover, performing a trustworthy regional energy optimization requires holistic understanding and expertise with respect to advanced energy systems and optimization methods.

---

**Keywords** regional energy optimization, strategic energy planning, regional energy planning, sustainable energy system, optimization, renewable energy

---

## Alkusanat

*Olen iloinen, että sain tehdä diplomityöni juuri tästä aiheesta. Tämän työn valmiiksi saattaminen on opettanut minulle valtavan paljon ja uskon todella, että työhön käytetyt luke-mattomat tunnit eivät ole menneet hukkaan. Työn aiheeseen päädyttiin pitkälti oman mie-lenkiintoni johdosta, ja toisaalta myös työn tilaajalla oli kiinnostusta aihetta kohtaan.*

*Haluan kiittää työni valvojaa, Markku J. Virtasta, luottavaisesta, joustavasta ja kannus-tavasta asenteesta koko diplomityöni suorittamisen ajalta. Suureksi ilokseni sain vapau-den tehdä diplomityötäni hyvin itsenäisesti toteuttaen omia näkemyksiäni. Haluan kiittää myös työni ohjaajia, Marko Tulamoa ja Tuomo Liesahoa, sekä erityisesti myös Eero Puu-rusta työlleni suuntaa antaneista rakentavista neuvoista ja siihen uhratusta ajasta. Kiitän myös kaikkia muita diplomityöhöni osallistuneita sekä moninasiin kysymyksiini sinnik-käästi vastanneita henkilöitä. Lisäksi kiitän Sitowise Oy:tä tämän työn rahoittamisesta ja mahdollisuudesta mielenkiintoiseen diplomityöaiheeseen.*

*Erityiskiitoksen osoitan Elinalle työn oikolukemisesta, erinomaisista kommentteista sekä kaikesta tuesta ja kärsivällisyydestä. Kiitos myös opiskelukavereilleni viimeisen reilun viiden vuoden aikana vietetystä yhteisestä laatuajasta koulussa ja sen ulkopuolella. Teistä on ollut suuri ilo ja apu opintojen suorittamisessa sekä niistä irtautumisessa.*

*Lopuksi haluan kiittää vielä vanhempiani ja veljiäni, sillä te olette ohjanneet ja kannus-taneet minua alusta alkaen aina tähän päivään asti.*

Espoo 24.2.2020

*Toni Lahtinen*

Toni Lahtinen

# Sisällysluettelo

*Tiivistelmä*

*Abstract*

*Alkusanat*

*Merkinnät*

*Lyhenteet*

*Käsitteet*

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 1     | Johdanto .....   | 1   |
| 1.1   | Tutkimuksen tausta .....   | 1   |
| 1.2   | Tutkimusongelma ja tutkimuksen tavoitteet .....                              | 3   |
| 1.3   | Tutkimuksen rajaus ja rakenne .....  | 3   |
| 2     | Optimointi .....   | 5   |
| 3     | Alueellinen energiaoptimointi .....  | 12  |
| 3.1   | Kestävä energiajärjestelmä .....   | 12  |
| 3.1.1 | Energiajärjestelmän systeeminäkökulma .....                                  | 12  |
| 3.1.2 | Hajautetun ja uusiutuvan energiantuotannon hyödyt .....                      | 16  |
| 3.1.3 | Energiajärjestelmän suorituskyvyn arviointi .....                            | 21  |
| 3.2   | Edistykselliset alueelliset energiajärjestelmät .....                        | 29  |
| 3.2.1 | Alueellisen energiajärjestelmän määrittely .....                             | 29  |
| 3.2.2 | Uusiutuvan energiajärjestelmän edellytykset .....                            | 36  |
| 3.2.3 | Energiantuotanto-, energianjakelu- ja energian varastointijärjestelmät ..... | 44  |
| 3.2.4 | Alueellisen energiajärjestelmän mallintaminen .....                          | 52  |
| 3.3   | Optimointimenetelmät osana alueellista strategista energiasuunnittelua ..... | 67  |
| 3.3.1 | Strateginen energiasuunnittelu .....   | 67  |
| 3.3.2 | Alueelliset energiaoptimointimenetelmät .....                                | 74  |
| 3.3.3 | Alueellisen strategisen energiasuunnittelun viitekehys .....                 | 88  |
| 4     | Johtopäätökset .....   | 101 |
| 5     | Yhteenveto .....   | 106 |
|       | Lähdeluettelo .....  | 108 |

*Liiteluettelo*

## Merkinnät

### Indeksit

|     |  |
|-----|--|
| $i$ | indeksointiparametri (merkitys määräytyy asiayhteyden mukaan) ( $i \in \mathbb{N}$ ) |
| $j$ | epäyhtälörajoitteen indeksi ( $j \in \mathbb{N}$ )                                   |
| $l$ | yhtälörajoitteen indeksi ( $l \in \mathbb{N}$ )                                      |

### Parametrit

|             |         |   |
|-------------|---------|---|
| $I$         | [MWh/S] | energiaintensiteetti ( $I \in \mathbb{R}^+$ )                           |
| $Q$         | [MWh]   | kokonaisenergiankulutus ( $Q \in \mathbb{R}^+$ )                        |
| $S$         | [-]     | tuotos ( $S \in \mathbb{R}^+$ )   |
| $h$         | [-]     | skenaarion todennäköisyys tai muu painokerroin ( $h \in \mathbb{R}^+$ ) |
| $k$         | [-]     | kohdefunktioiden lukumäärä ( $k \in \mathbb{N}$ )                       |
| $n$         | [-]     | muuttujavektorin muuttujien lukumäärä ( $n \in \mathbb{N}$ )            |
| $s$         | [-]     | skenaarioiden lukumäärä ( $s \in \mathbb{N}$ )                          |
| $\eta_{PT}$ | [-]     | panos–tuotos-hyötysuhde ( $\eta_{PT} \in \mathbb{R}^+$ )                |
| $\lambda$   | [-]     | panosvektorin alkioiden lukumäärä ( $\lambda \in \mathbb{N}$ )          |
| $v$         | [-]     | toimituskerroin (engl. <i>dispatch factor</i> ) ( $0 \leq v \leq 1$ )   |
| $\omega$    | [-]     | tulosvektorin alkioiden lukumäärä ( $\omega \in \mathbb{N}$ )           |

### Symbolit

|     |   |
|-----|---|
| $S$ | käypä alue (engl. <i>feasible region in decision space</i> ) ( $S \subset \mathbb{R}^n$ )                               |
| $Z$ | käyvän alueen kuvaus tavoiteavaruudessa (engl. <i>feasible region in criterion space</i> ) ( $Z \subset \mathbb{R}^k$ ) |

## Lyhenteet

|        |   |
|--------|---|
| 4GDC   | <i>Neljännän sukupolven kaukokylmäverkko. Englanniksi 4th Generation District Cooling.</i>  |
| 4GDH   | <i>Neljännän sukupolven kaukolämpöverkko. Englanniksi 4th Generation District Heating.</i>  |
| 5GDHC  | <i>Viidennen sukupolven yhdistetty kaukolämpö- ja kylmäverkko*. Englanniksi 5th Generation District Heating and Cooling.</i>      |
| AML    | <i>Matemaattinen ohjelmointikieli (yleisnimitys). Englanniksi Algebraic Modeling Language.</i>                                    |
| AMR    | <i>Etäluettava mittari. Englanniksi Automated Meter Reading.</i>  |
| AMS    | <i>Älymittari. Englanniksi Advanced Metering System.</i>  |
| ANN    | <i>Neuroverkot (keinotekoiset). Englanniksi Artificial neural networks.</i>   |
| API    | <i>Ohjelmointirajapinta. Englanniksi Application Programming Interface.</i>   |
| ASI*   | <i>Avainsuorituskykyindikaattori*. Englanniksi Key Performance Indicator.</i>   |
| ATES   | <i>Pohjavesivarantovarasto. Englanniksi Aquifer Thermal Energy Storage.</i>   |
| BAU    | <i>Tavanomainen ratkaisu. Englanniksi Business as Usual.</i>  |
| BCP*   | <i>Binäärikiertovoimala* (geoterminen energia). Englanniksi Binary Cycle Power station.</i>                                       |
| BEM    | <i>Rakennuksen energiamalli. Englanniksi Building Energy Model.</i>   |
| BESS   | <i>Akkuvarasto. Englanniksi Battery Energy Storage System.</i>  |
| BR     | <i>Hyötöreaktori. Englanniksi Breeder Reactor.</i>  |
| BTES   | <i>Porakaivokenttä. Englanniksi Borehole Thermal Energy Storage.</i>  |
| CAES   | <i>Paineilmavarasto*. Englanniksi Compressed Air Energy Storage.</i>  |
| CCHP   | <i>Kolmoistuotanto eli sähkön, lämmön ja kylmän yhteistuotanto. Englanniksi tri-generation; Combined Cooling, Heat and Power.</i> |
| CDA    | <i>Ehdolliseen kysyntään perustuva analyysi*. Englanniksi Conditional Demand Analysis.</i>  |
| CES    | <i>Kryogeeninen energiavarasto*. Englanniksi Cryogenic Energy Storage.</i>  |
| CHP    | <i>Sähkön ja lämmön yhteistuotanto. Englanniksi Combined Heat and Power.</i>  |
| CHP    | <i>Kemiallinen lämpöpumppu*. Englanniksi Chemical Heat Pump.</i>  |
| CPV    | <i>Keskittävä aurinkokenno*. Englanniksi Concentrator Photovoltaics.</i>  |
| CSHp   | <i>Aurinkolämpölaitos. Englanniksi Central Solar Heating plant.</i>   |
| CST    | <i>Keskittävä lämpösähköinen generaattori*. Englanniksi Concentrated Solar Thermoelectric generator.</i>                          |
| CT     | <i>Kaasuturbiini. Englanniksi combustion turbine.</i>   |
| CTES   | <i>Luolavarasto. Englanniksi Cavern Thermal Energy Storage.</i>   |
| CVRMSE | <i>Keskimääräisen neliöllisen virheen variaatiokerroin. Englanniksi Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error.</i>   |
| DE     | <i>Dieselmoottori. Englanniksi diesel-engine.</i>   |

|        |   |
|--------|---|
| DOD    | <i>Akun purkaussyvyys eli maksimi purkausaste (prosentteina tai wattitunteina), joka ei vahingoita akun suorituskykyä normaalia enempää. Englanniksi Depth of Discharge.</i>      |
| DSP*   | <i>Kuivahöyryvoimala* (geoterminen energia). Englanniksi Dry Steam Power station.</i>   |
| DTP*   | <i>Dynaaminen vuorovesivoima*. Englanniksi Dynamic Tidal Power.</i>   |
| EGS    | <i>Tehostettu geoterminen järjestelmä* (geoterminen energia). Englanniksi Enhanced Geothermal System.</i>   |
| EP     | <i>Energiapaalu. Englanniksi Energy Pilings.</i>  |
| EROEI  | <i>Hyödyllisen energian tuotto kulutettua hyödyllistä energiaa kohden (sisältäen sitoutuneen energian). Englanniksi Energy Returned on Energy Invested.</i>                       |
| ESOEI  | <i>Energiavarastoon varastoidun ja energiavarastoon sitoutuneen energian suhde (energiavaraston vastine EROEI-indikaattorille). Englanniksi Energy Stored on Energy Invested.</i> |
| ET*    | <i>Erillistuotanto. Englanniksi separate production.</i>  |
| EUI    | <i>Energiaintensiivisyys. Englanniksi Energy Use Intensity.</i>   |
| FB     | <i>Virtausakku. Englanniksi Flow Battery.</i>   |
| FES    | <i>Vauhtipyörä. Englanniksi Flywheel Energy Storage.</i>  |
| FMI    | <i>Eräs osamallien standardi. Englanniksi Functional Mockup Interface.</i>  |
| FSP*   | <i>Leimuhöyryvoimala* (geoterminen energia). Englanniksi Flash Steam Power station.</i>   |
| GA     | <i>Geneettinen algoritmi. Englanniksi Genetic Algorithm.</i>  |
| GE     | <i>Kaasumoottori. Englanniksi gas engine.</i>   |
| Gen IV | <i>Neljännän sukupolven ydinreaktorit. Englanniksi Generation IV reactors.</i>  |
| GIITS  | <i>Eristetty kausimaavarasto*. Englanniksi Geo Interseasonal Insulated Thermal Storage.</i>   |
| GT     | <i>Kaasuturbiini. Englanniksi gas turbine.</i>  |
| HP     | <i>Lämpöpumppu. Englanniksi heat pump.</i>  |
| HVDC   | <i>Suurjännitetasavirta. Englanniksi high-voltage direct current.</i>   |
| HWR    | <i>Raskasvesireaktori. Englanniksi Heavy Water Reactor.</i>   |
| IEA    | <i>Kansainvälinen energiajärjestö. Englanniksi International Energy Agency.</i>   |
| JSON   | <i>Avoimen standardin tiedostomuoto tiedonvälitykseen. Englanniksi JavaScript Object Notation.</i>  |
| LAES   | <i>Nesteilmavarasto*. Englanniksi Liquid Air Energy Storage.</i>  |
| LCA    | <i>Elinkaariarviointi. Englanniksi Life Cycle Assessment.</i>   |
| LCOE   | <i>Energian LCOE-hinta tai energian elinkaarenaikainen tuotantohinta. Englanniksi Levelized Cost of Energy.</i>   |
| LFR    | <i>Fresnel-levykeräin*. Englanniksi Linear Fresnel Reflector.</i>   |
| LHS    | <i>Latentti lämpövarasto. Englanniksi Latent Heat Storage.</i>  |
| LMB    | <i>Nestemetalliakku*. Englanniksi Liquid Metal Battery.</i>   |
| LOD    | <i>Tarkkuustaso tai yksityiskohtaisuuden taso. Englanniksi Level of Detail.</i>   |
| LTDH   | <i>Matalalämpöverkko. Englanniksi Low Temperature District Heating.</i>   |



|       |   |
|-------|---|
| LTO   | <i>Lämmöntalteenotto. Englanniksi heat recovery.</i>  |
| LWR   | <i>Kevytvesireaktori. Englanniksi Light Water Reactor.</i>  |
| MAE   | <i>Keskimääräinen absoluuttinen virhe. Englanniksi Mean Absolute Error.</i>   |
| MAPE  | <i>Absoluuttinen prosentuaalinen virhe. Englanniksi Mean Absolute Percentage Error/Deviation (MAPD).</i>                      |
| MBE   | <i>Keskimääräinen virhe. Englanniksi Mean Bias Error.</i>   |
| MCFC  | <i>Sulakarbonaattipolttokenno. Englanniksi Solid Oxid Fuel Cell.</i>  |
| MILP  | <i>Kokonaislukuja sisältävä lineaarinen optimointi. Englanniksi Mixed Integer Linear Programming.</i>                         |
| MINLP | <i>Kokonaislukuja sisältävä epälineaarinen optimointi. Englanniksi Mixed Integer Non-Linear Programming.</i>                  |
| MT    | <i>Mikroturbiini. Englanniksi microturbine.</i>   |
| NRMSE | <i>Normalisoitu keskimääräinen neliöllinen virhe. Englanniksi Normalized Root Mean Square Error.</i>                          |
| ORC   | <i>Orgaaninen Rankine-työkierto. Englanniksi Organic Rankine Cycle.</i>   |
| P2X   | <i>(Ylimäärä)sähkön muuntaminen toiseen energiamuotoon. Englanniksi Power-to-X.</i>   |
| PAFC  | <i>Fosforihappopolttokenno. Englanniksi Phosphoric Acid Fuel.</i>   |
| PCM   | <i>Faasimuutosmateriaali. Englanniksi Phase Change Material.</i>  |
| PDC   | <i>Parabolinen lautaskeräin*. Englanniksi Parabolic Dish Collector.</i>   |
| PE    | <i>Prosentuaalinen virhe. Englanniksi Percentage/Percent Error.</i>   |
| PEMFC | <i>Protoninvaihtopolttokenno. Englanniksi Proton Exchange Membrane Cell, Polymer Electrolyte Fuel Cell.</i>                   |
| PES   | <i>Primäärienergiäsäästö. Englanniksi Primary Energy Saving.</i>  |
| PEV   | <i>Sähköverkkoon kytkettävissä oleva ajoneuvo (hybridi- tai sähköajoneuvo). Englanniksi Plug-in Electric Vehicle.</i>         |
| PHES  | <i>Pumppuvoimalaitos. Englanniksi Pumped Hydroelectric Energy Storage, Pumped-Storage Hydroelectricity (PSH).</i>             |
| PS    | <i>Pumppuvoimalaitos. Englanniksi pumped storage.</i>   |
| PSO   | <i>Parviälgoritmi. Englanniksi Particle Swarm Optimization.</i>   |
| PTC   | <i>Parabolinen kourukeräin. Englanniksi Parabolic Trough Collector.</i>   |
| PTES  | <i>Kaivantovarasto. Englanniksi Pit Thermal Energy Storage.</i>   |
| PV    | <i>Aurinkokenno. Englanniksi photovoltaics.</i>   |
| PVp*  | <i>Aurinkovoimala. Englanniksi Photovoltaic Power Plant.</i>  |
| PVT   | <i>Hybridikeräin. Englanniksi photovoltaic thermal hybrid solar collector.</i>  |
| PVTp* | <i>Hybridikeräinvoimala*. Englanniksi Photovoltaic Thermal hybrid solar collector field/farm, solar cogeneration station.</i> |
| RB    | <i>Uudelleenladattava (sähkö)akku. Englanniksi Rechargeable Battery, storage battery, secondary cell.</i>                     |
| RMSE  | <i>Neliöllinen virhe. Englanniksi Root-Mean-Square Error/Deviation (RMSE).</i>  |
| SC    | <i>Superkondensaattori. Englanniksi Supercapacitor, ultracapacitor.</i>   |
| SHS   | <i>Tuntuva lämpövarasto. Englanniksi Sensible Heat Storage.</i>   |

|          |  |
|----------|--|
| SHT      | <i>Pieni vesiturbiini. Englanniksi Small Hydro Turbine.</i>  |
| SMES     | <i>Suprajohtava sähkömagneettinen energiavarasto. Englanniksi Superconducting Magnetic Energy Storage.</i>                 |
| SMGES    | <i>Kiinteä gravitaationaalinen energiavarasto*. Englanniksi Solid Mass Gravitational Energy Storage.</i>                   |
| SMR      | <i>Pienydinvoimala. Englanniksi Small Modular Reactor.</i>   |
| SOFC     | <i>Kiinteäoksidipolttokenno. Englanniksi Solid Oxid Fuel Cell.</i>   |
| SPT      | <i>Aurinkoenergiatorni. Englanniksi Solar Power Tower.</i>   |
| SSS*     | <i>Sorptiovarasto*. Englanniksi Sorption Storage System.</i>   |
| SST      | <i>Lämmön kausisäiliövarasto*. Englanniksi Seasonal Storage Tank.</i>  |
| ST       | <i>Aurinkokeräin. Englanniksi Solar Thermal collector.</i>   |
| Stirling | <i>Stirlingmoottori. Englanniksi Stirling engine.</i>  |
| SUT      | <i>Aurinkotorni (ilmavirtavoimala). Englanniksi Solar Updraft Tower.</i>   |
| TB*      | <i>Vuorovesipato (vuorovesivoima). Englanniksi Tidal Barrier.</i>  |
| TCMs     | <i>Termokemialliset materiaalit. Englanniksi Thermochemical Materials.</i>   |
| TCS      | <i>Termokemiallinen lämpövarasto. Englanniksi Thermochemical Storage.</i>  |
| TEG      | <i>Lämpösähköinen generaattori. Englanniksi Thermoelectric Generator.</i>  |
| TL*      | <i>Vuorovesilaguuni* (vuorovesivoima). Englanniksi Tidal Lagoon.</i>   |
| TSG      | <i>Vuorovesivirtageneraattori*. Englanniksi Tidal Stream Generator.</i>  |
| TTES     | <i>Säiliövarasto. Englanniksi Tank Thermal Energy Storage.</i>   |
| UB       | <i>Ultra-akku*. Englanniksi Ultra Battery.</i>   |
| UBEM     | <i>Alueellinen rakennuksien energiamalli. Englanniksi Urban Building Energy Model.</i>                                     |
| UEM      | <i>Alueellinen energiamalli. Englanniksi Urban Energy Model, Urban-Scale Energy Model (USEM).</i>                          |
| V2G      | <i>Sähköverkkoon kytkettävissä olevien ajoneuvojen hyödyntäminen sähköverkon toiminnassa. Englanniksi Vehicle-to-Grid.</i> |
| VBA      | <i>Microsoftin sovellusohjelmissa makrokielenä käytettävä ohjelmointikieli. Englanniksi Visual Basic for Application.</i>  |
| WECS     | <i>Tuuliturbiini. Englanniksi wind energy conversion system.</i>   |

\* Tässä työssä käytetty lyhenne (ei vakiintunut tai virallinen lyhenne) / vapaa käänös.

## Käsitteet

Alla esitetyt käsitteet (**tummennettu**) ja niiden selitykset (*kursivoitu*) pohjautuvat kirjallisuustutkimukseen. Käsitteen konteksti esitetään suluissa käsitteen perässä, koska konteksti voi vaikuttaa merkittävästi käsitteen tulkintaan. Listaukseen sisältyvät käsitteet esitetään työssä ensimmäisen maininnan tai vaihtoehtoisesti sopivimman kontekstin yhteydessä kursivoituna (saattavat olla eriävässä sijamuodossa). Käsitteiden mahdolliset synonyymit esitetään vinoviivalla (”/”) eroteltuina, siten että ensimmäisenä esitetään niistä suositelluin. Jokaiselle käsitteelle osoitetaan lisäksi englanninkielinen vastine tai vastineet lisätiedonhaun edesauttamiseksi.

### **Aggregaattori** (energiajärjestelmä)

*Energiaverkossa toimiva taho (esimerkiksi yritys), joka muodostaa paikallisesta energiankysynnästä ja -tuotannosta suuremman kokonaisuuden. Tämä kokonaisuus voi osallistua eri energiamarkkinoille, kuten esimerkiksi vuorokausi- tai säätösähkömarkkinoille. Englanniksi aggregator.*

### **Alue** \*

*Maantieteellisesti rajattu kokonaisuus – tässä työssä tarkastellaan erityisesti alueita, jotka ovat tyypiltään urbaaneja ja kokoluokaltaan laajasta korttelista kaupunkiin. Englanniksi neighborhood, region, district.*

### **Alueellinen energiajärjestelmä** \*

*Alueen energiankysyntää palveleva itsenäinen tai vähintään valtakunnallisesta verkosta hetkellisesti irrotettavissa oleva järjestelmä, joka koostuu energiantuotannosta ja -jakelusta sekä energian varastoinnista. Alueellinen energiajärjestelmä voi olla vuorovaikutuksessa myös ympäröivien energiajärjestelmien kanssa. Englanniksi regional energy system, local energy system, district energy system, neighborhood-scale energy system, small-scale energy system, urban energy system (käsitteissä on vivahde-eroja).*

### **Avainsuorituskykyindikaattorit** \*\* (energia-analyysi)

*Energiajärjestelmän suorituskyvyn kannalta olennaisia indikaattoreita, jotka eivät vaikuta optimoinnin lopputulokseen, mutta joita kuitenkin mitataan (simuloimalla) ainakin optimaalisilta ja lähes optimaalisilta suunnitteluratkaisuilta. Englanniksi Key Performance Indicators (KPIs).*

### **Biomassa**

*Kaikki eloperäiset orgaaniset aineet (kasvi- ja eliöperäiset) lukuun ottamatta fossiilisia polttoaineita. Sisältää myös biomassapohjaisen jätteen. Englanniksi biomass.*

### **Dynaaminen optimointi** \*

*Usean muuttujan optimointiongelman optimointi asteittain, muuttuja tai muuttujajoukko kerrallaan, rekursiivisella tavalla ja tyypillisesti ajan suhteen. Englanniksi dynamic programming, dynamic optimization.*

### **Dynaaminen päästökerroin** \*\*

*Energiantuotantolaitoksen tai koko energiajärjestelmän dynaaminen päästökerroin, joka vaihtelee hetkittäisen tuotantoportfolion mukaisesti. Englanniksi dynamic emission factor.*

### **Edistyksellinen energiajärjestelmä \***

*Perinteisestä energiajärjestelmästä poikkeava ja modernin teknologian tuomia mahdollisuuksia mahdollisimman tehokkaasti, järkevästi ja monipuolisesti hyödyntävä energiajärjestelmä. Pyrkii täyttämään funktionsa tehokkaimmalla mahdollisella tavalla. Englanniksi advanced energy system.*

### **Edistyksellinen kysyntäjousto \*\***

*Seuraavan sukupolven edistyksellinen ja reaaliaikainen kysyntäjoustopiirros, jossa kysyntäjousto osallistuu energiantensiivisten teollisuuslaitosten lisäksi pienemmätkin kuluttajat ja tulottajat, kuten yksittäiset asuinkiinteistöt (mahdollisesti kokonaisuuksiksi aggregoituina). Edistyksellinen kysyntäjousto ei ole rajoitettu vain sähkösektoriin, vaan se huomioi kaikki energiasektorit. Englanniksi advanced demand response.*

### **Ehtyvä luonnonvara / Uusiutumaton luonnonvara**

*Luonnonvara jota kulutetaan nopeammin kuin se uusiutuu. Uusiutumattomalla luonnonvaralla tarkoitetaan yleensä täysin uusiutumattoman luonnonvaran lisäksi erittäin hitaasti uusiutuvia luonnonvaroja (ihmisen elinikään suhteutettuna). Englanniksi depleting natural resources, non-renewable resources, finite resources.*

### **Eksergia**

*Energian työhön kykenevä osuus. Eräs energian laadun indikaattoreista. Vastakohta, eli anergia, on puolestaan energian työhön kykenemätön osuus (ts. hukkalämpö). Englanniksi exergy, vastakohta: anergy.*

### **Elinkaariperusteiset kasvihuonekaasupäästöt (energiantuotanto)**

*Energiantuotannon suorat ja epäsuorat, esimerkiksi hiilidioksidiekvivalentit, päästöt. Englanniksi life-cycle greenhouse gas emissions.*

### **Energiajärjestelmä \***

*Järjestelmä, jossa yhdistettyjen prosessien avulla hankitaan ja käytetään energiaa tietyn (esimerkiksi alueellisen) energiantarpeen kattamiseksi. Urbanissa kontekstissa voidaan puhua erityisesti urbaanista energiajärjestelmästä. (Keirstead & Shah 2013). Englanniksi (urban) energy system.*

### **Energiaketju**

*Energianmuunnosprosessi(t), jolla primäärienergia muunnetaan loppuenergiaksi. Englanniksi energy chain.*

### **Energiakäyttökerroin / Käyttökerroin / Kuormituskerroin / Käyttösuhde**

*Yksikötön kerroin, joka kertoo energiajärjestelmän, energiantuotantolaitoksen tai konversiolaitteen keskimääräisesti tuottaman tehon suhteen sen nimellistehoon, tai vastaavasti sen tietyn aikavälin aikana tuottaman (hyödyllisen) energian suhteen samana aikavälinä maksimaalisesti tuotettavissa olevaan (hyödylliseen) energiamäärään (ts. tilanne, jossa esimerkiksi tuotantolaitos toimisi koko kyseisen aikavälin nimellisteholla). Englanniksi capacity factor.*

**Energiamurros**

*Energiajärjestelmien kokonaisvaltainen ja merkittävä muutos. Ennustetun (ja jo käynnissä) olevan seuraavan energiamurroksen, eli energiajärjestelmien vähä/nollahiilisyteen siirtymisen, taustalla toimivat esimerkiksi kestävä kehityksen tavoittelu ja teknologian kehityksen tuomat uudet mahdollisuudet. Englanniksi energy transition.*

**Energian internet**

*Konsepti, jolla tarkoitetaan energiajärjestelmän energiavirtojen automaattista etäohjausta perustuen kattavaan reaaliaikaiseen mitattuun dataan tiedonsiirron tapahtuessa internet-verkon välityksellä. Analogia esineiden internettiin. Englanniksi Internet of Energy (IoE).*

**Energian säästäminen**

*Energian loppukäytön pienentäminen ilman energiatehokkuustoimenpiteitä esimerkiksi käyttötottumuksien muutoksella. Englanniksi energy conservation.*

**Energiantuotanto**

*Muunnosprosessi (voi sisältää yhden tai useamman muunnoksen), jossa primäärienergiaa muunnetaan käyttökelpoiseksi sekundäärienergiaksi. Englanniksi energy production.*

**Energiaomavaraisuus**

*Tietyn alueen (esimerkiksi valtion) kyky itsenäiseen eli muista alueista riippumattomaan energiahuoltoon. Englanniksi energy autarky.*

**Energiasektori**

*Yhteiskunnan osa-alue/pääomakategoria, johon sisältyy energiantuotantoon ja -jakeluun, energian varastointiin ja energiankysyntään liittyvät asiat. Energiasektorilla voidaan tarkoittaa myös yksittäiseen energiavektoriin (esimerkiksi sähköön) liittyvää spesifiä energiainfrastruktuuria ja markkinoita (merkitys riippuu kontekstista). Englanniksi energy sector.*

**Energiatehokkuustoimenpide**

*Energiantuotannon, energianjakelun, energian varastoinnin tai energian loppukäytön energiatehokkuutta parantava toimenpide. Energiantuotannon energiatehokkuustoimenpiteet vähentävät polttoaineen kulutusta ja/tai energiantuotantoinfrastruktuurin laajentamistarvetta. Energian loppukäytön ja energianjakelun energiatehokkuustoimenpiteet pienentävät lisäksi energiankulutusprofiilia pysyvällä tavalla. Englanniksi energy efficiency measures.*

**Energiaturvallisuus**

*Katkeamattoman ja hyvälaatuisen energiahuollon (tai pelkästään energiantuotannon) toimivuuden riskittömyys. Englanniksi security of supply.*

**Energiavarat**

*Luonnonvarat, joita voidaan hyödyntää energiantuotannossa. Englanniksi energy resources.*

**Energiavektori / Energiankuljettaja / Energiankantaja**

*Mahdollistaa tuotetun energian hyödyntämisen eri paikassa ja ajankohdassa. Energiavektoreita voivat siten olla esimerkiksi sähköverkossa sähkövirta (kuljettaa sähköenergiaa), lämpöverkossa vesi (kuljettaa ja varastoi lämpöenergiaa) ja kaasuverkossa kaasuseos (kuljettaa ja varastoi kemiallista energiaa). Siirrettäviä pieniä energiavarastoja (esim. pieni*

sähköakku) ei tyypillisesti kuitenkaan mielletä energiavektoreiksi. Englanniksi energy vector, energy carrier.

### **Epälineaarinen optimointiongelma**

Optimointiongelma, jonka kohdefunktio tai rajoitefunktiot ovat muuttujien epälineaarisia kuvauksia. Englanniksi nonlinear optimization problem. Epälineaarisen optimointiongelman ratkaisemisessa voidaan hyödyntää epälineaarista optimointia. Englanniksi nonlinear optimization, nonlinear programming (NLP).

### **Epäsuorat kasvihuonekaasupäästöt (energiantuotanto)**

Energiantuotannosta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt lukuun ottamatta sen suoraa päästöjä. Energiantuotannon epäsuorat kasvihuonekaasupäästöt syntyvät esimerkiksi materiaalien ja polttoaineen raaka-aineiden keräyksestä, käsittelystä, kuljetuksesta ja jalostuksesta. Englanniksi indirect greenhouse gas emissions, Scope 2 & 3 emissions.

### **Etsintäavaruus / Ratkaisuvaihtoehto / Muuttuja-avaruus (optimointi)**

Kaikkien ratkaisuvaihtoehtojen muodostama kokonaisuus. Englanniksi decision (variable) space, search space, solution space.

### **Fossiilinen polttoaine**

Ehtyvä luonnonvara, joka on muodostunut muinaisten eliöiden fossiloituessa, ja jota voidaan polttamalla hyödyntää energiantuotannossa. Fossiilisia polttoainevaroja ovat esimerkiksi kivihiihi, maakaasu ja raakaöljy (maaöljy). Myös turve voidaan määritellä fossiiliseksi polttoaineeksi. Englanniksi fossil fuel.

### **Geneettinen algoritmi**

Heuristinen optimointialgoritmi, joka jäljittelee luonnonvalintaa etsiessään parasta mahdollista ratkaisua. Geneettisen algoritmin vaiheet ovat alkupopulaation eli ensimmäisten yksilöiden luominen (satunnaisia suunnitteluvaihtoehtoyhdistelmiä), alkupopulaation yksilöiden sopivuusarvojen laskeminen (suunnitteluvaihtoehtojen kohdefunktion arvojen laskeminen), sopivimpien yksilöiden valinta (kohdefunktion arvojen perusteella), risteytys (eri yksilöiden ominaisuuksien eli muuttujien vaihtaminen keskenään) ja mutaatio (satunnainen ja sattumanvarainen yksilöiden muuttujien arvojen muuttaminen). Tämä kierto toistuu, kunnes algoritmille asetetun pysäytyskriteerin ehto toteutuu. Englanniksi genetic algorithm.

### **Geoenergia / Maalämpö**

Geoenergia on maa- ja kallioperään sekä vesistöihin varastoitunutta uusiutuvaa energiaa, joka on osittain peräisin auringonsäteilystä ja osittain maan sisäisestä lämmöstä. Geoenergiaa voidaan hyödyntää rakennuksien lämmityksessä ja viilennyksessä energiakaivojen ja mahdollisten lämpöpumppujen avulla. (Geo)energiakaivot ovat tyypillisesti 150–300 m syviä, mutta geoenergian hyödyntäjiksi voidaan sisällyttää myös noin kilometrin syvyyteen ulottuvat syvät (geo)energiakaivot. Maalämpö on synonyymi geoenergialle, mutta se voidaan myös tulkita siksi osaksi geoenergiaa, mikä koostuu pääosin aurinkoenergiasta. Maa-perässä auringon merkittävä lämmittävä vaikutus ulottuu noin 15 metriin asti. Englanniksi geoenergy, ground heat.

### **Geoterminen energia / Geoterminen lämpö**

Geoterminen energia/lämpö on uusiutuvaa energiaa, joka kerätään maankuoresta monen kilometrin syvyydestä, jossa lämpö on peräisin maan sisäisestä lämmöstä (radioaktiivisuus

+ Maan sisäosien lämpö) eikä auringonsäteilystä. Geotermisessä energiantuotantolaitoksessa paineistetun paluuveden lämpötila voi olla jopa yli 100 °C. Myös käsitettä syvä geotermisen energia/lämpö voidaan käyttää erityisen syvien tuotantoreikien yhteydessä. Geotermisellä lämmöllä viitataan erityisesti pelkkään lämmöntuotantoon (kaukolämpö) ja geotermisellä energialla yleispätevämmiin myös sähköntuotantoon (yhteistuotanto). Englanniksi *deep geothermal energy, enhanced geothermal system (EGS)*.

### **Hajautettu energiajärjestelmä**

*Energiajärjestelmä, joka perustuu pääosin hajautettujen energiavarojen hyödyntämiseen. Englanniksi distributed energy system (DES).*

### **Hajautettu energiantuotanto**

*Energian loppukäytön läheisyydessä pienessä tai erittäin pienessä mittakaavassa tuotettu energia. Palvelee yhtä tai useampaa loppukäyttäjää. Englanniksi distributed energy generation (DG), distributed energy production.*

### **Hajautettu uusiutuva energia / Hajautettu uusiutuva energiantuotanto**

*Uusiutuviin energialähteisiin perustuva hajautettu energiantuotanto. Englanniksi distributed renewable energy.*

### **Hajautettu yhteistuotanto**

*Hajautettu energiantuotanto, jossa hajautetut energiantuotantoyksiköt perustuvat pääosin yhteistuotantoon (esimerkiksi lämpö-sähkö tai lämpö-kylmä). Englanniksi distributed multi-generation (DMG).*

### **Hajautetut energiavarat**

*Hajautetun energiantuotannon, hajautettujen hukkaenergiavirtojen ja hajautettujen energiavarastojen muodostama kokonaisuus. Hajautettujen energiavarojen käsitteellä voidaan tarkoittaa myös luonnossa hajautetusti esiintyviä energiavaroja. Englanniksi distributed energy resources (DER).*

### **Harmaan laatikon malli**

*Valkoisen ja mustan laatikon mallien välimuoto tai yhdistelmä. Englanniksi grey-box model.*

### **Herkkyysanalyysi (optimointi)**

*Optimointiongelman parametreille optimoinnin jälkeen suoritettava analyysi, jossa tutkitaan ja esitetään optimoidun lopputuloksen herkkyys parametrien arvojen muutokselle lukuilla (optimoiduilla) muuttujien arvoilla. Englanniksi sensitivity analysis.*

### **Hierarkkinen optimointi**

*Optimointiongelman ratkaiseminen osissa, niin että alemman tason ongelman ratkaisu siirtyy ylemmän tason ongelman lähtötiedoksi. Hierarkkisen optimoinnin voidaan tulkita olevan yksi dynaamisen optimoinnin kategoria, mutta hierarkkinen optimointi ja dynaaminen optimointi voidaan myös erottaa toisistaan ainakin kahdella tavalla: hierarkkisen optimoinnin osioinnit eivät välttämättä ole kytköksissä aikaan ja hierarkkisessa optimoinnissa ei tyypillisesti ole kuin enintään muutamia optimointitasoja. Englanniksi hierarchical optimization, multi-stage optimization, master-slave optimization, multi-level programming.*

## **Hiilijalanjälki**

*Tietyn toiminnon, palvelun tai tuotteen elinkaarenaikaiset yhteenlasketut suorat ja epäsuorat hiilidioksidiekvivalentit päästöt. Englanniksi carbon footprint.*

## **Huipputehontarpeen samanaikaisuuskerroin \*\***

*Rakennuksien (tai muiden energiaa kuluttavien yksiköiden) energian huipputehontarpeiden (energiamuodoittain) ajallinen yhteneväisyys valitulla aikavälillä (esimerkiksi yksi tunti). Tietyn aikavälin huipputehontarpeen samanaikaisuuskerroin lasketaan jakamalla kyseisen aikavälin samanaikainen (usean rakennuksen) huipputehontarve yksittäisien rakennuksien maksimihuipputehontarpeiden summalla (voi saada arvon 0–1). Varsinkin sähkötehon osalta on esitetty lukuisia kaavoja, joilla samanaikaisuuskerrointa voidaan ennustaa tietämättä alueen tai yksittäisien rakennuksien tehontarvetta. Englanniksi (demand) coincidence factor, simultaneity factor.*

## **Hukkaenergiavirta**

*Toiminnossa tai prosessissa muodostuvaa energian sivuvirtaa, joka ei ole kyseiselle toiminnolle tai prosessille suoraan hyödyllistä, mutta voi olla prosessoituna tai prosessoimattomana toiselle toiminnolle tai prosessille hyödyllistä. Englanniksi waste energy flow.*

## **Hyödyllinen energia / Hyödynnettävissä oleva energia**

*Se osuus tuotetusta energiasta, joka on tietyn tarpeen kannalta hyödyllistä ja hyödynnettävissä. Ylimääräinen energiantuotanto ja hukkaenergia eivät esimerkiksi ole hyödyllistä energiaa ilman erillisiä toimenpiteitä, kuten energian varastointia tai energian laadun muokkaamista. Tietyn tarpeen hukkaenergia voi kuitenkin olla jonkin toisen tarpeen hyödyllistä energiaa. Englanniksi useful energy.*

## **ICT-infrastrukturi**

*Tietotekniset laitteistot, ohjelmistot ja verkkoresurssit, joita järjestelmä tarvitsee kyetäkseen suorittamaan tehtävänsä. Englanniksi information and communication infrastructure (ICT).*

## **Integroitu energiajärjestelmä**

*Energiajärjestelmä, jossa eri energiavektorit ovat, kun on systeemitasolla hyödyllistä, laajasti vuorovaikutuksissa toistensa kanssa. Englanniksi integrated energy system.*

## **Kasvihuonekaasu**

*Kaasu, joka ilmakehään päästyään voimistaa kasvihuoneilmiötä eli päästää avaruudesta tulevaa auringonsäteilyä lävitseen enemmän kuin Maan pinnalta heijastuvaa lämpösäteilyä takaisin avaruuteen (lämpösäteily absorboituu suureksi osaksi ilmakehässä kasvihuonekaasuihin). Englanniksi greenhouse gas.*

## **Keskitetty energiantuotanto**

*Hajautettua energiantuotantoa suuremmassa mittakaavassa ja tyypillisesti kauempana loppukäyttöä sijaitseva energiantuotantomuoto. Harvat suurikapasiteettiset energiantuotantolaitokset palvelevat kukin erittäin suurta määrää loppukäyttäjiä (eri loppukäyttäjiä). Englanniksi centralized (energy) generation, centralized (energy) production.*

## **Kestävä alueellinen energiajärjestelmä \*\*\***

*Kestävän energiajärjestelmän ja alueellisen energiajärjestelmän yhdistelmä. Englanniksi sustainable regional energy system \*\*\*.*



**Kestävä energiajärjestelmä**

*Ympäristöllisesti, sosiaalisesti ja taloudellisesti kestävä energiajärjestelmä eli kestävä kehityksen tavoitteita noudattava ja edesauttava energiajärjestelmä. Englanniksi sustainable energy system.*

**Kohdefunktio / Tavoitefunktio**

*Optimoinnin tavoitteen matemaattinen esitystapa. Englanniksi objective function.*

**Kuormansiirto (kysyntäjousto)**

*Kysyntäjouston toimenpide, jossa energian loppukäytön ajankohtaa siirretään energiajärjestelmää hyödyntävällä tavalla väliaikaisesti normaalitilanteesta poikkeavaksi, niin että loppukäyttäjän nettoenergiankulutus ei kuitenkaan muutu. Englanniksi load shifting.*

**Kysynnän muokkaaminen \*\* (energiajärjestelmä)**

*Kysyntäjouston, energiatehokkuustoimenpiteiden ja energian säästämisen muodostama kokonaisuus. Englanniksi demand side management (DSM).*

**Kysyntäjousto \* / Kuorman ohjaaminen \* (energiajärjestelmä)**

*Kysyntäjousto on energian loppukäytön muokkaamista väliaikaisesti energiajärjestelmän kannalta hyödyllisellä tavalla. Näin ollen pysyviä energiatehokkuustoimenpiteitä ei luokitella kysyntäjoustoksi. Energian säästäminen on kysyntäjousto silloin, kun se on luonteeltaan väliaikaista ja sillä on energiajärjestelmää tasapainottava vaikutus. Englanniksi demand response (DR).*

**Käypä alue / Käypä joukko / Käypä ratkaisujoukko (optimointi)**

*Rajoiteyhdytöt toteuttava osa etsintäavaruudesta. Englanniksi feasible region, feasible region in decision space.*

**Lineaarinen optimointiongelma**

*Optimointiongelma, jonka kohdefunktio ja rajoitefunktio ovat muuttujien lineaarisia kuvauksia. Englanniksi linear optimization problem. Lineaarisen optimointiongelman ratkaisemisessa käytetään lineaarista optimointia. Englanniksi linear optimization, linear programming (LP).*

**Loppuenergia**

*Loppukäytön kattamiseen vaadittava energia. Esimerkiksi jos sähköä käytetään rakennuksen lämmitykseen (lämpövastuksien tai lämpöpumpun avulla), niin loppuenergialla tarkoitetaan lämmitystarpeen kattamiseen vaadittavaa lämpöenergiaa eikä sähköenergiaa. Englanniksi final energy.*

**Loppukäyttäjä / Kuluttaja / Asiakas (energiajärjestelmä)**

*Loppuenergiaa kuluttava taho eli energiajärjestelmän asiakas, jonka tarpeita varten energiaa tuotetaan (energiajärjestelmän muiden asiakkaiden ohella). Englanniksi energy end user, customer.*

**Loppukäyttö / Kysyntä (energiajärjestelmä)**

*Energian loppukäyttäjien energiantarve. Energiaketjun viimeinen osa. Englanniksi (final) energy consumption, (final) energy demand.*

## **Luonnonvarat**

*Luonnollisesti olemassa olevat (ts. ihmisistä riippumattomat) ja ihmisten saatavissa olevat asiat, joita ihmiskunta voi hyödyntää omaksi edukseen. Englanniksi natural resources.*

## **Marginaalipäästökerroin**

*Marginaalituotannon päästökerroin. Marginaalipäästökerroin kertoo, kuinka paljon yhden energiayksikön kysynnän lisääminen aiheuttaa tietyssä ajanhetkenä päästöjä, tai vastaavasti kuinka paljon yhden energiayksikön vähentäminen vähentää tietyssä ajanhetkenä päästöjä. Marginaalipäästökerroin voidaan siis mieltää energijärjestelmän kysynnän päästökertoimen derivaataksi. Englanniksi marginal emission factor.*

## **Marginaalituotanto / Säättövoima**

*Energiajärjestelmässä nk. merit order -ilmiön (engl. merit order effect) mukaisesti tietyssä ajanhetkenä viimeisimpänä käynnistetty energiantuotantotapa, eli marginaalikustannuksiltaan kyseisen ajanhetken tuotantoportfolion kallein ja usein myös saastuttavin energiantuotantotapa. Energiantuotannon ja -kysynnän tasapainottamiseen kykenevää tehonmuutosherkkää energiantuotantoa, erityisesti sähkösektorilla, kutsutaan myös säättövoimaksi. Englanniksi marginal production, varying production.*

## **Mikroverkko**

*Kansallisesta energiaverkosta ainakin hetkellisesti irrotettavissa oleva paikallisen energiantuotannon ja -kysynnän muodostama kokonaisuus. Englanniksi microgrid (MG).*

## **Mittakaavaetu / Skaalaetu / Suuruuden ekonomia**

*Tyypillinen ilmiö, jossa tuotantomäärän kasvaessa keskimääräiset kustannukset tuotosta kohden laskevat. Englanniksi economies of scale.*

## **Monitavoiteoptimointi**

*Optimointi, joka sisältää vähintään kaksi (toisistaan risteävää) tavoitetta. Englanniksi multi-objective optimization/programming, multiple criteria optimization, multicriteria optimization, multiattribute optimization, Pareto optimization.*

## **Mustan laatikon malli**

*Tietokonemalli, joka muuntaa syöttötiedot tuloksiksi läpinäkymättömällä tavalla: mallin sisäinen toiminta on mallin käyttäjältä täysin piilossa tai hyvin epäselvää. Mustan laatikon mallin tulosten luotettavuuden arviointi on siten hankalaa, ellei jopa mahdotonta. Englanniksi black box model.*

## **Muunnettavuus (energiavirrat)**

*Suhteellinen energiamuodon laadun mittari. Jos energiamuoto voidaan muuntaa helposti (eli hyvällä hyötysuhteella) toiseksi energiamuodoksi, sen suhteellinen muunnettavuus kyseiseksi energiamuodoksi on hyvä. Englanniksi transformity.*

## **Muuttuja (optimointi)**

*Ominaisuus tai asia, jolle etsitään optimoinnin avulla optimaalista ratkaisua. Muuttujajoukolla tarkoitetaan (yhden tai) usean muuttujan ryhmää (huomaa, että muuttujajoukko voi olla muuttujavektorin osajoukko tai muodostaa koko muuttujavektorin). Englanniksi decision variable, muuttujajoukko: set of decision variables.*

### **Muuttujaehdokas \*\*\***

*Optimointiin mahdollisesti sisällytettävä muuttuja. Muuttujaehdokkaiden sisällyttäminen tai pois jättäminen optimoinnista voidaan perustella esimerkiksi parametrisen analyysin avulla. Englanniksi decision variable candidate \*\*\*.*

### **Muuttujan etsintäalue**

*Optimoinnin jokaiselle muuttujalle erikseen määritettävä arvojoukko (ts. etsintäalue), jonka sisältä muuttujalle etsitään parasta mahdollista ratkaisua (asetetun tavoitteen mukaisesti). Muuttujan etsintäalueen voi muodostaa myös koko sen määrittelyjoukko (esimerkiksi positiiviset reaaliluvut). Englanniksi (decision variable) search range.*

### **Muuttujavektori (optimointi)**

*Muuttujajoukko, jolle haetaan optimaalista ratkaisua. Muuttujavektori voi sisältää yhden tai useamman muuttujan siten, että se muodostaa määritetyillä muuttujavektorin muuttujien arvoilla, eli muuttujavektorin arvojoukolla, yhden pisteen etsintäavaruuteen. Englanniksi decision vector, vector of decision variables.*

### **Nettopäästöt**

*Tietyn systeemin (esimerkiksi energiajärjestelmän) elinkaarenaikaisten päästöjen (positiivinen) ja sen elinkaarenaikaisten sitoutuneiden päästöjen (negatiivinen) summa. Nettopäästöillä viitataan tyypillisesti kasvihuonekaasupäästöihin, mutta ne voidaan yleistää koskemaan mitä tahansa ympäristölle haitallisia päästöjä. Englanniksi net emissions.*

### **Optimoinnin ratkaisu / Optimaalinen ratkaisu**

*Jos optimoinnissa on yksi tavoite, niin optimoinnin ratkaisu on muuttujavektorin arvojoukko, joka tuottaa pienimmän tai suurimman kohdefunktion arvon. Jos optimoinnissa on monta (risteävää) tavoitetta, niin optimoinnin ratkaisun muodostaa muuttujavektorin arvojoukot, jotka muodostavat tavoiteavaruuteen Pareto-rintaman. Englanniksi solution of optimization.*

### **Optimointi**

*Tietyn ongelman parhaan mahdollisen ratkaisun tai ratkaisujen systemaattista etsintää. Matemaattisia optimointimenetelmiä hyödyntävästä optimoinnista voidaan käyttää erikseen termiä matemaattinen optimointi. Englanniksi optimization, optimisation, mathematical programming.*

### **Optimointimallintaminen**

*Tietokonemallintamista, jossa hyödynnetään matemaattisia optimointimenetelmiä parhaan mahdollisen ratkaisun löytämiseksi. Usein tämä toteutetaan erillistä optimoinnin osamallia hyödyntäen. Englanniksi optimization modeling.*

### **Optimointiongelma / Optimointitehtävä**

*Optimointiongelmallalla tarkoitetaan optimoinnin tavoitteiden, muuttujien ja rajoitteiden matemaattista kuvausta. Englanniksi optimization problem.*

### **Parametrinen analyysi (optimointi)**

*Optimoinnin muuttujille ja muuttujaehdokkaille ennen varsinaista optimointia suoritettava analyysi, jossa selvitetään, millä arvoalueella kukin muuttuja ja muuttujaehdokas vaikuttavat kohdefunktion arvoon eniten. Parametrisen analyysin tulosten perusteella kohdefunktion*

kannalta vähämerkityksiset muuttujaehdokkaat voidaan rajata pois optimoinnista, jonka jälkeen jäljelle jääville muuttujille voidaan määrittää etsintäalueet. Parametrisen analyysin avulla voidaan siis rajata optimointiongelman etsintäavaruutta. Englanniksi *parametric analysis*.

### **Perinteinen energiajärjestelmä \***

Keskitettyyn fossiilisia polttoaineita hyödyntävään energiantuotantoon, hierarkkiseen topologiaan ja yksisuuntaisiin energiavirtoihin perustuva energiajärjestelmä, joka pohjautuu pitkälti 1900-luvun alkupuolella kehitettyyn energiajärjestelmäkonseptiin. Eri energiavektorit ovat suurimmaksi osaksi eriytettyjä toisistaan, energiajärjestelmän automatisaation ja älykkyyden taso on hyvin rajallista ja kuluttajat ovat passiivisessa roolissa. Englanniksi *traditional energy system, conventional energy system*.

### **Peruskuorma (energiajärjestelmä)**

Energiajärjestelmän tasolla tasaisena ja vakaana pysyvä energiantarve. Englanniksi *baseload*. Peruskuorman kattamiseen tarkoitettuja energiantuotantolaitoksia kutsutaan perustai pääkuormalaitoksiksi ja erityisesti sähkösektorilla perusvoimalaitoksiksi. Englanniksi *baseload power plant, unvarying power plant*.

### **Peruskuorma (rakennuksen energiantarve) \*\***

Rakennuksen energiantarpeen osuus, johon ihmisen käyttäytymisellä ei tyypillisesti ole merkittävää vaikutusta, ja jota ei siten välttämättä tarvitse mallintaa stokastisella tavalla. Esi-merkiksi rakennuksen lämmitystarve ja kiinteistöautomaatiikan sähköntarve voidaan mieltää osaksi rakennuksen peruskuormaa (pois lukien harvinainen äärikkäyttäytyminen, kuten normaalia merkittävästi suurempien sisälämpötilojen ylläpitäminen). Englanniksi *building baseload, apartment baseload*.

### **Polkuriippuvuus**

Teoria, jonka mukaan aiemmin tehdyt päätökset voivat vaikuttaa nykyisiin päätöksentekomahdollisuuksiin, vaikka aiemmin vallinneet päätökseen vaikuttaneet olosuhteet eivät olisi enää voimassa. Myös kompleksisuusteorian käsite, jonka mukaan tietyn systeemin aiemmat valinnat vaikuttavat kyseisen systeemin tulevaisuuden valintamahdollisuuksiin. Englanniksi *path dependence*.

### **Primäärienergia**

Luonnonvaraisen jalostamattoman energialähteen (uusiutuvan tai uusiutumattoman) sisältämä energia. Energiantuotannon energiaketjun ensimmäinen osa. Englanniksi *primary energy*.

### **Rajoitefunktio / Rajoiteyhtälö (optimointi)**

Optimointiongelmaan matemaattisessa muodossa määritettävä ehto, joka optimaalisen ratkaisun tulee täyttää. Englanniksi *constraint function*.

### **Ryhmäajattelu**

Tunnettu psykologinen ilmiö, joka ilmenee erityisesti korkean koheesion omaavan ryhmän päätöksentekotilanteessa johtaen irrationaaliseen päätöksentekoon, jossa päätökset perustuvat enemmänkin ryhmän erimielisyyden minimoimiseen kuin rationaaliin perusteluihin ja kriittisiin arviointeihin. Englanniksi *groupthink, groupthinking*.

**Sekundäärienergia \***

*Primäärienergia keskitettynä, jalostettuna ja/tai muunnettuna energiavektoriksi, joka mahdollistaa sen hyödyntämisen erilaisissa sovelluksissa. Englanniksi secondary energy.*

**Simulointi**

*Mallintamisen tuloksena syntyneen mallin ajaminen tietyillä lähtötiedoilla eli simulaation suorittaminen. Simulaattori on simulointiin kykenevä työkalu (esimerkiksi tietokoneohjelma). Englanniksi simulation (simulointi), simulator (simulaattori).*

**Sitoutunut energia**

*Tuotoksen tuottamiseen, käyttämiseen ja kierrättämiseen/hävittämiseen (tai vain valittuihin osiin näistä) tarvittavien energiamäärien summa. Englanniksi embodied energy.*

**Stokastinen optimointi**

*Optimointia, jossa jokainen optimointikerta johtaa eri lopputulokseen ongelmanasettelun stokastisista parametreista johtuen. Englanniksi stochastic optimization.*

**Suorat kasvihuonekaasupäästöt (energiantuotanto)**

*Energiantuotannon energian muunnosvaiheessa (sekundäärienergiaksi) ilmakehään vapautuvat kasvihuonekaasupäästöt. Esimerkiksi polttovoimalaitoksen palamisprosessista ilmakehään vapautuvat kasvihuonekaasupäästöt. Englanniksi direct emissions, Scope 1 emissions.*

**Tavoiteavaruus / Kohdeavaruus (optimointi)**

*Yhden tai useamman kohdefunktion kuvaus etsintäavaruudesta. Englanniksi criterion space, objective space.*

**Tehonmuutosherkkyys (energiantuotanto)**

*Energiantuotantoyksikön kyky säätää tehoaan. Suuri tehonmuutosherkkyys tarkoittaa hyvää tehonsäätökykyä. Energiantuotantoyksikön tehonmuutosherkkyys ei ole välttämättä sama tehoa nostettaessa ja laskettaessa, ja se voi riippua myös energiantuotantoyksikön kuormitus-tilanteesta lineaarisesti tai epälineaarisesti. Englanniksi ramping rate.*

**Toimijapohjainen mallintaminen**

*Tietokonemallintamisen menetelmä, jossa järjestelmän yksittäisten toimijoiden (agenttien) väliset vuorovaikutukset tapahtuvat ennalta määritettyjen sääntöjen mukaan. Toimijapohjaisella mallintamisella pyritään esimerkiksi simuloimaan ihmisten käyttäytymistä. Englanniksi agent-based modeling.*

**Tuluttaja (energiajärjestelmä)**

*Kuluttaja joka on myös tuottaja. Toisin sanoen kuluttaja, joka ottaa energiaverkosta energiaa, mutta myös syöttää energiaverkkoon energiaa oman paikallisen energiantuotannon avulla. Englanniksi prosumer.*

**Täysin uusiutuva energiajärjestelmä**

*100 %:sti uusiutuvaan energiaan perustuva energiajärjestelmä. Englanniksi 100% renewable energy system.*

**Utopiapiste (optimointi)**

*Monitavoitteisessa optimoinnissa tavoiteavaruuden ideaalinen piste, joka vastaa kunkin kohdefunktion miniarvoja Pareto-rintamassa. Utopiapistettä ei voida käytännössä saavuttaa. Englanniksi utopian point, utopia point, ideal point.*

**Uusiutuva alueellinen energiajärjestelmä \*\*\***

*Uusiutuvan energiajärjestelmän ja alueellisen energiajärjestelmän yhdistelmä. Englanniksi renewable regional energy system \*\*\*.*

**Uusiutuva energia \* / Uusiutuva energiantuotanto**

*Energiantuotanto joka perustuu uusiutuviin energialähteisiin. Englanniksi renewable energy.*

**Uusiutuva energiajärjestelmä**

*Pääosin tai täysin uusiutuvaan energiaan perustuva energiajärjestelmä. Englanniksi renewable energy system.*

**Uusiutuva energialähde / Uusiutuva energiavara**

*Uusiutuva luonnonvara, jota voidaan hyödyntää energiantuotannossa. Esimerkiksi veden virtaus, tuuli, auringonsäteily, geoenergia, geoterminen energia ja biomassa (jos biomassan kulutusnopeus ei ylitä sen luonnollista muodostumisnopeutta). Englanniksi renewable energy resource.*

**Uusiutuva energiavirta**

*Uusiutuva energialähde, joka esiintyy luonnossa virtauksenomaisessa muodossa. Esimerkiksi tuuli, veden ja aaltojen liike sekä auringonsäteily. Englanniksi renewable energy flow.*

**Uusiutuva luonnonvara**

*Luonnonvara, joka uusiutuu luonnollisesti luonnon kiertokulun tuloksena siten, että sen kulutusnopeus on enintään samalla tasolla kuin sen luonnollinen muodostumisnopeus – mitä suurempi ero kulutusnopeuden ja luonnollisen muodostumisnopeuden välillä on, sitä vähemmän tai enemmän kyseinen luonnonvara on uusiutuva. Englanniksi renewable resource.*

**Uusiutuva polttoaine**

*Uusiutuva luonnonvara, jota voidaan polttamalla hyödyntää energiantuotannossa. Esimerkiksi biomassa, biopolttoaineet ja vety(polttoaine). Englanniksi renewable fuel.*

**Vaihteleva kuorma (energiajärjestelmä)**

*Energiajärjestelmän tasolla stokastisella tavalla vaihteleva energiantarve. Englanniksi varying load.*

**Vaihteleva kuorma (rakennuksen energiantarve) \*\***

*Rakennuksen energiantarpeen osuus, johon ihmisen käyttäytymisellä on suora ja merkittävä vaikutus, ja joka olisi siten syytä mallintaa stokastisella tavalla. Esimerkiksi rakennuksen valaistuksen ja laitteiden sähköntarve sekä lämpimän käyttöveden tarve voidaan mieltää osaksi rakennuksen vaihtelevaa energiankulutusta. Englanniksi building varying load, apartment varying load.*

### **Vaihteleva uusiutuva energia / Epäsäännöllinen uusiutuva energia**

*Uusiutuva energiantuotanto, joka ei ole jatkuvasti eikä täysin ennustettavasti käytettävissä (esim. tuulivoima). Uusiutuva energiantuotanto on tyypillisesti vaihtelevaa energiantuotantoa. Muut energiantuotantotavat puolestaan eivät tyypillisesti ole vaihtelevia luonteeltaan. Englanniksi variable renewable energy (vRE).*

### **Valkoisen laatikon malli**

*Tietokonemalli, jonka toimintaperiaate on selkeästi esillä ja ymmärrettävissä. Valkoisen laatikon mallissa myös tuodaan selvästi ilmi, mitkä lähtötiedot tuottavat mitä lopputuloksia ja millä alkuoletuksilla. Valkoisen laatikon mallilla, varsinkin insinööritieteissä, voidaan lisäksi tarkoittaa, että malli perustuu fysikaalisten ilmiöiden bottom-up matemaattiseen muotoilemiseen eikä top-down tai heuristisiin menetelmiin. Englanniksi white-box model.*

### **Varavoima (energiajärjestelmä)**

*Peruskuormalaitoksen toimintakatkon (esimerkiksi huoltoseisokki tai tekninen vika) aiheuttaman energiantuotantovajeen korvaava nopeasti käynnistyvä energiantuotanto, jota ei käytetä normaalitilanteessa. Englanniksi emergency power, back-up power. Varavoimaa tuottavia energiantuotantolaitoksia kutsutaan puolestaan varavoimalaitoksiksi. Englanniksi back-up power system, emergency power system. Varavoimalla voidaan tarkoittaa myös yksittäisen rakennuksen tai alueen varavoimalaitosta tai varavoimakonetta, jolla pyritään välttämään energiakatkokset (tyypillisiä esimerkiksi sairaaloissa).*

### **Virtuaalinen voimalaitos**

*Hajautettujen energiantuotantoyksiköiden ryhmä, jota voidaan älykkäässä energiajärjestelmässä ohjata kokonaisuutena, niin että ne muodostavat eräänlaisen ajatuksellisen voimalaitoksen (tai energiantuotantolaitoksen). Englanniksi virtual power plant.*

### **Ympäristölämpö**

*Ympäristöön, esimerkiksi maaperään, ilmaan tai vesistöön, sitoutunut lämpö, jota voidaan hyödyntää energiantarpeen kattamiseen suoralla tavalla tai prosessoituna (esimerkiksi lämpöpumpuilla). Englanniksi ambient heat.*

### **Älykoti**

*Esimerkiksi kodinkoneiden, viihdelaitteiden ja sisäilmaolosuhteiden hallinnassa sekä energian ja veden säästämässä kokonaisvaltaista kiinteistöautomaatiota ja esineiden internetiä (IoT) hyödyntävä asunto. Englanniksi smart home.*

### **Älykäs energiajärjestelmä \***

*Energiajärjestelmä, jonka operoinnissa hyödynnetään kattavasti ja mahdollisimman reaaliaikaisesti edistyneistä ICT-infrastruktuuria, jotta energiajärjestelmä toimisi mahdollisimman tehokkaasti ja luotettavasti. Englanniksi smart energy system (SES).*

### **Älymittari / Nettomittari / Varttimittari (energiajärjestelmä)**

*Kaksisuuntaiseen mittarointiin kykenevä ja etäluettava energiankäytön mittari. Mahdollistaa energiankäytön nettomittaroinnin (ts. ottaa huomioon verkosta otetun ja verkkoon syötetyn energian) ja seuraamisen alle tunnin, jopa 5 minuutin tarkkuudella (tai vielä lyhyemmällä aikavälillä). Englanniksi smart meter, next generation smart meter.*

- \* Tässä työssä käytetty käsitteen määritelmä (käsitteen määritelmä erityisen konteksti-riippuvainen).
- \*\* Vieraskielisen käsitteen uusi suomennos (kirjoittajan parhaan tietämyksen mukaan).
- \*\*\* Tässä työssä luotu käsite ja määritelmä (kirjoittajan parhaan tietämyksen mukaan).



# 1 Johdanto

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Kansainvälisesti asetetut ilmastotavoitteet ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi vaativat globaalia ja huomattavaa energiantuotannon, rakentamisen, maankäytön ja liikenteen *kasvihuonekaasupäästöjen* vähenemistä lyhyellä aikavälillä (IPCC 2018). Energiantuotanto- ja -kulutusjärjestelmien kohdalla tämä vaatii radikaalia muutosta, jota kutsutaan *energiamurrokseksi*. Ilmastonmuutoksen hillitsemisen ohella energiamurroksen tärkeimpiä ajureita ovat muun muassa fossiilisten polttoaineiden ehtyminen, energiaomavaraisuuden tavoittelu, kattottoman ja hyvälaatuisen energianjakelun varmistaminen, ilmaisten luonnonvarojen ja resurssien optimaalinen hyödyntäminen sekä energijärjestelmän kokonaisenergiatehokkuuden ja ilmanlaadun parantaminen – ja kaikesta tästä kumpuava energiamurroksen valtava taloudellinen potentiaali. Rakennuksien energiatehokkuudella ja vähähiilisyydellä on tunnetusti suuri merkitys ilmastotavoitteiden saavuttamisessa: rakennukset kattavat noin 40 % maailman energiankulutuksesta ja noin 30 % ihmisten toiminnan aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä (Kammen & Sunter 2016). Monissa maissa, kuten Suomessa, onkin asetettu tai tullaan asettamaan asteittain tiukentuvia energiatehokkuus- ja vähähiilisyysvaatimuksia rakennuksille. Näitä tavoitteita on yhä vaikeampi saavuttaa tavanomaisilla suunnitteluratkaisuilla, mikä luo tarpeen löytää rakennuksille parhaat mahdolliset vaihtoehtoiset suunnitteluratkaisut, jotka täyttävät asetetut vaatimukset rikkomatta tapauskohtaisia reunaehtoja. Parhaan mahdollisen suunnitteluratkaisun etsiminen voidaan tehdä systemaattisesti, kattavasti ja objektiivisesti hyödyntäen optimointimenetelmiä. Yksittäisien rakennuksien energiasuunnittelussa hyödynnetäänkin optimointimenetelmiä vakiintuneesti jo kaupallisella tasolla, minkä on mahdollistanut viime vuosikymmenien aikana tehty aihetta koskeva perusteellinen tieteellinen tutkimus.

Yksittäisien rakennuksien energiaoptimoinnilla ei kuitenkaan voida tarkastella, kuinka koko alueen (esimerkiksi naapuruston tai kaupungin) energiantuotantoratkaisu, alueen energiavirtojen integroiminen, aluetason energian varastoiminen ja hukkaenergiavirtojen hyödyntäminen tai mikä tahansa muu alueellinen suunnitteluratkaisu vaikuttaa koko alueen energiatehokkuuteen ja ympäristöystävällisyyteen. Toisin kuin esimerkiksi teollisuudessa, energijärjestelmissä ei olla vielä laajamittaisesti hyödynnetty eri prosessien ja sektorien optimaalisella integroimisella ja automatisoinnilla saavutettavia synergiahyötyjä. Energijärjestelmissä merkittävät synergiahyödyt esiintyvät aluetasolla, joka on tyypillisesti myös taso, jolla energijärjestelmiä koskeva toimeenpano tapahtuu. Kaupungeissa asuu jo yli puolet maailman ihmisistä, ja niissä on ennustettu tapahtuvan noin 90 % tämän vuosisadan väestönkasvusta (Keirstead & Shah 2013). Tästä johtuen erityisesti kaupunkialueiden energia- ja ympäristötoimenpiteet tulevat olemaan ratkaisevassa asemassa maailman kehityssuunnan määrittelyssä. Kaupunkien ja myös muiden alueiden energijärjestelmien kokonaisvaltainen suunnittelu optimointimenetelmiä hyödyntäen, eli alueellinen energiaoptimointi, onkin varsinkin viimeisen reilun kymmenen vuoden aikana muodostunut maailmanlaajuisesti erittäin ajankohtaiseksi tutkimusaiheeksi. Tämä päätelmä perustuu pääosin kahteen havaintoon: alueellista energiaoptimointia koskevien tutkimuksien määrä on kiihtyvässä kasvussa ja hiili-neutraaliuteen pyrkivien kaupunkien ja muiden alueiden määrä kasvaa maailmanlaajuisesti jatkuvasti. Energijärjestelmien suunnittelun painopiste on ylipäätään siirtymässä kohti kokonaisvaltaista systeemioptimointia pelkästään yksittäisien rakennuksien osioptimoinnin sijasta, koska on ymmärretty, että tällä tavoin voidaan saavuttaa hyvin merkittäviä parannuksia energijärjestelmien suorituskykyyn.

Alueellinen energiaoptimointi ei kuitenkaan ole mielekäästä, tai ainakaan sen potentiaalia ei voida täysin hyödyntää, jos energijärjestelmä tai yhteiskunta asettaa merkittäviä teknisiä, taloudellisia tai sosiaalisia rajoitteita toteutuskelpoiselle ratkaisulle. Perinteiset energijärjestelmäratkaisut perustuvat rajoitetusti automatisoituun keskitettyyn, yksisuuntaiseen ja hierarkkiseen topologiaan, joka ei alun perinkään ole suunniteltu vaihtelevaa uusiutuvaa energiantuotantoa varten tai huomioimaan kuluttajia aktiivisena osana energijärjestelmää. Perinteisissä energijärjestelmissä on merkittäviä teknisiä rajoitteita esimerkiksi hajautetun energiantuotannon laajamittaiselle lisäämiselle, minkä takia kattava energiamurros ja siten myös alueellinen energiaoptimointi vaatii energijärjestelmien päivittämistä nykyaikaan 1900-luvun konsepteista kohti edistyksellisiä energijärjestelmiä. Vallitsevat energiamarkkinat, sääntely ja ihmisten yleinen mielipide puolestaan asettavat energijärjestelmille taloudellisia ja sosiaalisia rajoitteita, minkä vuoksi niitä ei voida irrottaa alueellisen energiaoptimoinnin kontekstista.

Alueellisella energiaoptimoinnilla ei vielä ole vakiintuneita ja helposti lähestyttäviä toteutustapoja, mikä pitkälti estää sen hyödyntämisen käytännöllisessä alueellisessa energiasuunnittelussa. Toisena merkittävä esteenä voidaan mainita alueellista energiaoptimointia koskevan kokonaisvaltaisen ja jäsennellyn tiedon puute – eräänlainen informaatiokatkos uusimman tieteellisen tutkimuksen ja käytännöllisen suunnittelun välillä. Konkreettisia esimerkkejä edistyksellisistä alueellisista energijärjestelmistä varsinkin Suomen olosuhteissa on myös erittäin rajoitetusti, mikä edelleen lisää kaupunkien ja suunnittelijoiden kynnystä alueellisen energiaoptimoinnin hyödyntämiseen. Tänä päivällä päätöksillä koskien alueellisia energijärjestelmiä ja alueiden energiatehokkuustoimenpiteitä on kuitenkin vuosikymmenien päähän ulottuvia vaikutuksia, minkä vuoksi juuri nyt tulisi tehdä hyvin informoituja ja objektiivisia parhaita mahdollisia päätöksiä. Luonnollisesti, parhaat mahdolliset päätökset riippuvat siitä mitä tavoitellaan. Tässä työssä oletetaan ja perustellaan, että kestävyyyteen pyrkiminen on yleisesti tavoiteltava itseisarvo alueellisten energijärjestelmien kohdalla. Alueellisten energijärjestelmien osalta kestävään kehitykseen pyrkiessä olisi välttämätöntä ensinnäkin ymmärtää, mitä tarkoittaa alueellinen kestävä energijärjestelmä ja kuinka sen kestävyyttä voidaan mitata. Tämän tiedon perusteella alueelliselle energiaoptimoinnille osataan muotoilla yhteiskunnan kestävää kehitystä edistävä tavoite tai tavoitteet. Toisaalta alueellista energiaoptimointia tehdessä on tiedostettava, mitä energiamurros tarkoittaa alueellisten energijärjestelmien osalta, miten se niihin vaikuttaa, ja mitä se niiltä edellyttää. Kuten aiemmin mainittiin, alueellinen energiaoptimointi ei ole mielekäästä ilman energijärjestelmien murrosta. Alueellisen energiaoptimoinnin suorittamiseen tarvitaan edellä mainittujen osaamistarpeiden lisäksi mahdollisimman luotettavia, kokonaisvaltaisia ja läpinäkyviä, mutta samalla kuitenkin helposti lähestyttäviä ja ajankäytöllisesti maltillisia menetelmiä sekä työkaluja, joilla alueellisille energijärjestelmille voidaan etsiä parhaita mahdollisia ratkaisuja. Pelkät menetelmät eivät kuitenkaan riitä, vaan kestäviin energijärjestelmiin pyrkiessä on välttämätöntä, että kyseisiä menetelmiä sovelletaan tarkoituksenmukaisessa kontekstissa johdonmukaisella tavalla. Tämä työ muodostaa kokonaisuuden, jossa syvennyttään yllä esitettyihin näkökulmiin helposti ymmärrettävällä tavalla ja linkitetään nämä intuitiivisesti toisiinsa. Lisäksi työssä esitetään alueellisen strategisen energiasuunnittelun käsite ja luodaan viitekehys, jossa alueelliset energiaoptimointimenetelmät yhdistyvät johdonmukaisella tavalla osaksi alueellista strategista energiasuunnittelua. Lähtökohtainen oletus työssä valitun lähestymistavan taustalla on, että alueellinen energiaoptimointi on monimutkainen ja ei-triviaali tehtävä, jonka suorittaminen edellyttää ennen kaikkea aihetta koskevaa kokonaisvaltaista (ei välttämättä kuitenkaan erittäin yksityiskohtaista) ymmärrystä, ja tälle ymmärrykselle on olemassa erityisen ilmeinen ja välitön maailmanlaajuinen tarve.

## 1.2 Tutkimusongelma ja tutkimuksen tavoitteet

Tutkimusmenetelmänä työssä käytettiin kirjallisuustutkimusta. Työn tutkimuskysymykset olivat (tärkeysjärjestyksessä):

1. Mitä on alueellinen energiaoptimointi, ja miksi sitä tehdään?
2. Missä asioissa ja milloin alueellista energiaoptimointia voidaan hyödyntää?
3. Kuinka alueellista energiaoptimointia voidaan tehdä etenkin uudisalueilla?

Tutkimuksen tavoite oli vastata perustellusti tutkimuskysymyksiin kirjallisuustutkimuksen avulla sekä antaa lukijalle valmius alueellisen energiaoptimoinnin kokonaisvaltaiseen ja luotettavaan itsenäiseen suorittamiseen. Tällä tarkoitetaan muun muassa alueellisen energiaoptimoinnin edellytyksien, rajoitteiden ja luotettavuuteen vaikuttavien tekijöiden tiedostamista. Alueellisen energiaoptimoinnin itsenäiseen suorittamiseen tulkittiin sisältyvän myös kyky muodostaa optimointiongelmalle tavoitteenasettelu, jolla pyritään saavuttamaan kestävä energijärjestelmä. Tämän takia kirjallisuustutkimuksessa pyrittiin luomaan kokonaisvaltainen kuva aluetason strategisesta energiasuunnittelusta keskittyen etenkin alueellisen energiaoptimoinnin merkitykseen ja teoriaan. Tällä tavalla muodostettiin uusi, yhtenäinen ja kokonaisvaltainen yhteenveto alueellisesta energiaoptimoinnista, mikä pohjautuu aikaisemmissa tutkimuksissa selvitettyihin mutta tyyppillisesti toisistaan hyvin irrallisiin asioihin. Nämä toisistaan irralliset asiat pyrittiin linkittämään keskenään mahdollisimman yhtenäiseksi ja selkeäksi kokonaisuudeksi, jotta erittäin monimutkaisesta ja vaikeasti lähestyttävästä aiheesta olisi mahdollista saada selkeä käsitys yhden teoksen avulla. Lisäksi työ pyrki tuomaan ilmi alueellisen energiaoptimoinnin potentiaalın alueellisessa energiasuunnittelussa ja alueellisia energijärjestelmiä koskevassa päätöksenteossa. Työn johtavana ajatuksena oli siis kokonaisuuden muodostaminen, joka kattaa alueellisen energiaoptimoinnin olennaisimmat aihealueet tarjoten sen asiantuntevaan, luotettavaan ja tarkoituksenmukaiseen suorittamiseen tarvittavat menetelmät, kontekstin ja kokonaisvaltaisen aihealuetta koskevan ymmärryksen. Kirjallisuustutkimuksessa suosittiin uusimpia tieteellisiä julkaisuja, koska työn tutkimusaihe on hyvin ajankohtainen ja nopeasti kehittyvä. Työn kohdeyleisön oletettiin koostuvan akateemisesti koulutetuista rakennetun ympäristön energia-asiantuntijoista, joilla ei ole aiempaa tietämystä optimointimenetelmistä tai energiaoptimoinnista.

## 1.3 Tutkimuksen raja- ja rakenne

Tutkimuksen lähtökohtana oli kokonaisvaltainen tutkimusaiheen käsittely, ja työn tavoitteiden mukaisesti työ pyrki muodostamaan itsenäisen ja itsensä selittävän kokonaisuuden, siten että lukijan on mahdollista ymmärtää työssä esitetyt pohdinnat, käsitteet ja menetelmät ilman aiempaa tietämystä optimoinnista. Energijärjestelmien osalta tutkimus rajattiin pääasiallisesti uusiutuvia energialähteitä hyödyntäviin alueellisiin energijärjestelmiin. Erityisesti keskityttiin aluetason energiantuotantoon ja -jakeluun, mutta myös energiatehokkuustoimenpiteitä, mukaan lukien kysyntäjoustoa, käsiteltiin. Yksittäisien rakennuksien taloteknisten järjestelmien suunnittelu ja optimointi rajattiin tutkimuksen ulkopuolelle. Tutkimuksen ulkopuolelle rajattiin suurelta osin myös liikenne ja energijärjestelmiin epäsuorasti liittyvät aluesuunnittelun osa-alueet (esimerkiksi katusuunnittelu) kuitenkin tiedostaen, että kokonaisvaltaisessa aluesuunnittelussa on useita energiatehokkuuteen suoraan liittymättömiä reuna- ja tavoitteita. Termillä *alue* viitattiin tässä tutkimuksessa laajaan kaupunkikortteliin (kymmeniä rakennuksia), urbaaniin naapurustoon (kymmenistä satoihin rakennuksia) ja kokonaiseen kaupunkiin (sadoista tuhansiin rakennuksia). Erikokoiset alueet (esimerkiksi yksittäinen rakennus ja koko valtio) ja erityyppiset alueet (esimerkiksi maaseutu ja teollisuus-

alue) rajattiin tutkimuksen ulkopuolelle. On kuitenkin syytä huomata, että alueellinen energiaoptimointi voi sisältää fyysistä aluetasoa suuremman taserajan huomioimisen (ks. luku 3.1.3). Korjausrakentaminen ja siten myös energiatehokkuustoimenpiteiden optimointi rajattiin suurelta osin työstä pois. Kyseisen rajauksen perusteena olivat työn uudisalueita painottava tavoitteenasettelu, työn laajuuden hallitseminen ja diplomityön resursoinnin rajallisuus. Yllä esitetyissä rajauksissa on hyvä huomioida, että tutkimusaiheen kokonaisvaltaisuudesta sekä valitusta lähestymistavasta johtuen työssä kuitenkin pohdittiin ja tuotiin esille myös työn ulkopuolelle rajattuja asioita työn tavoitteiden kannalta tarvittavissa määrin – yllä esitetyt rajaukset olivat enemmän suuntaa antavia kuin täysin ehdottomia. Yksittäisiä rajauksia yleisemmällä tasolla on syytä mainita, että tutkimuksessa vältettiin erityisen tarkkaa syventymistä alueellisen energiaoptimoinnin yksittäisiin osa-alueisiin. Tämä perusteltiin sillä, että tutkimusaiheen yksittäisistä osa-alueista on julkaistu erittäin kattavia ja laadukkaita tutkimuksia, mutta niissä selvitettyjä asioita kokoavia, analysoivia ja varsinkin niitä laajanäkökulmaisesti ja helposti ymmärrettävällä tavalla toisiinsa linkittäviä tutkimuksia on varsin vähän. Vaikka diplomityön pituus- ja aikarajoituksesta johtuen tässä työssä ei käsitelty tutkimusaiheen yksittäisiä osa-alueita suurella yksityiskohtaisuuden tasolla, niin kattavaan lähdeaineistoon viittaamalla lukijalle annettiin helposti lähestyttävä mahdollisuus syventyä tutkimusaiheen yksittäisiin osa-alueisiin. Työn rajauksissa otettiin huomioon myös työn tilaajan tarpeet.

Työn rakenne on jäsennelty seuraavalla tavalla. Ensin luvussa 2 esitetään optimoinnin käsite, jonka jälkeen luvussa 3 käsitellään alueellista energiaoptimointia sen olennaisimmista näkökulmista: luvussa 3.1 tarjotaan valmius alueellisen energiaoptimoinnin kestäväen kehityksen mukaisen tavoitteenasettelun luomiseen, luvussa 3.2 tuodaan ilmi alueellisen energiaoptimoinnin välttämättömät reunaehdot, rajoitteet ja edellytykset, ja luvussa 3.3 tuodaan esille, kuinka alueellista energiaoptimointia voidaan menetelmällisesti suorittaa tarkoituksenmukaisella tavalla osana kokonaisvaltaista alueellista energiasuunnittelua. Luvussa 3.3.3 esitetty alueellisen strategisen energiasuunnittelun viitekehys on tässä keskeisessä roolissa. Luvussa 4 esitetään työn johtopäätökset ja lopuksi luvussa 5 esitetään työn yhteenveto.

Työn ulkoasua koskien työssä käytetään jatkuvana numerointina eteneviä alaviitteitä täsmennyksien osoittamiseksi. Lähdeviittaamisessa sovelletaan Harvardin järjestelmää Aaltoyliopiston tieteellisen viittaamisen ohjeistuksen mukaisesti. Leipätekstin yhteydessä kursivoinnilla osoitetaan englanninkieliset termit (merkattu lyhenteellä engl.) sekä käsitteet, jotka sisältyvät työn alussa esitettyyn käsitteiden listaukseen. Kyseiseen listaukseen sisältyvät käsitteet on kursivoitu leipätekstissä vain kertaalleen sopivimman kontekstin yhteydessä. Työn visuaalisen ulkoasun teemana on selkeys ja helposti ymmärrettävyys, joihin on työn tavoitteiden mukaisesti kiinnitetty myös työn visuaalisuuden osalta erityistä huomiota.

## 2 Optimointi

*Optimoinnilla* tarkoitetaan parhaan mahdollisen ratkaisun systemaattista etsintää. Parhaan mahdollisen eli *optimaalisen ratkaisun* etsintää edeltää tavoitteen määrittäminen, jonka perusteella ratkaisun optimaalisuutta mitataan. Niitä ominaisuuksia, joille pyritään löytämään optimaaliset arvot, kutsutaan *muuttujiksi*. Rakennuksen energiaoptimoinnissa tavoitteeksi voidaan asettaa esimerkiksi energiankulutuksen minimoiminen ja muuttujiksi ikkunoiden koko, seinän eristepaksuus ja eri lämmöntuottojärjestelmävaihtoehdot. Muuttujien kaikkien mahdollisten yhdistelmien muodostama kokonaisuutta kutsutaan *etsintäavaruudeksi*. Kelvottomia ja järjettömiä muuttujien yhdistelmiä tai yksittäisien muuttujien arvoja voidaan rajata etsinnästä pois *rajoitefunktioiden* avulla. Se osa etsintäavaruudesta, joka jää rajoitefunktioiden sisäpuolelle eli täyttää rajoitefunktioiden ehdot, on optimoinnin *käypä alue*. (Boyd & Vandenberghe 2004; Steuer 1986.)

*Optimointiongelma* voidaan muotoilla matemaattisesti, mikä onkin edellytys matemaattisten optimointimenetelmien hyödyntämiselle. Matemaattisen optimointiongelman tavoite määritetään *kohdefunktion* avulla. Kohdefunktiota minimoidaan tai maksimoidaan valitulla optimointimenetelmällä huomioiden asetetut rajoitukset. Maksimointitehtävät voidaan muotoilla aina myös minimointitehtäviksi. Optimointiongelman optimaaliseksi ratkaisuksi kutsutaan sitä muuttujien arvojen yhdistelmää eli *muuttujavektorin* arvojoukkoa, joka tuottaa pienimmän tai suurimman arvon kohdefunktiolle. Matemaattinen optimointiongelma voidaan esittää yleisessä muodossa seuraavasti: (Boyd & Vandenberghe 2004; Steuer 1986)

$$\min\{F(\mathbf{x}) \mid \mathbf{x} \in S \subset \mathbb{R}^n\}$$

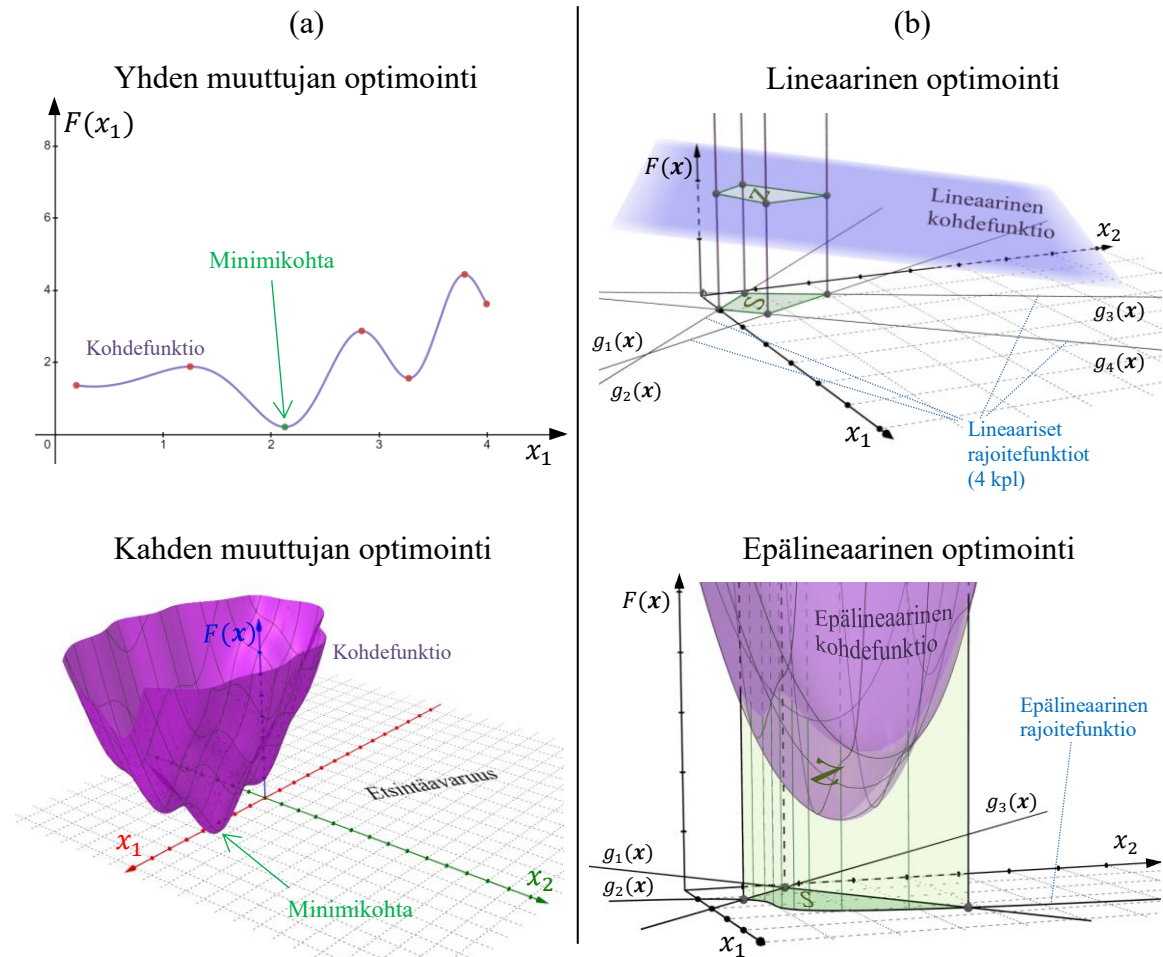
jossa  $S$  määräytyy siten että

$$\begin{aligned} g_j(\mathbf{x}) &\leq 0, & j \in \mathbb{N} \\ h_l(\mathbf{x}) &= 0, & l \in \mathbb{N} \end{aligned} \quad (1)$$

missä  $F(\mathbf{x})$  on minimoitava kohdefunktio  
 $\mathbf{x}$  on muuttujavektori, joka sisältää muuttujat  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ( $n$  kpl muuttujia)  
 $S$  on käypä joukko, joka kuuluu  $n$ -ulotteiseen euklidiseen avaruuteen ja  
 $g_j(\mathbf{x})$  ja  $h_l(\mathbf{x})$  ovat asetetut epäyhtälö- ja yhtälörajoitteet.

Optimointiongelman ratkaisemiseen käytettävä optimointimenetelmä riippuu optimointiongelman luonteesta. Erityisesti alueelliseen energiaoptimointiin soveltuvia optimointimenetelmiä käsitellään myöhemmin luvussa 3.3.2. Optimointiongelmat voidaan luokitella muuttujien määrän perusteella yhden (engl. *univariate optimization*) ja usean muuttujan (engl. *multivariate optimization*) ongelmiin. Yhden muuttujan ongelmien optimointimenetelmät ovat vakiintuneita ja perinpohjaisesti tutkittuja, ja myös usean muuttujan optimointiongelmiin on kehitetty lukuisia tehokkaita optimointimenetelmiä. Käytännön sovelluksissa on lähes aina useampi muuttuja. (Sirén 2016; Steuer 1986.) Optimointiongelmat voidaan luokitella myös lineaarisuuden perusteella (ks. kuva 1). Jos kohdefunktio ja rajoitefunktiot ovat muuttujien lineaarikuvauksia, niin optimointiongelma on lineaarinen. Toisen optimointiongelmien päähaaran muodostaa epälineaariset optimointiongelmat, joissa kohdefunktio tai rajoitefunktiot ovat epälineaarisia. *Epälineaarinen optimointiongelma* on luonnostaan huomattavasti vaikeampi ja hitaampi ratkaista kuin *lineaarinen optimointiongelma*. Keskeinen syy epälineaarisen optimointiongelman ratkaisemisen hankaluuteen on, että se sisältää niin kutsuttuja paikallisia optimiratkaisuja globaalin optimiratkaisun lisäksi. Tämä tarkoittaa sitä, että kohdefunktio ei ole täysin kupera tai kovera, vaan siinä on paikallisia ”kuoppia”, joita

optimointialgoritmin on vaikea erottaa globaalista optimiratkaisusta (ks. kuva 1). Muita syitä epälineaarisen optimoinnin vaikeuteen ovat esimerkiksi monen erillisen käyvän alueen olemassaolon mahdollisuus, etsinnän aloituspaikan ja optimointialgoritmin valinnan vaikutus optimiratkaisuun sekä hankaluus pitää etsintä käyvällä alueella. (Chinneck 2015.) Lineaarisia optimointiongelmia pystytään sen sijaan ratkaisemaan yksikäsitteisesti ja tehokkaasti, vaikka analyttistä ratkaisua ei käytännön sovelluksissa yleensä ole niillekään olemassa (Boyd & Vandenberghe 2004).



Kuva 1 Optimointiongelmiä luokitellaan muuttujien määrän perusteella (a) ja optimointiongelman lineaarisuuden perusteella (b). Usean muuttujan optimoinnissa muuttujia voi olla, ja usein onkin, yli kaksi kappaletta, mutta siinä tapauksessa optimointiongelmaa ei voida havainnollistavasti visualisoida. Kuvat on luotu Desmos- ja GeoGebra-ohjelmistoilla.

Matemaattiset optimointimenetelmät sisältävät aina optimointialgoritmin, jolla yritetään ratkaista optimointiongelma eli löytää kohdefunktion minimikohta. Optimointiongelmiä ratkaisemiseen on kehitetty lukuisia erilaisia algoritmeja. Nämä algoritmit voidaan hieman yksinkertaistetusti jakaa analyttisiin ja heuristisiin algoritmeihin, mutta myös niiden yhdistelmät ovat mahdollisia, jolloin puhutaan hybridialgoritmeista. Hybridialgoritmeilla on mahdollista hyödyntää useiden eri algoritmien vahvuuksia. (Ahmad ym. 2016; Nguyen ym. 2013.) Analyttiset algoritmit perustuvat nimensä mukaisesti analyttiseen tai numeeriseen matematiikkaan, kuten esimerkiksi Newtonin optimointimenetelmä, joka perustuu kohdefunktion gradientin määrittämiseen eri kohdissa etsintäavaruutta. Analyttiset algoritmit löytävät kohdefunktion globaalin minimikohdan luotettavasti ja nopeasti, jos kohdefunktio

on etsintäalueella derivoituva, jatkuva ja täydellisen kovera tai kupera eli siinä ei ole paikallisia minimikohtia (engl. *convex optimization*). Heuristiset algoritmit sen sijaan perustuvat erilaisiin periaatteisiin ja satunnaisuuteen. Esimerkkeinä heuristisista algoritmeista voidaan mainita luonnonvalintaa matkivat *geneettiset algoritmit*. (Rekilä 2019; Sirén 2016.) Varsinkin epälineaarisisessa optimoinnissa hyödynnetään usein heuristisia algoritmeja, koska epälineaarisisessa optimointiongelmassa analyttiset algoritmit ajautuvat helposti paikallisiin minimikohtiin. Kohdefunktio ei aina ole myöskään tiedossa (ks. luku 3.3.2), jolloin on turvaututtava heuristisiin algoritmeihin. (Chinneck 2015.) Esimerkiksi Goldberg (1989) esittää teoksessaan, kuinka geneettisiä optimointialgoritmeja voidaan luoda ja soveltaa, Absil ym. (2008) ja Steuer (1986) käsittelevät puolestaan analyttisiä optimointialgoritmeja ja Elbeltagi ym. (2005) esittävät, kuinka optimointialgoritmien suorituskykyä voidaan mitata ja vertailla keskenään. Optimointialgoritmeihin tai niiden suorituskyvyn mittaamiseen ei kuitenkaan syvennytä tässä tarkemmin, koska käytännöllisen alueellisen energiaoptimoinnin kannalta on olennaisempaa, ja riittävää, ymmärtää optimoinnin periaate ja matemaattinen muotoileminen. Työn tavoitteiden kannalta ei ole myöskään toivottavaa, että alueellisen energiaoptimoinnin suorittaminen vaatisi kattavaa osaamista optimointialgoritmien luomisesta. Optimointialgoritmeja on avoimesti saatavissa esimerkiksi Python-ohjelmointikielellä kirjoitettuna (Perez ym. 2012). On myös olemassa monia kaupallisia sovelluksia matemaattisesti muotoiltujen optimointiongelmiin ratkaisemiseen, kuten esimerkiksi laajasti käytetty IBM:n kehittämä CPLEX Optimizer (IBM 2019).

Optimointiongelman syöttötiedot koostuvat muuttujista ja *muuttujien etsintäalueista*, kohdefunktiosta tai -funktioista (lisää monitavoitteellisesta optimoinnista myöhemmin), mahdollisista rajoitefunktioista ja erilaisista parametreista. Kuten aiemmin mainittiin, optimointiongelman muuttujiksi määritetään ne syöttötiedot, joille etsitään optimaalisia arvoja. Optimointiongelman muuttujaa sanotaan jatkuvaksi, jos se voi saada minkä tahansa reaalisen arvon mahdollisen etsintäalueensa sisältä. Diskreetit muuttujat puolestaan voivat saada vain tiettyjä porrastettuja arvoja. Esimerkiksi rakennuksen energiaoptimoinnissa seinän eriste-paksuus voisi olla jatkuva muuttuja ja eristeen materiaalivalinta diskreetti muuttuja. Erikoistapaus diskreetistä muuttujasta on binääriarvoinen muuttuja, joka voi saada vain arvon nolla tai yksi. Binääriarvoisella muuttujalla voidaan mallintaa esimerkiksi jonkin järjestelmän sisältäminen (tai sisältymättömyys) systeemiin. Parametrit ovat puolestaan sellaisia optimointiongelmaan määritettäviä syöttötietoja, joiden arvoille ei etsitä optimaalista arvoa, eli niiden arvo pysyy vakiona tai vaihtelee ennalta määritetysti (tai *stokastisessa optimoinnissa* satunnaisesti) optimoinnin aikana. Rakennuksen energiaoptimoinnin parametreja voisivat siten olla esimerkiksi lämmönvaihtimen ilmoitettu hyötysuhde, optimointialgoritmin toimintaa säättävä parametri (esimerkiksi mutaation todennäköisyys geneettisessä algoritmissa) tai tunkohtainen auringonsäteilyn intensiteetti. (Chinneck 2015; Sirén 2016.)

Ennen varsinaisen optimoinnin suorittamista optimoinnin *muuttujaehdokkaille* voidaan tehdä *parametrinen analyysi*. Parametrisessa analyysissä annetaan yhdelle muuttujaehdokkaalle kerrallaan systemaattisesti eri arvoja pitäen muiden muuttujaehdokkaiden arvot vakioina. Muuttujaehdokkaiden vakioarvot voidaan valita esimerkiksi siten, että ne edustavat mahdollisimman tavanomaista suunnitteluratkaisua. Parametrinen analyysi antaa tietoa muuttujaehdokkaiden suhteellisesta vaikutuksesta kohdefunktion arvoon ja auttaa hahmottamaan, millä arvoalueella kunkin muuttujaehdokkaan vaikutus on suurimmillaan. Tämän tiedon avulla optimoinnin etsintäavaruutta voidaan rajata turhien muuttujaehdokkaiden poistamisella ja jäljelle jäävien muuttujien etsintäalueen rajaamisella. Lisäksi parametrinen analyysin avulla kohdefunktion muodosta ja ääriarvoista sekä mahdollisista epäjatkuvuuksista





2015). Tällöin käytetään usein termiä *hierarkkinen optimointi*. Hierarkkinen optimointi etenee siten, että alemman tason osaoptimoinnin tulokset siirtyvät seuraavaksi ylemmän tason osaoptimointiongelman lähtötiedoiksi, kunnes koko optimointiongelma on ratkaistu. (Chinneck 2015; Weber ym. 2007.) Esimerkiksi alueen energiantuotannon optimointi voidaan jakaa kahteen erilliseen osaoptimointikokonaisuuteen: ensin minimoidaan alueen energiantarve, minkä jälkeen käytetään tätä minimaalista energiantarvetta lähtötietona alueen energiantuotannon optimoinnissa (ks. esim. Waibel ym. 2019). On kuitenkin huomioitava, että hierarkkisessa optimoinnissa oletetaan, että eri tason osaoptimointien muuttujien välillä ei ole ainakaan merkittäviä yhteisvaikutuksia. Esimerkiksi jos alueen energiantarve ja -tuotanto optimoidaan toisistaan erillään, jättää lopullinen optimoitu lopputulos huomioimatta niiden mahdolliset yhteisvaikutukset. (Fu ym. 2014; Waibel ym. 2019.) Jos osaoptimoinnit tehdään ajan suhteen, tietyllä aikahorisontilla ja tietyin aikaväleihin, sekä tavoitteena on saavuttaa optimaalinen yhteislopputulos (yksittäisien osaoptimointien optimaalisuuksien sijasta), niin voidaan puhua *dynaamisesta optimoinnista* (Fu ym. 2014). Muun muassa aikataulutukseen ja järjestelmien ohjaukseen liittyvät optimoinnit ratkaistaan usein hyödyntäen dynaamista optimointia (Chinneck 2015; Fu ym. 2014). Esimerkiksi energiantuotantolaitoksen koko vuoden tuntikohtaista optimaalista operointitapaa (ts. 8760 erillistä päätöstä) ei ole käytännöllistä optimoida kerralla kokonaan, koska optimoinnin etsintäavaruus muodostuisi tällöin valtavan suureksi ja moniulotteiseksi. Dynaamista optimointia hyödynnetäänkin silloin, kun etsitään optimaalista päätösten sarjaa yhden päätöksen sijasta. Dynaaminen optimointi mahdollistaa myös optimoinnin jatkuvan mukautumisen muuttuviin olosuhteisiin ja periaatteessa myös optimoinnin suorittajan manuaalisen osallistumisen optimoinnin etsintävaiheeseen. (Fu ym. 2014; Hannah 2014.) Täysin reaaliaikaisessa ja ennustavassa optimoinnissa, jota on mahdollista hyödyntää esimerkiksi talotekniikan ohjauksessa, voidaan hyödyntää esimerkiksi keinotekoisia neuroverkkoja (ks. esim. Ahmad ym. 2016), mutta tämänkaltaiseen energiajärjestelmien täysin reaaliaikaiseen optimaaliseen ohjaukseen ei syvennyttä tässä työssä tarkemmin.

Jos optimointiongelmassa on vähintään kaksi (toisistaan risteävää) tavoitetta eli monta kohdefunktiota, puhutaan *monitavoiteoptimoinnista* (ks. kuva 2). Monitavoiteoptimoinnille tyypillisiä sovelluskohteita ovat esimerkiksi investointipäätökset (esim. minimoi alkuinvestointikustannukset ja käyttökustannukset), resurssien optimaalinen hyödyntäminen (esim. minimoi kustannukset ja maksimoi resurssien käyttö), sijoitussalkun valinta (esim. minimoi sijoitussalkun riski ja maksimoi sen tuotto-odotus), tuotannon ohjausstrategian määrittäminen (esim. maksimoi liikevaihto ja minimoi varastointitarve sekä jälkitoimituksien määrä) ja kuljetusreittien valinta (esim. minimoi kuljetuskustannukset ja keskiarvoinen kuljetusaika). Näistä esimerkeistä voidaan hyvin huomata, että päätöksentekoa ohjaa käytännön sovelluksissa usein monta keskenään ristiriitaista tai toisin sanoen keskenään risteävää tavoitetta. Keskenään risteävistä tavoitteista halutaan usein löytää paras mahdollinen kompromissi tai kompromissit, jolloin voidaan tukeutua monitavoiteoptimointiin. (Steuer 1986.)

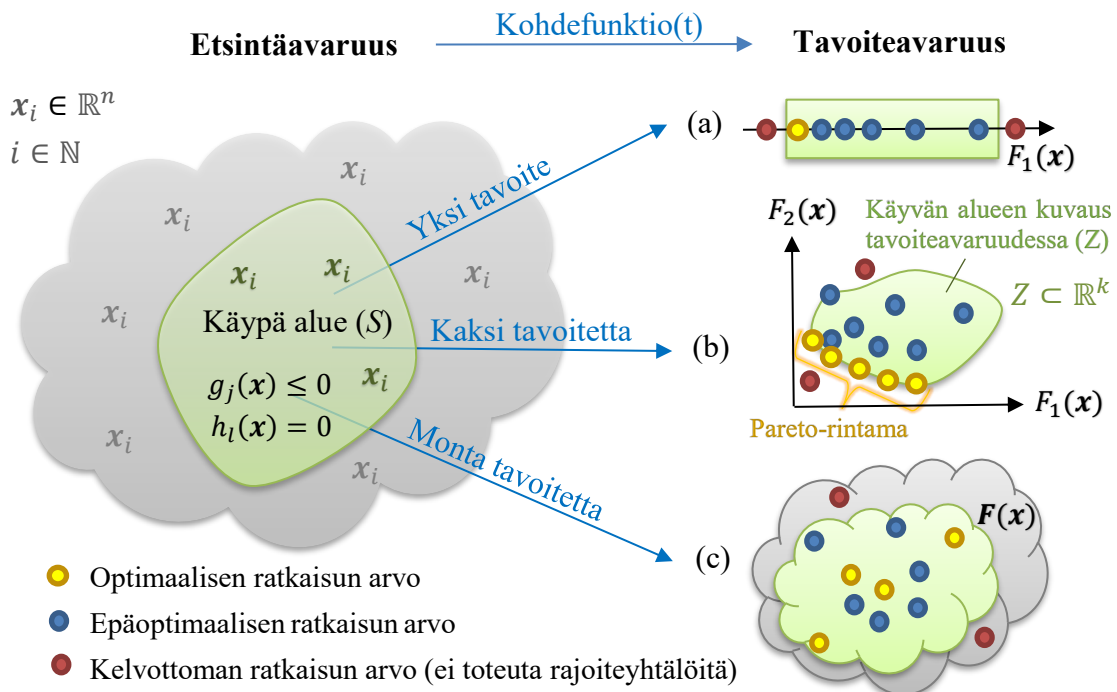
Myös energiasuunnittelussa tulee usein vastaan ongelmia, joissa on monta risteävää tavoitetta. Esimerkkinä tällaisesta tilanteesta on, kun etsitään parasta energiatehokkuustoimenpidettä rakennukselle mahdollisimman pienellä alkuinvestointikustannuksella. Halutaan siis löytää se piste etsintäavaruudesta (ts. suunnitteluvaihtoehdoista), jossa alkuinvestointia kasvattamalla ei enää merkittävästi voida parantaa rakennuksen energiatehokkuutta – tai mahdollisesti jokin muu piste päätöksentekijän preferensseistä riippuen. Nämä tavoitteet ovat luonnostaan risteäviä ja muodostavat siten monitavoitteellisen optimointiongelman. Mათემაattinen monitavoitteellinen optimointiongelma voidaan esittää yleisessä muodossa muilta

osin yhden tavoitteen optimointiongelmaa vastaavasti (ks. yhtälö (1)), mutta kohdefunktio saa siinä monitavoitteisen muodon: (Marler & Arora 2004; Steuer 1986)

$$\min\{\mathbf{F}(\mathbf{x}) \mid \mathbf{x} \in S \subset \mathbb{R}^n\} \quad (2)$$

missä  $\mathbf{F}(\mathbf{x}) = [F_1(\mathbf{x}), F_2(\mathbf{x}), \dots, F_k(\mathbf{x})]^T$  on kohdefunktioiden joukko, jossa  $k$  on kohdefunktioiden lukumäärä.

Monitavoitteellinen optimointiongelma voi olla yksitavoitteisen optimointiongelman tavoin lineaarinen tai epälineaarinen, sisältää jatkuvia ja diskreettejä muuttujia sekä olla deterministinen tai stokastinen. Nykyisin yleisesti käytössä oleva lähestymistapa monitavoitteellisten optimointiongelmien ratkaisemiseen pohjautuu italialais-ranskalaisen Vilfredo Pareton työhön 1900-luvun vaihteessa (Mornati 2013). Hänen mukaansa nimetty monitavoitteellisen optimointiongelman ratkaisun Pareto-optimaalisuus tarkoittaa sitä, että ei ole toista ratkaisua, joka parantaisi kaikkien kohdefunktioiden arvoja verrattuna Pareto-optimaaliseen ratkaisuun. Tällöin vastuu optimaalisimman ratkaisun valitsemisesta annetaan päätöksentekijälle, joka omien preferenssiensä mukaan valitsee Pareto-rintamasta eli ei-dominoidusta ratkaisujoukosta yhden pisteen. (Benson 1998; Marler & Arora 2004.) Monitavoitteellista optimointiongelmaa voidaan käsitellä myös yhden tavoitteen optimointiongelmana muotoilemalla monet tavoitteet yhdeksi, niin kutsutuksi hyötyfunktioksi (engl. *utility function*). Hyötyfunktio voidaan muodostaa esimerkiksi kohdefunktioiden skalarisoinnilla. Yleisimmissä skalarisointimenetelmissä kohdefunktiolle annetaan eriävät tärkeysasteet painovektorilla, jonka avulla useat kohdefunktiot voidaan kirjoittaa yhdeksi kohdefunktioksi. Painovektoria systemaattisesti muuntamalla voidaan luoda ratkaisujoukon Pareto-rintama, mutta tällöin ei ole kuin tietyin ehdoin varmuutta siitä, että kaikki löydetyt ratkaisut olisivat Pareto-optimaalisia. (Marler & Arora 2004; Steuer 1986.)



Kuva 2 Optimoinnissa etsintäavaruus kuvautuu tavoiteavaruudeksi kohdefunktion määrittämällä tavalla. Yksitavoitteinen ongelma kuvautuu janalle (a), kaksitavoitteinen ongelma tasolle (b) ja monitavoitteinen ongelma moniulotteiseen tavoiteavaruuteen (c).

Pareto-optimaalisuuden käsitteen ja hyötyfunktion soveltamisen lisäksi myös monia muita lähestymistapoja on esitetty monitavoitteellisten optimointiongelmien ratkaisemiseen. Esimerkkeinä voidaan mainita rajoiteyhtälömenetelmä (engl. *bounded objective function method*), jossa valitaan yksi kohdefunktio minimoitavaksi ja muut kohdefunktiot muotoillaan rajoitefunktioiksi – tähän kategoriaan lukeutuu myös  $\varepsilon$ -rajoitteiset menetelmät (engl.  *$\varepsilon$ -constraint approach*); tavoiteoptimointi (engl. *goal programming*), jossa päätöksentekijä asettaa kohdefunktioille tavoitetasot ja poikkeamamuuttujien avulla minimoidaan poikkeamaa näistä tavoitteista; kompromissimenetelmä (engl. *compromise solution*), jossa minimoidaan yhden ratkaisun etäisyyttä tavoiteavaruudessa niin kutsutusta *utopiapistestä*; leksikaalinen optimointi, jossa päätöksentekijä määrää kohdefunktioiden tärkeysjärjestyksen ja kohdefunktioiden minimointi tehdään siinä järjestyksessä kunnes saavutetaan yksikäsitteinen ratkaisu; erilaiset interaktiiviset menetelmät, joissa päätöksentekijä ja/tai optimoinnin suorittaja osallistuu aktiivisesti optimoinnin etsintävaiheeseen esimerkiksi valitsemalla etsinnälle suuntaa sen edetessä. Edellä mainitut menetelmät eivät kuitenkaan aina tuota yksikäsitteisen optimaalisia ratkaisuja, eli ratkaisut saattavat olla heikosti Pareto-optimaalisia (engl. *weak pareto-optimal solution*, *weakly efficient solution*). Edellä mainituissa tavoissa pitää myöskin huomioida, että niissä ei aina välttämättä toteudu Kuhn-Tucker-optimaalisuusehdot. (Marler & Arora 2004.)

Yleisesti ottaen optimointia voidaan hyödyntää päätöksenteon tukena, kun halutaan tehdä objektiivisia ja hyvin informoituja päätöksiä monimutkaisissa päätöksentekotilanteissa. Hyvin muotoiltu optimointiongelma voi mahdollistaa jopa tuhansien eri suunnitteluvaihtoehtojen nopean ja systemaattisen vertailun riittävällä tarkkuudella. Nykyään optimointia hyödynnetäänkin poikkeuksetta lähes kaikkialla liike-elämässä, hallinnossa, rakentamisessa, tekniikassa ja monilla muilla aloilla. (Chinneck 2015; Steuer 1986.)

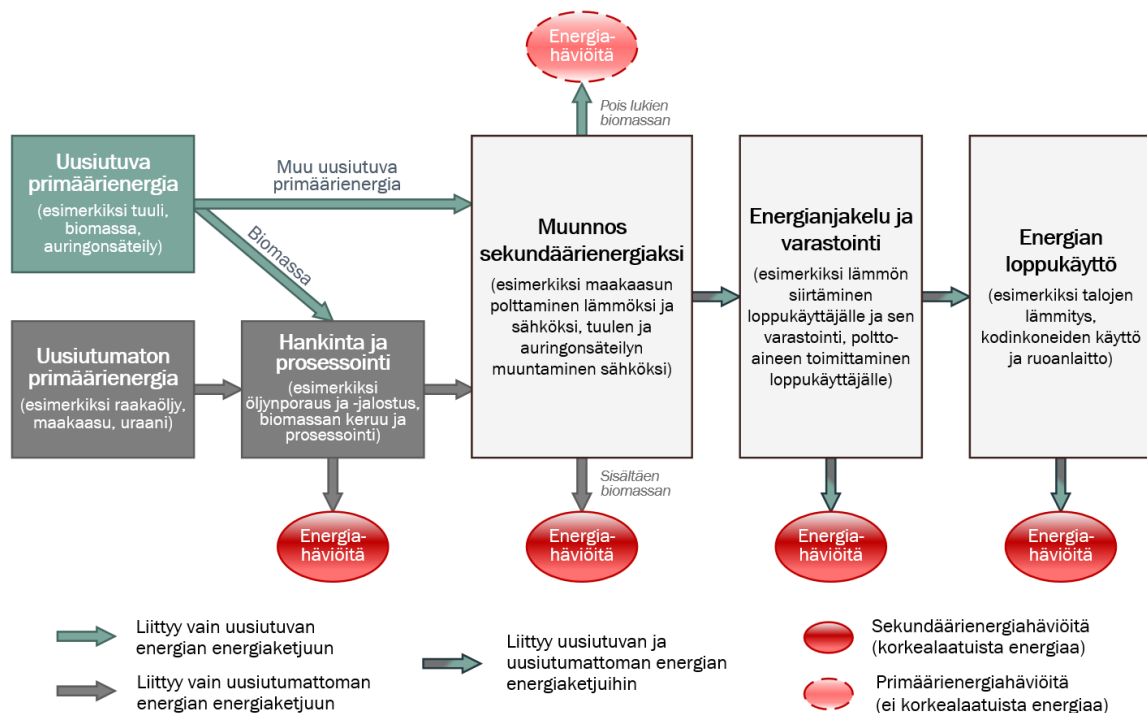
## 3 Alueellinen energiaoptimointi

### 3.1 Kestävä energijärjestelmä

#### 3.1.1 Energijärjestelmän systeeminäkökulma

*Kestävän energijärjestelmän* tulisi kestävän kehityksen tavoitteiden mukaisesti olla sosiaalisesti, taloudellisesti ja ympäristöllisesti kestävä. Jotta voidaan hahmottaa, mitä nämä tavoitteet tarkoittavat energijärjestelmien yhteydessä, tulee ensin ymmärtää energijärjestelmien rooli yhteiskunnassa. Kaupungit ja niiden energijärjestelmät ovat maapallon sisäisiä avoimia systeemejä, jotka vaihtavat ympäristönsä kanssa ainetta ja energiaa. Maapallo on puolestaan suljettu systeemi, jonka läpi enimmäkseen auringosta peräisin oleva energia kulkee. Kaupunkien ja koko yhteiskunnan perustoiminnot ovat riippuvaisia ihmiskunnan kyvystä hallita energiavirtoja kontrolloidusti. (Keirstead & Shah 2013; Lund 2008; Sodiq ym. 2019.) Energiavirtoja hallitaan energijärjestelmien avulla, joiden rooli yhteiskunnassa onkin taata *loppukäyttäjilleen* turvallisesti ja tasapuolisesti tarvetta vastaava, hyvänlaatuinen ja riittävä energiansaanti jokaisena ajanhetkenä aiheuttamatta sosiaalisia, kuten esimerkiksi terveydellisiä, haittavaikutuksia – tällöin energijärjestelmän voidaan sanoa olevan sosiaalisesti kestävä. (Lund 2014; Orecchini & Santiangeli 2011.)

Energian reittiä *energijärjestelmässä* (tai sen ulkopuolella) *primäärienergiasta loppuenergiaksi* eli loppukäyttäjien hyödynnettävissä olevaksi energiaksi eri prosessointi-, varastointi- ja jakeluvaiheiden kautta kutsutaan *energiaketjuksi* (ks. kuva 3). Energijärjestelmässä energiaketjut voivat haarautua ja yhdistyä lukuisilla eri tavoilla ja energialähteitä voidaan hyödyntää tyypillisesti useita vaihtoehtoisia energiaketjuja pitkin. Energiankulutuksen pienentäminen heijastuu koko energiaketjun lävitse johtaen suotuisiin kerrannaisvaikutuksiin, minkä takia energia-analyysit on yleensä järkevää aloittaa energian *loppukäytön* pienentämismahdollisuuden analysoinnilla. (Forsström ym. 2011; Lund 2008.)

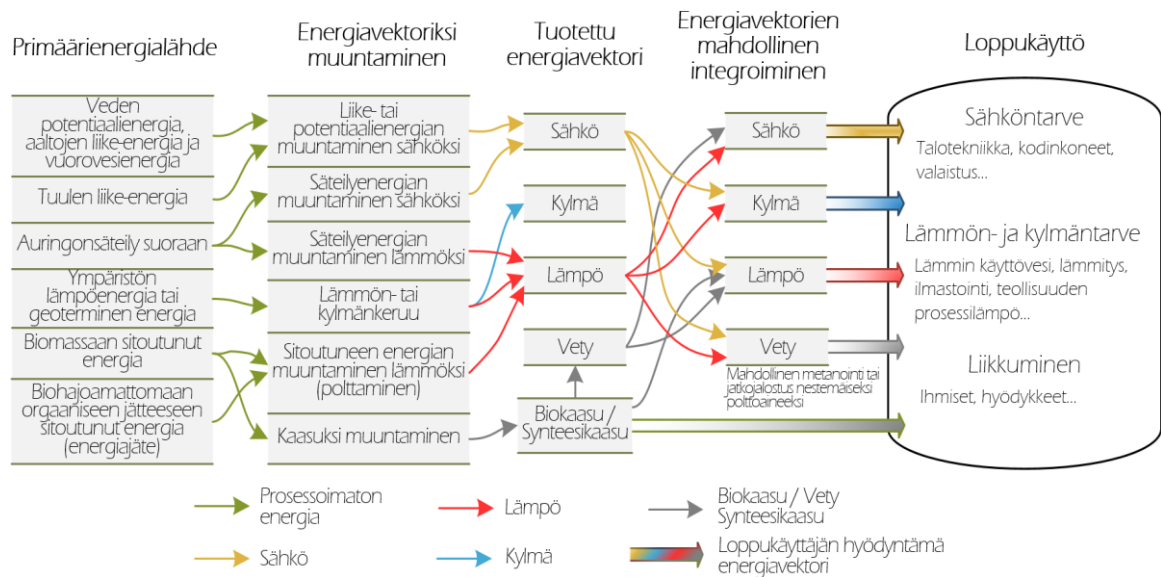


Kuva 3 Uusiutuvien ja uusiutumattomien energialähteiden yksinkertaistetut energiaketjut (mukailten: Niemi ym. 2012).

Energiajärjestelmän ympäristöllistä kestävyyttä voidaan tarkastella energiankierron konseptin (engl. *energy cycle*) avulla. Energiajärjestelmää kutsutaan energian kannalta avoimen kierron järjestelmäksi, jos se aiheuttaa ympäristöllisesti tasapainossa olevaan systeemiin epätasapainon. Avoimen kierron energiajärjestelmän vastakohtana on suljetun kierron energiajärjestelmä. Suljetun kierron energiajärjestelmä ei aiheuta elinkaarensa aikana ympäristölle haitallisia positiivisia *nettopäästöjä* tai kuluta luonnonvaroja nopeammin kuin ne luonnonmukaisesti uusiutuvat (koskee esimerkiksi *biomassan* käyttöä). Ideaalisella suljetun kierron energiajärjestelmällä ei ole siis lainkaan (netto)haitallisia ympäristövaikutuksia, vaan se hyödyntää ihmiskunnan elinaikana loppumattomina pidettyjä energialähteitä ja käyttää luonnonvaroja kestäväällä tavalla. Koska fossiilisiin polttoaineisiin perustuvat *perinteiset energiajärjestelmät* ovat vahvasti avoimen kierron systeemejä, jotka horjuttavat ympäristön tasapainoa jatkuvasti, ympäristöllisen kestävyuden näkökulmasta on perusteltua suosia uusiutuviin ja vähäpäästöisiin energialähteisiin perustuvia energiajärjestelmiä ja edesauttaa niiden kehityskulkua. (Orecchini & Santiangeli 2011; Sodiq ym. 2019.) Energiajärjestelmän energiankierron konsepti voidaan nähdä laajenuksena H. T. Odumin esittämään päätelmään: energialähteen tulee kyetä tarjoamaan positiivinen nettovaikutus yhteiskuntaan, siten että sen hyödyntämiseen vaadittava *hyödyllinen energia* on vähäisempi kuin siitä saatava hyödyllinen energia ottaen kaikki kyseisen energialähteen energiaketjun osat huomioon (Brown & Ulgiati 2004). Forsström ym. (2011) linkittävät energiatehokkuuden tärkeäksi osaksi ympäristötehokkuutta (engl. *eco-efficiency*) ja ympäristötehokkuuden puolestaan tärkeäksi osaksi kestäväää kehitystä, jonka lopullinen tavoite on saavuttaa täysin kestävä eli suljetun kierron yhteiskunta. Huomionarvoista on, että energiatehokkuus ei kuitenkaan ole tae energiajärjestelmän ympäristölliselle kestävyydelle, sillä esimerkiksi materiaalitehokkuus saattaa heikentyä energiatehokkuuden parantuessa (esimerkiksi monet nykyteknologian sähköakut sisältävät ehtyviä mineraaleja). (Forsström ym. 2011.)

Energiajärjestelmän energiankierron sulkeutumista voidaan merkittävästi edesauttaa energiankuljettajien eli *energiavektorien* integroimisella, jolloin voidaan puhua myös energiasektorien yhdistämisestä (engl. *energy sector coupling*) tai *integroidusta energiajärjestelmästä*. Energiavektorien integroimisella tarkoitetaan esimerkiksi sähkön- ja lämmöntuotannon yhdistämistä eli yhteistuotantoa, tai toisaalta laajemmassa ja edistyneisemmässä mielessä (ks. luku 3.2) sähkö- ja lämpöverkon sekä mahdollisesti myös kaasuverkon ja liikenteen vuorovaikutuksien mahdollistamista. Maksimaalinen hyöty energiavektorien integroimisesta voidaan periaatteessa saavuttaa, kun mahdollisimman monet energiavektorit voivat vuorovaikuttaa keskenään (esimerkiksi sähkö, lämpö, kylmä ja kaasu), koska siten mahdollistetaan kunkin energiavektorin ominaispiirteiden (esimerkiksi siirrettävyyden, varastoitavuuden ja häviöttömyyden) ja eri energiavektorien kysynnän ja tuotannon spatiotemporaalisten eroavaisuuksien optimaalinen hyödyntäminen. Tämä tietenkin vaatii, että kyseisille energiavektoreille on olemassa tarvittava kysyntä. Perinteiseen energiajärjestelmään verrattuna, jossa energiavektoreita käsitellään suurelta osin toisistaan erillään, integroidulla energiajärjestelmällä voidaan saavuttaa huomattavia suorituskykyparannuksia energiajärjestelmän energia- ja ympäristötehokkuuteen eli myös sen teknistaloudelliseen suorituskykyyn. Tämä johtuu muun muassa siitä, että energiavektorien integroimisella *uusiutuvan energian* leikkaustarve vähenee, energiantuotannon sektorikohtaiset huippukapasiteettivaatimukset pienenevät, energiajärjestelmän *energiakäyttökerroin* nousee ja hukkalämpövirtojen hyödyntäminen tehostuu. Energiavektorien integroiminen onkin tärkeä toimenpide uusiutuvien energialähteiden laajamittaisen ja tehokkaan hyödyntämisen kannalta johtuen niiden jaksottaisesta ja satunnaisesta luonteesta (ks. luku 3.2.2). (Chicco & Mancarella 2009; Keirstead

& Shah 2013; Lund 2014; Mancarella 2014; Orecchini & Santiangeli 2011.) Kuvassa 4 havainnollistetaan energiavektorien integroimista uusiutuvia energialähteitä hyödyntävässä energiajärjestelmässä.

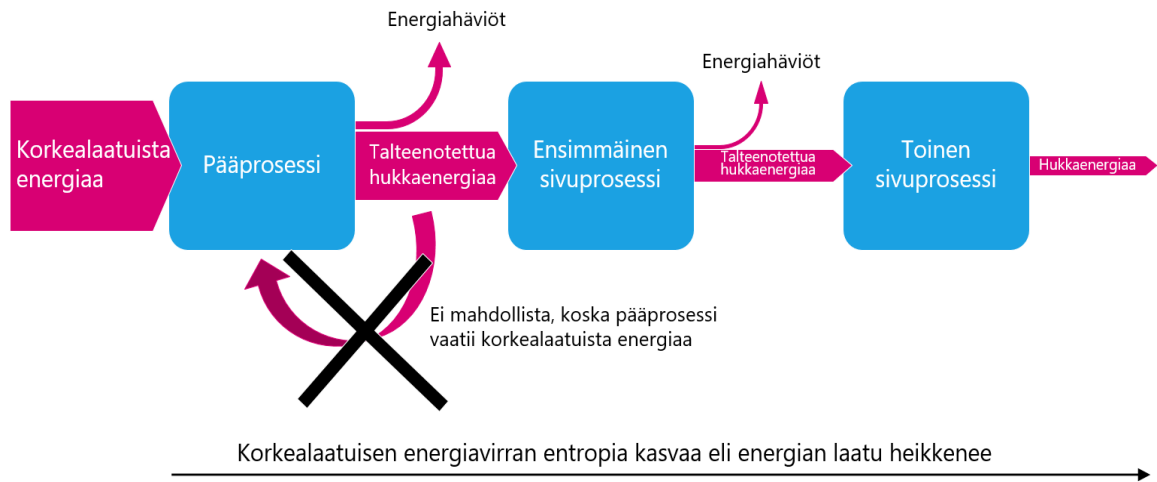


Kuva 4 Energiavektorien integroiminen uusiutuvia energialähteitä hyödyntävässä energiajärjestelmässä (alkuperäisidea: Orecchini & Santiangeli 2011).

Yllä olevaa kuvaa tulkitessa on syytä huomioda, että lämmön *muunnettavuus* toiseksi energiavektoriksi on hyvin riippuvainen lämpötilaerosta, niin että korkealämpötilainen lämpövirta voidaan helpommin muuntaa esimerkiksi sähköksi kuin matalalämpötilainen lämpövirta (matalalämpötilaisten lämpövirtojen lämpötilaa voidaan tosin nostaa esimerkiksi lämpöpumppujen avulla). Osa primäärienergiälähteistä voidaan muuntaa tietyillä teknologioilla myös samanaikaisesti useaksi eri energiavektoriksi (esimerkiksi auringonsäteilyn muuntaminen samanaikaisesti sekä lämmöksi että sähköksi hybridikeräimellä). Lopuksi vielä mainittakoon, että biomassaa voidaan hyödyntää myös pyrolyysillä, jolloin saadaan tuotteena bioöljyä ja puuhiiltä, ja alkoholikäymisellä, jolloin saadaan tuotteena etanolia (Mikkonen & Kauriinoja 2011). Bioöljyä ja etanolia voidaan hyödyntää esimerkiksi liikennepolttoaineina.

Ympäristöllisesti kestävä energiajärjestelmää tavoitellessa tulisi pyrkiä myös hyödyntämään hukkalämpövirtoja (ks. kuva 5) mahdollisimman tehokkaasti, koska se parantaa energiajärjestelmän kokonaishyötysuhdetta, mikä puolestaan vähentää energiajärjestelmän negatiivisia ympäristövaikutuksia merkittävästi (Akorede ym. 2010; Forsström ym. 2011; Keirstead & Shah 2013; Lasseter & Piagi 2004; Lund 2014). Hukkalämpövirtoja voidaan hyödyntää sekä energiantuotannon että -kulutuksen puolella, joista tarkastellaan ensin tuotannon puolta. Sähköä tuotetaan perinteisesti erillisvoimalaitoksilla eli lämpövoimakoneilla. Lämpövoimakoneet tarvitsevat erittäin suuren lämpötilaeron saavuttaakseen järkevänsähköntuoton hyötysuhteen (Carnot'n hyötysuhteen rajoittama), minkä takia niiden toiminta perustuu mahdollisimman korkean lämpötilan luomiseen esimerkiksi kivihiiltä polttamalla. Tyypilliset olemassa olevat erillisvoimalaitokset tuottavat sähköä loppukäyttäjälle noin 40 %:n hyötysuhteella, mikä tarkoittaa, että laitokseen syötettävästä primäärienergiasta noin 60 % muuttuu hukkalämmöksi (Lasseter & Piagi 2004; Takahashi ym. 2005). Energiantuotantolaitoksen primäärienergiankäyttöä voidaan tehostaa parantamalla laitoksen hyötysuhdetta (esimerkiksi kombivoimalaitokset) ja/tai hyödyntämällä sen hukkalämpövirtaa (yhteistuotanto). Energiantuotantolaitoksen niin kutsuttu polttoaineesta hyödylliseksi energiaksi

-hyötysuhde (engl. *fuel-to-useful energy efficiency*) voi olla jopa yli 90 %, jos sen hukkalämpövirtaa hyödynnetään tehokkaasti esimerkiksi lämmönvaihtimilla kattamaan lämmöntarvetta ja absorptio-, adsorptio- tai kuivikejäähdyttimillä (engl. *desiccant cooling system*) kattamaan jäähdytystarvetta ja ilman kuivaamisen tarvetta. (Helen 2019; Lasseter & Piagi 2004; Lund ym. 2015.)



*Kuva 5 Energiavirtaa hyödynnettäessä sen entropia kasvaa ja syntyy hukkaenergiavirtoja, joita voidaan mahdollisesti hyödyntää sivuprosesseissa. Mitä korkeampilaatuista energiavirta on, sen helpompaa sitä on hyödyntää. (Mukaillen: Forsström ym. 2011.)*

Energiankulutuksen hukkalämpövirroilla tarkoitetaan alueen rakennuksissa ja prosesseissa jatkuvasti tapahtuvien lukemattomien energiamuunnoksien tuottamaa hukkalämpöä. Jotta näitä hajautettuja hukkalämpölähteitä voitaisiin tehokkaasti hyödyntää aluetasolla, tarvitaan lämmönsiirtoverkkoa, joka soveltuu hukkalämpövirtojen absorboimiseen (ks. luku 3.2.3). Koska energiankulutuksen profiilit vaihtelevat merkittävästi eri rakennuksien ja prosessien välillä, on varsinkin kaupungeissa suotuisaa mahdollistaa näiden vuorovaikutus keskenään energiaverkkojen avulla. Lämpö- ja kaasuverkot ovat siinä mielessä sähköverkoista poikkeavia, että ne eivät ole yhtä herkkiä hetkellisille tehonvaihteluille eivätkä vaadi jatkuvaa tasapainoa energiantuotannon ja -kulutuksen välillä (ts. niillä on energian varastointikykyä). Hieman yksinkertaistettuna voidaan todeta, että lämpöverkoilla on suurin potentiaali kaupungeissa, mutta ne eivät sovellu harvaan asutuille haja-asutusalueille. Sähkö- ja kaasuverkot sen sijaan soveltuvat energian siirtämiseen erittäin pitkienkin etäisyyksien päästä. (Keirstead & Shah 2013; Lund 2014.) Suomessa nykyään käytettävät korkealämpötilaiset (65–115 °C) kaukolämpöverkot kuitenkin rajoittavat rakennuksissa syntyvien matalalämpötilaisten hukkalämpövirtojen tehokasta hyödyntämistä. Neljännen sukupolven matalalämpöverkot sen sijaan mahdollistaisivat hukkalämpövirtojen hyödyntämisen huomattavasti tehokkaammin (ks. luku 3.2.3) (Lund ym. 2018).

Kestävässä energiajärjestelmässä luonnonvaroja käytetään siis mahdollisimman järkevästi ja tehokkaasti, niin että ihmisten, eliöiden tai ympäristön hyvinvointi ei kärsi nyt eikä tulevaisuudessa. Esimerkiksi jätteen energiakäytössä tulisi noudattaa niin kutsuttua hyvää jätteenkäytön hierarkiaa: jätteen määrän minimointi, uusiokäyttö, kierrätys, energiakäyttö ja viimeisenä vaihtoehtona kontrolloidulle kaatopaikalle toimittaminen. Biomassan energiakäytössä tulisi puolestaan ottaa päästöjen ohella huomioon sen vaihtoehtoiset hyödyntämistavat ja metsien kestävän käytön periaatteet. (Keirstead & Shah 2013.) Yllä pohdittiin sosiaalisesti ja ympäristöllisesti kestävän energiajärjestelmän määrittelyä sekä systeemitason

toimenpiteitä, joilla ympäristöllisesti kestävää energiajärjestelmää voidaan rakentaa. Kolmas kestävä kehityksen periaate eli taloudellinen kestävyys juontuu pitkälti sosiaalisesta ja ympäristöllisestä kestävyudesta, sillä jos energiajärjestelmä ei ole sosiaalisesti tai ympäristöllisesti kestävä, niin se ei ainakaan pitkällä aikavälillä ole myöskään taloudellisesti kestävä. Kestävään energiajärjestelmään liittyy läheisesti myös *energiaomavaraisuuden* käsite (ks. luku 3.1.2).

Yksittäisillä toimenpiteillä ei kuitenkaan saavuteta kestävää energiajärjestelmää. Tarvitaan kokonaisvaltaista lähestymistapaa, johon liittyy keskeisesti energiajärjestelmän joustavuus ja älykkyys (ks. luku 3.2.2), sekä moninäkökulmaista tarkastelua, jossa huomioidaan energiajärjestelmän laaja linkittyminen myös yhteiskunnan muihin osa-alueisiin. Energiajärjestelmien muutos on toisaalta radikaalinen teknologinen muutos (engl. *radical technology change*) ja toisaalta merkittävä sosiaalinen muutos, minkä vuoksi energiajärjestelmien tarkastelu pelkästä teknisestä näkökulmasta voi johtaa hyvinkin yksipuolisiin ja virheellisiin johtopäätöksiin. (Hedman 2016; Keirstead & Shah 2013; Lund 2014.) Energiajärjestelmän kestävyyttä analysoidessa on hyvä myös tiedostaa, että kestävyys on käsitteenä varsin monimutkainen. Täysin kokonaisvaltainen ymmärrys siitä, mikä on kaupunkien ja niiden energiajärjestelmien rooli osana kestävää yhteiskuntaa, vaatii laajaa asiantuntemusta ihmisten, eliöiden, yhteiskunnan ja luonnon ekosysteemien toiminnasta sekä niiden keskinäisistä vuorovaikutuksista. (Sodiq ym. 2019.) Kestävyystutkimus onkin varsin uusi ja monimutkainen tieteenala, joka on vielä varhaisessa kehitysvaiheessaan (Komiyama & Takeuchi 2006). Esimerkiksi Jørgensen & Svirezhev (2004) käsittelevät perusteellisesti kestävä ekosysteemin käsitettä esittäen termodynamiikan konsepteihin perustuvan ekosysteemitteorian, joka soveltuu myös energiajärjestelmien kestävyuden syvälliseen systeemitason ymmärtämiseen ja analysointiin. Tämänkaltaiset teokset auttavat lisäksi hahmottamaan, että energiajärjestelmät ovat suorasti tai epäsuorasti kytköksissä lähes kaikkeen ympäröivään maailmaamme ja vaikuttavat osaltaan esimerkiksi biologisen monimuotoisuuden ja ekosysteemien toimivuuden säilymiseen. Nykyisten mallintamismenetelmien rajoitteellisuuden ja käytännön suunnittelutyössä usein läsnä olevien ajankäytön ja resurssien rajallisuuksien johdosta alueellisessa energiatarkeastelussa riittää usein kuitenkin rajatumpi näkökulma, jossa keskitytään energiajärjestelmän merkittävimpiin energia- ja materiaalivirtoihin sekä sen olennaisimpiin vuorovaikutuksiin ympäristönsä kanssa (Keirstead & Shah 2013).

### 3.1.2 Hajautetun ja uusiutuvan energiantuotannon hyödyt

*Uusiutuvat energialähteet* ja *hajautettu energiantuotanto* sopivat hyvin yhteen, koska uusiutuvat energialähteet, varsinkin *uusiutuvat energiavirrat*, ovat luonteeltaan hajautettuja. Näin ollen uusiutuva energiajärjestelmä (ks. luku 3.2.1) eroaa perinteisestä energiajärjestelmästä energiantuotannon osalta kahdella perustavanlaatuisella tavalla: fossiiliset polttoaineet korvautuvat uusiutuvilla energialähteillä ja hajautetun energiantuotannon osuus lisääntyy merkittävästi. Fossiilisiin polttoaineisiin perustuva *keskitetty energiantuotantomalli* muotoutui 1900-luvun alkupuolella vallinneiden teknologisten rajoitteiden, markkinaympäristön sekä tietynlaisen ympäristöhaitoista tietämättömyyden ja välinpitämättömyyden toimintaympäristössä. (Keirstead & Shah 2013; Takahashi ym. 2005.) Nykypäivän tietoyhteiskunnassa eivät päde enää lainkaan samat teknologiset rajoitteet, fossiiliset polttoaineet ehtyvät ja kestävä kehityksen periaatteiden noudattaminen on ymmärretty välttämättömäksi (Takahashi ym. 2005; UNDP 2019). Kokonaisvaltaisesti ja optimaalisesti toteutettuna energiantuotannon hajauttamisen ja uusiutuvan energian lisäämisellä voidaan saavuttaa nykypäivän yhteiskuntaan lukuisia suotuisia vaikutuksia. Useiden tutkijoiden, toimikuntien ja konsulttitoimis-



tojen selvitysten mukaan hajautetulla ja uusiutuvalla energiantuotannolla on nykyään valtava mutta vielä suurilta osin hyödyntämätön taloudellinen ja ympäristöllinen potentiaali. (Ks. esim. Akorede ym. 2010; Chicco & Mancarella 2009; IPCC 2018; Keirstead & Shah 2013; Lund 2014; Takahashi ym. 2005; Theo ym. 2017.) Hajautetun ja uusiutuvan energiantuotannon lisäksi energiatehokkuustoimenpiteet omaavat merkittävän ympäristö- ja markkinapotentiaalin, mikä muistuttaa energiankulutuksen, varsinkin huippukulutuksen, pienentämisen ja joustamisen tärkeydestä (ks. luku 3.2.2) (Forsström ym. 2011; Keirstead & Shah 2013; Takahashi ym. 2005). Energiatehokkuustoimenpiteet voidaankin mieltää ajatuksellisesti hajautetuksi energiantuotantotavaksi, kun etsitään parasta mahdollista energiantuotantoratkaisua alueelle (erityisesti korjausrakentamisen yhteydessä) (Esen & Bayrak 2017).

Varsinkin sähkösektoria mutta myös lämpösektoria koskevia energiantuotannon hajauttamisen merkittävimpiä hyötyjä ovat energianjakelun luotettavuuden paraneminen, energiaverkon ruuhkautumisen ja vahvistamistarpeen hillitseminen, energianjakeluhäviöiden vähentyminen, keskitettyjen energiantuotantolaitoksien huipputehontarpeen pienentyminen sekä energiantuotannon joustavuuden luonnollinen lisääntyminen (Chicco & Mancarella 2009; Takahashi ym. 2005; Theo ym. 2017). *Hajautettu energiajärjestelmä* ei ole myöskään luonnonkatastrofeille, vandalismille tai muulle ulkoiselle uhalle yhtä haavoittuvainen kuin keskitetty energiajärjestelmä (Chicco & Mancarella 2009), vaikka toisaalta hajautettuun energiajärjestelmään läheisesti liittyvä energiajärjestelmän älykkyys (ks. luku 3.2.1) tuo mukanaan myös tietoturvariskejä (Ahonen & Honkapuro 2017). Vaikka keskitetty energiantuotanto itsessään on nykyään varsin luotettavaa, niin sen vaatiman järkkymättömän energiaverkon toteuttaminen ei ole helppoa tai itsestään selvää, kuten lukuisat erittäin kalliiksi ja vaarallisiksi osoittautuneet energiakatkokset maailman suurkaupungeissa ovat osoittaneet (Chicco & Mancarella 2009; Takahashi ym. 2005). Energiantuotannon hajauttamisella voidaan saavuttaa keskitettyä energiajärjestelmää vastaava energianjakelun luotettavuus merkittävästi vähemmällä energiaverkon silmukoinnilla johtuen lukuisien tuotantolaitoksien tuomasta vankasta yhteistoimintavarmuudesta ja vaihtoehtoisten energianjakelureittien lisääntymisestä. Hajautettu energiantuotanto myös mahdollistaa harvaan asutuiden alueiden (tai yksittäisien rakennuksien) energiaomavaraisuuden, mikä vähentää olennaisesti energiaverkon laajentamis- ja huoltotarvetta. (Takahashi ym. 2005; Theo ym. 2017.) Keskitetty energiantuotanto on ylipäätään hajautettua energiantuotantoa jäykempää ja sopeutumiskyvyttömämpää, ja sen luotettavuus on hyvin riippuvainen paitsi energiantuotantolaitosten niin myös energiaverkon virheettömästä toiminnasta. Kaupungistuminen ja sähköistyminen asettavat kaupunkien energiaverkoille yhä vaativampia teknisiä haasteita sekä lisäävät niiden toimimattomuuteen liittyviä riskejä. Varsinkin kaupungeissa pienetkin energiakatkot – sähkönjakelun osalta pelkästään energian laadun liialliset heilahtelut (engl. *electricity brownout*) – riittävät aiheuttamaan erittäin vakavia seurauksia. Tämä kärjistää keskitetyn energiajärjestelmän jatkuvaa energiaverkon vahvistamistarpeen kierrettä ja ylimääräisen energiantuotantokapasiteetin lisäämistarvetta, jos hajautettua energiantuotantoa ei päätetä hyödyntää. (Krog & Sperling 2019; Takahashi ym. 2005.) On syytä mainita, että energiantuotannon hajauttamista voidaan tehdä monella eri laajuus- ja automaatiotasolla, mikä määrää pitkälti millaisia vaikutuksia ja edellytyksiä sillä on energiajärjestelmään (Alanne & Saari 2006). Energiajärjestelmän älykkyyden lisääminen, hajautetun energiantuotannon optimaalisen osuuden tapauskohtainen määrittäminen ja perinpohjaiset liitettävyytystutkimukset (erityisesti sähkösektoria koskien) ovat keskeisiä asioita hajautetun energiajärjestelmän suunnittelussa, sillä energiantuotannon hajauttaminen voi väärin toteutettuna johtaa epäsuotuisiin vaikutuksiin varsinkin perinteisessä energiajärjestelmässä (Takahashi ym. 2005; Theo ym. 2017).

Hajautettu energiantuotanto on investointina keskitettyä energiantuotantoa riskittömämpää siinä mielessä, että hajautetun energiantuotannon alkuinvestointia ei tarvitse tehdä kerralla (Takahashi ym. 2005). Toisaalta hajautettuun energiantuotantoon läheisesti liittyvä vaihteleva uusiutuva energia (ks. luku 3.2.2) ja perinteisen energiajärjestelmän tekniset rajoitteet yhdistettynä energiajärjestelmien kehityksen epävarmuuteen lisäävät hajautettuun energiantuotantoon tehtävän investoinnin riskiä (Theo ym. 2017). Toisin kuin suurimittakaavaista keskitettyä energiantuotantokapasiteettia, pienimuotoista hajautettua energiantuotantokapasiteettia voidaan lisätä vähitellen ja joustavasti kysynnän lisääntyessä (Takahashi ym. 2005). Esimerkiksi ydinvoimalan lupahankinta, suunnittelu ja rakentaminen vievät yhteensä vähintäänkin useita vuosia (Carajilescov & Moreira 2011), mutta hajautetun energiantuotannon kapasiteettia voidaan lisätä kuukausittain, jopa viikoittain, ja vähän kerrallaan. Keskitettyyn energiantuotantolaitokseen joudutaan siis tekemään suuri alkuinvestointi, joka alkaa maksaa itseään takaisin vasta vuosien päästä, kun keskitetty energiantuotantolaitos valmistuu. Tämä aiheuttaa merkittävän vaihtoehtokustannuksen. Alkuinvestointia tehdessä joudutaan turvautumaan pitkän aikavälin ennustuksiin esimerkiksi tulevaisuuden poliittisista päätöksistä sekä energiantarpeen ja hintojen kehityksestä. Jos hanke rahoitetaan lainalla, niin alkuinvestointiin liittyy lisäksi merkittävät korkokustannukset. (Takahashi ym. 2005.) Kaupungistumisen myötä kaupunkien asukasmäärän ennustetaan kasvavan seuraavien vuosikymmenien aikana, jolloin myös kaupunkien energiantarve lisääntyy (ellei energiatehokkuustoimenpiteiden vaikutus ylitä energiantarpeen kasvua) (Keirstead & Shah 2013). Tämän takia keskitetyn energiantuotantolaitoksen tuotantokapasiteetti joudutaan ylimitoittamaan, sillä tuotantokapasiteetin tulee olla riittävä tuotantolaitoksen koko elinkaaren ajan. Tuotantokapasiteetin ylimitoitus johtaa siihen, että elinkaarensa alkupuolella keskitetyn energiantuotantolaitoksen energiakäyttökerroin on maksimaalista pienempi, mikä ei ole ideaalista resurssien tai sijoitetun pääoman hyödyntämistä. (Takahashi ym. 2005.) Lisäksi energiantuotantolaitoksen pitkä rakentamisaika ja rakentamishankkeen monimutkaisuus saattavat aiheuttaa merkittäviä kustannuksia. Pitkä rakentamisaika lisää myös energiantuotantolaitokseen *sitoutuneen energian* määrää ja siihen kytköksissä olevia päästöjä. (Carajilescov & Moreira 2011.)

Energiaverkon loppukäyttäjät voivat omalla hajautetulla energiantuotannollaan saada myös suoria hyötyjä samalla lisäten koko energiajärjestelmän vakautta. Loppukäyttäjät voivat hyödyntää omaa hajautettua energiantuotantoaan vähentämään ulkopuolisesta verkosta otettavan energian ja huipputehon määrää, mikä toisaalta vähentää myös keskitetyn energiantuotannon huipputehontarvetta. Oikein toteutettuna tämä lieventäisi tai jopa poistaisi kokonaan uusien keskitettyjen energiantuotantolaitosten ylimitoittamisen tarpeen ja vähentäisi loppukäyttäjien energiakustannuksia. (Takahashi ym. 2005; Theo ym. 2017.) Kokonaisvaltaisella energiajärjestelmän suunnittelulla on lisäksi mahdollista korvata kallista ja ympäristön kannalta haitallista perinteistä säätövoimaa hajautetulla uusiutuvalla energiantuotannolla, joka on ympäristöystävällistä ja käyttökustannuksiltaan minimaalista (Lund 2014; Takahashi ym. 2005). Siten myös energian markkinahinta laskisi varsinkin huipputehontarpeen hetkinä (erityisesti rajakustannushinnoitellussa energiamarkkinassa) (Pikk & Viiding 2013). Uusiutuvaan energiaan liittyy yleisellä tasolla myös muita hyötyjä, jotka eivät ole suoraan kytköksissä energiantuotannon hajauttamiseen, joita käsitellään seuraavaksi.

Uusiutuvan energian suurimmat hyödyt ovat ympäristöystävällisyys, energiantuotannon monilähteisyys, energiaomavaraisuuden mahdollistaminen ja minimaaliset käyttökustannukset (biomassaan ei tietyiltä osin kuitenkaan päde nämä hyödyt, vaikka biomassa voidaankin tulkita uusiutuvaksi energialähteeksi) (Lund 2014). Ympäristöystävällisyys on kestävä kehityksen kannalta tavoiteltava arvo jo itsessään, mutta myös sen positiiviset sivuvaikutukset

ovat hyvin merkittäviä sekä taloudellisesti että sosiaalisesti. Toisin kuin fossiilisiin polttoaineisiin perustuva energiantuotanto, uusiutuva energiantuotanto ei aiheuta rikki-, typpi- tai hiukkaspäästöjä, jotka varsinkin kaupungeissa aiheuttavat merkittäviä suoria ja epäsuoria kustannuksia ja terveyshaittoja sekä vähentävät viihtyisyyttä. (Allison & Lents 2002; HEAL 2013.) Uusiutuva energia ei tuota myöskään kasvihuonekaasuja (lukuun ottamatta mahdollisia sitoutuneita päästöjä) ja siten hillitsee ilmastonmuutosta, jonka sosiaaliset ja taloudelliset haittavaikutukset on arvioitu valtaviksi (IPCC 2018). Uusiutuvan energian käyttökustannukset ovat tyypillisesti erittäin pieniä, koska sen voimanlähteenä toimii auringonsäteily tai luonnon itsensä jatkuvasti ylläpitämät auringonsäteilyyn perustuvat kiertokulut, maan sisäinen *geoterminen energia* tai maan ja kuun välinen vetovoima (vuorovesivoima). Näin ollen uusiutuva energiantuotanto ei vaadi toimiakseen jatkuvaa polttoaineen tuottamiseen, kuljetamiseen ja polttamiseen tarvittavaa työvoimaa ja välttää myös kokonaan näistä aiheutuvat ylimääräiset kustannukset ja päästöt. Uusiutuvan energian huoltokustannukset ovat tyypillisesti pieniä eivätkä juurikaan nouse tuotetun energiamäärän kasvaessa. (Pikk & Viiding 2013; Riesz & Milligan 2015.) Lisäksi päästöoikeuksien hankinnasta (päästökauppajärjestelmässä) tai haittaverotuksesta aiheutuvat kustannukset eivät kohdistu uusiutuvaan energiaan (Pikk & Viiding 2013). Valtioilla tai alueilla, joilla ei ole merkittäviä *fossiilisia polttoainevaroja* (mukaan luettuna ydinpolttoaineet), ei voida energiaomavaraisuutta saavuttaa ilman uusiutuvan energian 100 %:n osuutta energiantuotannosta (Lund 2014). Tämä tilanne tulee vastaan ennemmin tai myöhemmin kaikkialla maailmassa, ja suuri osa maailmasta on nykyään hyvin riippuvainen muualta tuodusta energiasta tai energialähteistä (Esen & Bayrak 2017) – mukaan lukien Suomi (Ruggiero ym. 2015). Energiaomavaraisuus ja energialähteiden monimuotoisuus ovat paitsi *energiaturvallisuuden* niin myös kansantalouden kannalta erittäin tärkeitä (Esen & Bayrak 2017; Lund 2014). Suomessa olisi nykyteknologialla (mutta ei nykyjärjestelmällä) mahdollista saavuttaa lähes täydellinen energiaomavaraisuus fossiilivapaasti (Rinne ym. 2018).

Yllä esitettiin energiantuotannon hajauttamiseen ja uusiutuvaan energiaan liittyviä hyötyjä toisistaan eroteltuna. Kuten luvun alussa mainittiin, nämä kaksi kuitenkin liittyvät läheisesti toisiinsa ja yhdistettynä linkittyvät puolestaan vahvasti *edistyksellisiin energijärjestelmiin* (ks. luku 3.2). Akorede ym. (2010) tuovat esille ympäristö- ja terveyshyötyjä, joita voidaan saavuttaa hajautettua ja uusiutuvaa energiaa edistyksellisellä tavalla hyödyntävällä energijärjestelmällä (verrattuna perinteiseen energijärjestelmään). He jakavat hajautettuihin uusiutuviin ja vähäpäästöisiin energialähteisiin perustuvan energijärjestelmän ympäristö- ja terveyshyödyt neljään eri kategoriaan: energiatehokkuuden paranemisen hyödyt, energiantuotannon päästövähennyksien hyödyt, ilmansaasteiden vähenemisen hyödyt sekä maankäytön ja luonnonvarojen tehokkaampi hyödyntämismahdollisuus. Edistyksellisen hajautetun energijärjestelmän energiatehokkuus on perinteistä energijärjestelmää parempi muun muassa hukkalämpöjen paremman hyödyntämismahdollisuuden, pienempien energiansiirtohäviöiden ja energiavektorien integroimisen tuoman resurssienkäytön tehokkuuden takia. Energiantuotannon päästövähennyksillä tarkoitetaan hajautetun energijärjestelmän erinomaista soveltuvuutta päästöttömien tai vähäpäästöisten uusiutuvien energialähteiden hyödyntämiselle. Ilmansaasteet, kuten typpi-, hiilidioksidi- ja rikkipäästöt, vähenevät energijärjestelmän energiatehokkuuden paranemisen ja energiantuotannon päästövähennyksien seurauksena, millä on positiivinen vaikutus myös ihmisten terveyteen. Luonnonvarojen hyödyntämisen tehokkuudella viitataan siihen, että uusiutuvat energiantuotantotavat kuluttavat huomattavasti vähemmän *ehtyviä luonnonvaroja* (ei välttämättä ollenkaan) verrattuna perinteisiin keskitettyihin järjestelmiin. Hajautetut energiantuotantotavat ovat lisäksi maankäytöllisesti tehokkaita. Esimerkiksi aurinko- ja tuulivoimajärjestelmät tarvitsevat suotuisissa

olosuhteissa 1 MW sähkötehon tuottamiseen keskimääräisesti vähemmän tilaa kuin hiilivoimala (hiilivoimalan louhinta-alue mukaan laskettuna), ja sen lisäksi pienikokoisia hajautettuja energiantuotantoyksiköitä voidaan sijoittaa jo hyödynnetylle maa-alueelle, kuten rakennuksien katoille ja julkisivuille. Säästetty tila ja *luonnonvarat* voidaan käyttää muuhun hyödylliseen tarkoitukseen. (Akorede ym. 2010.)

Uusiutuvien energialähteiden hajautettu luonne on varmasti yksi syy siihen, miksi kirjallisuudessa usein painotetaan uusiutuvien energialähteiden yhteydessä hajautettua energiantuotantotapaa, vaikka ne soveltuvat myös keskitettyyn energiantuotantoon (Tian ym. 2019). Burger ym. (2019) väittävät, että *hajautettu uusiutuva energiantuotanto* on vain tietyissä olosuhteissa keskitettyä uusiutuvaa energiantuotantoa parempi vaihtoehto. *Mittakaavaedun* takia keskitetyn energiantuotannon yksikköhinta (tuotetun energian laskennallinen keskimääräinen hinta koko elinkaari huomioiden) on tyypillisesti matalampi kuin samalla teknologialla toteutetun hajautetun energiantuotannon yksikköhinta, mutta toisaalta hajautettu energiantuotanto voi luoda energijärjestelmään paikallista lisäarvoa. Tämän takia hajautetun energiantuotannon luoman paikallisen lisäarvon tulisikin ylittää keskitetyn energiantuotantotavan vaihtoehtoiskustannus, jotta se olisi parempi vaihtoehto. Erityisesti sähköverkoissa hajautetun energiantuotannon paikallista lisäarvoa nostavia tekijöitä ovat alueen eristyisyys, energiaverkon paikallinen ruuhkautuneisuus, energiansiirtohäviöiden paikallinen suuruus ja energiakatkosten paikallinen todennäköisyys. Näihin vaikuttavat energiantarpeen spatiotemporaalinen jakautuminen, sähköverkon topologia ja sen komponenttien maksimikapasiteetit sekä solmukohtien maksimijännitteet. Tämä johtaa Burgerin ym. mukaan siihen, että hajautetun energiantuotannon paikallisen lisäarvon suuruus muodostuu lähes kokonaan energian paikallisesta lisäarvosta (mahdollisuus tuottaa energiaa halvemmalla kalliin marginaalikustannuksen alueella eli ruuhkautuneella, suurihäviöisellä tai syrjäisellä alueella), energiaverkon laajentamis- ja vahvistamistarpeen vähentymisestä (maltilliset kysynnän muutokset eivät vaadi kalliita investointeja energiaverkkoon) sekä energianjakelun luotettavuuden ja joustavuuden parantumisesta (energiakatkosten välttäminen ja riippumattomuus keskitetystä energiantuotannosta). Burger ym. painottavatkin, että hajautetun energiantuotannon lisäarvopotentiali on riippuvainen sen sijainnista energijärjestelmässä, jonka takia hajautettuja energiantuotantotapoja pitäisi hyödyntää sellaisissa paikoissa, joissa niiden lisäarvopotentiali on suurimmillaan. Esimerkkinä mainitaan tiheään asuttu kaupunki kuitenkin huomauttaen, että liian suuri hajautettujen energiantuotantotapojen osuus voi johtaa sähköverkon jännitekapasiteetin (engl. *hosting capacity*) ylittymiseen ja siten vääränsuuntaiseen sähkövirtaan sähköverkossa, mikä ei ole perinteisessä sähköverkossa toivottavaa aiheuttaen kustannuksia. Toisen ääripään esimerkkinä hajautetulle energiantuotannolle parhaiten soveltuvaksi sijainniksi mainitaan syrjäinen rakennus kaukana asumiskeskittymästä. Hajautettuja energiantuotantotapoja usein tuetaan varsinkin Euroopassa enemmän kuin keskitettyjä energiantuotantotapoja pohjautumatta lisäarvopotentialianalyysiin, mikä ei ole Burger ym. mukaan välttämättä perusteltua. (Burger ym. 2019.)

On syytä huomata, että Burger ym. ottavat kantaa vain perinteisen energijärjestelmän sähkösektoriin eivätkä huomioi edistyksellisen energijärjestelmän (ks. luku 3.2) mahdollistamaa energiasektorien yhdistämisen tuomia etuja ja siihen liittyviä mahdollisuuksia, kuten *hajautettua yhteistuotantoa*. Burger ym. laskennalliset esimerkit keskitetyn energiantuotannon edullisuudesta ovat relevantteja, jos käsitellään pelkästään sähkösektoria koskevaa hajautetun vaihtelevan energiantuotannon lisäämistä perinteiseen energijärjestelmään ilman kokonaisvaltaista lähestymistapaa, mutta paikallisen lisäarvon argumentti itsessään on validi myös edistyksellisissä integroiduissa energijärjestelmissä. Muun muassa Alanne & Saari

(2006), Keirstead & Shah (2013), Krog & Sperling (2019) ja Orecchini & Santiangeli (2011) esittävätkin, että parhaaseen lopputulokseen päästään, kun hyödynnetään optimaalisesti rinnakkain sekä keskitettyä että hajautettua energiantuotantoa. Tutkimuksissa tuodaan myös esille, kuinka edistyksellisessä energiajärjestelmässä hajautettuja energiantuotantolaitoksia voidaan ohjata keskitetyksi, jolloin ne muodostavat keskitettyä energiantuotantolaitosta vastaavan kokonaisuuden eli niin kutsutun *virtuaalisen voimalaitoksen* (ks. luku 3.2.1). Yksittäisien energiasektorien energiamurros on mahdollista toteuttaa täysin keskitetyllä tavalla (esimerkiksi sähkösektorin energiamurros rakentamalla suurikapasiteettisen sähköverkkoinfrastruktuurin, johon tuotetaan energiaa suurilla tuulivoimapuistoilla ja aurinkovoimalaitoksilla), jolloin myöskään energiamarkkinoihin tai energiajärjestelmiin ei kohdistuisi yhtä merkittäviä muutostarpeita kuin laajamittaisesti hajautetussa skenaariossa (ks. luku 3.2.2) (Driesen & Katiraei 2008; Krog & Sperling 2019). Tällä tavalla ei kuitenkaan saavuteta energiantuotannon hajauttamisen tai energiasektorien kokonaisvaltaisen integroimisen hyötyjä, sillä keskitetty energiajärjestelmä – myös uusiutuvaan energiantuotantoon perustuva – voi olla jopa esteenä energiasektorien integroimiselle (Krog & Sperling 2019). Optimaalinen energiantuotannon hajauttamisen taso on kuitenkin tapauskohtaista, ja siihen vaikuttaa lukuisat asiat, joita ovat esimerkiksi paikallisen energiantarpeen tiheysprofiili ( $W/m^2$ ), paikallisten energialähteiden hyödynnettävyys ja sijainti (mukaan lukien hukkalämmönlähteet), loppukäyttäjien energian laatuvaatimukset (asuintalo–teollisuuslaitos); paikalliset maankäytölliset, sosiaaliset ja poliittiset rajoitteet; jo olemassa oleva infrastruktuuri, mittakaavaedun suuruus sekä vallitseva energiamarkkinamalli – ja tietysti optimaalisuuden määrittelevä tavoitteenasettelu (Keirstead & Shah 2013; Krog & Sperling 2019). Hajautettu energiajärjestelmä vaatii kuitenkin toteutuakseen energiamarkkinoiden sopeutumista, aktiivista poliittista tahtotilaa ja eri toimijoiden välistä laajaa yhteistyötä. Lisäksi erityisesti hajautetun uusiutuvan energian laajamittainen ja tehokas hyödyntäminen vaatii energiajärjestelmältä nykyistä enemmän joustavuutta ja älykkyyttä. (Lund ym. 2015; Driesen & Katiraei 2008; Takahashi ym. 2005.) Näitä edellytyksiä käsitellään tarkemmin luvussa 3.2.2.

### 3.1.3 Energiajärjestelmän suorituskyvyn arviointi

On tärkeää, että energiajärjestelmälle asetettujen tavoitteiden täyttymistä ja mahdollisia parannustoimenpiteitä voidaan arvioida ja mitata systemaattisesti sekä vertailukelpoisesti. Tähän tarkoitukseen on kehitetty joukko arviointimenetelmiä ja indikaattoreita. Indikaattorilla tarkoitetaan systeemin laskettavissa olevaa ominaisuutta, jonka perusteella voidaan tehdä päätelmiä sen suorituskyvystä. Arviointimenetelmällä tarkoitetaan puolestaan sitä prosessia, jolla indikaattorin arvo lasketaan. (Forsström ym. 2011.) Myös termiä suorituskykyindikaattori voidaan käyttää, kun halutaan korostaa indikaattorin liittymistä systeemin suorituskykyyn (esimerkiksi tekniseen suorituskykyyn).

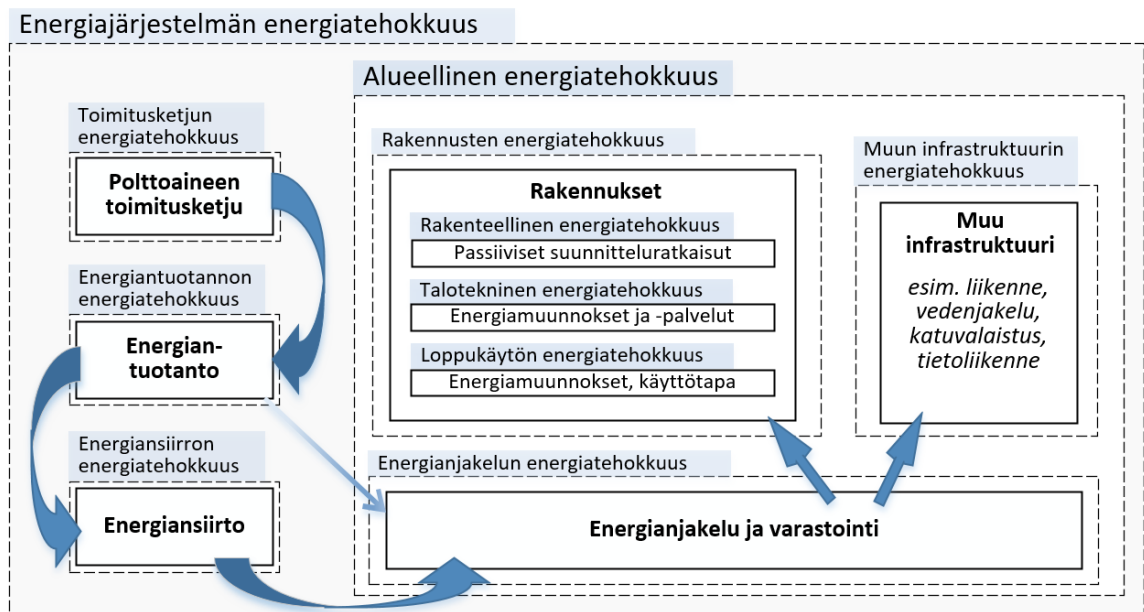
Energiajärjestelmien arviointimenetelmät voidaan jakaa kvalitatiivisiin ja kvantitatiivisiin menetelmiin. Energiajärjestelmän optimointiongelmien tavoitteet muodostetaan mitattavissa olevilla indikaattoreilla, jonka vuoksi tässä työssä keskitytään erityisesti kvantitatiivisiin arviointimenetelmiin. On syytä mainita, että kvalitatiivisia arviointimenetelmiä (esimerkiksi SWOT-analyysiä) voidaan käyttää kvantitatiivisten arviointimenetelmien tukena antamaan arvioita ja suuntaviivoja, joiden perusteella kvantitatiivisten arviointimenetelmien tulosten luotettavuutta ja toteutettavuutta voidaan analysoida. Energiajärjestelmän suunnitteluvaiheesta ja -luonteesta riippuen arviointimenetelmien tarkkuustaso, tavoitteet sekä laskennan ajanjakso ja aika-askel vaihtelevat. Tähän pohjautuen arviointimenetelmien luokittelu voidaan tehdä esimerkiksi laskennan ajanjakson ja aika-askeleen, tavoitteiden laadun ja määrän, epävarmuuden sisällyttämisen/sisällyttämättömyyden tai tuloksen tyyppin perusteella.

Energiajärjestelmien arviointimenetelmissä käytetty laskennan aika-askel vaihtelee tyypillisesti tunnista vuoteen. Arvioinnin ajanjaksona käytetään yleensä yhtä edustavaa vuotta tai koko elinkaaren huomioon ottavaa ajanjaksoa. Sekä deterministisiä että stokastisia syöttötietoja voidaan käyttää energiajärjestelmän arviointimenetelmässä riippuen siitä, halutaanko lähtötietojen epävarmuutta huomioida suoraan arviointimenetelmän sisällä. Tyypillisiä energiajärjestelmän suorituskyvylle asetettavia tavoitteita eli suorituskykyindikaattoreita ovat esimerkiksi energia- ja eksergiatehokkuus, taloudellinen kannattavuus ja ympäristöystävällisyys sekä näiden erilaiset yhdistelmät, kuten teknistaloudellisuus, jolloin arviointimenetelmä muodostuu monitavoitteiseksi. Tämän luvun lopussa taulukossa 1 esitetään lisää energiajärjestelmän arvioinnin tyypillisiä suorituskykyindikaattoreita. Arvioinnin tulokset (ts. suorituskykyindikaattorien arvot) voidaan esittää absoluuttisina tai suhteellisina lukuina, joista jälkimmäisellä tarkoitetaan, että tulokset suhteutetaan tietyn ennalta määritetyn referenssiratkaisun avulla. Suhteellisten tulosten etu on, että ne tarjoavat itsessään tietoa suunnitteluratkaisun hyvydestä tai huonoudesta verrattuna referenssiratkaisuun, joka edustaa tyypillisesti mahdollisimman tavanomaista suunnitteluratkaisua. (Mancarella 2014.)

Arviointimenetelmien avulla saadaan siis laskettua erilaisia energiajärjestelmän suorituskykyindikaattoreita päätöksenteon tueksi. Alueellisessa energiaoptimoinnissa arviointimenetelmät ovat vahvasti kytköksissä energiajärjestelmän optimointimallintamiseen, johon palataan luvussa 3.3.1. Energiajärjestelmän energiatehokkuus, ympäristöystävällisyys ja kustannustehokkuus eivät ole yksiselitteisiä käsitteitä, minkä vuoksi ei myöskään ole olemassa sellaista suorituskykyindikaattoria, jonka avulla voitaisiin määrittää yksiselitteisesti ja tyhjentävästi energiajärjestelmän energiatehokkuus, ympäristöystävällisyys tai kustannustehokkuus. Ylipäätään ei ole mahdollista määrittää sellaista energiajärjestelmän suorituskykyindikaattoria, joka ottaisi tasapuolisesti huomioon kaikki eri näkökulmat ja tarpeet. Sen takia on kehitetty lukuisia energiatehokkuus-, ympäristöystävällisyys- ja kustannustehokkuusindikaattoreita, jotka soveltuvat eri käyttötarkoituksiin ja tarpeisiin aina loppukäyttäjistä sääntelijään asti. Nämä suorituskykyindikaattorit täydentävät toisiaan, mutta antavat parhaimmillaankin vain hyvän arvion tarkasteltavan energiajärjestelmän suorituskyvystä. Energia-analyysin suorittajan pitääkin ymmärtää kokonaisvaltaisesti analyysin lähtötilanne, tavoitteet ja tarpeet, jotta kykenee valitsemaan mahdollisimman tarkoituksenmukaisen indikaattorin tai indikaattorit päätöksenteon tueksi. (Forsström ym. 2011.)

Alueen energiajärjestelmän suorituskyvyn arvioinnissa pitää aluksi määrittää tarkastelun taseraja. Taserajalla erotetaan tutkimuksen kohteena oleva systeemi tai ilmiö ympäristöstään. Taseraja voidaan muodostaa esimerkiksi maantieteellisenä alueena tai käsitteellisenä tapahtumarajana, ja se voi muuttua myös muotoaan ja kokoaan systeemin muuttuessa. Taserajan sisäpuoliset vuorovaikutukset otetaan huomioon yleensä eri tavalla kuin taserajan ja sen ympäristön väliset vuorovaikutukset tai taserajan ulkopuolella tapahtuvat ilmiöt. Energiatehokkuuden laskennassa taserajan sisäpuolisia vuorovaikutuksia käsitellään yleensä eksplisiittisesti, mutta taserajan ulkopuolisia vuorovaikutuksia käsitellään implisiittisesti esimerkiksi erilaisia keskiarvoisia energianmuuntokertoimia käyttäen. Taserajan avulla voidaan määrittää, minkä kokonaisuuden energiatehokkuutta lasketaan: koko energiajärjestelmän, tietyn alueen vai yksittäisen rakennuksen energiatehokkuutta. Taserajojen selkeä määrittely on tärkeä osa alueellista energiasuunnittelua, koska sillä mahdollistetaan suorituskykyindikaattorien vertailtavuus ja yksiselitteisyys sekä myös energian loppukäytön luokittelu eri sektorien kesken. Energiajärjestelmän suunnittelussa voidaan lisäksi välttää haitallista osaoptimointia (engl. *partial optimization*) määrittämällä sen taserajat huolellisesti ja tarkoituksenmukaisesti. (Forsström ym. 2011; Keirstead & Shah 2013; Pasanen ym. 2013.) Kuvassa 6 esitetään yksi

mahdollinen tapa energiajärjestelmän taserajojen määrittämiselle. Liitteessä 1 esitetään lisäksi yksityiskohtaisempi ja erityisesti kaavoituksen näkökulmasta luotu alueellinen energiataserajamalli.

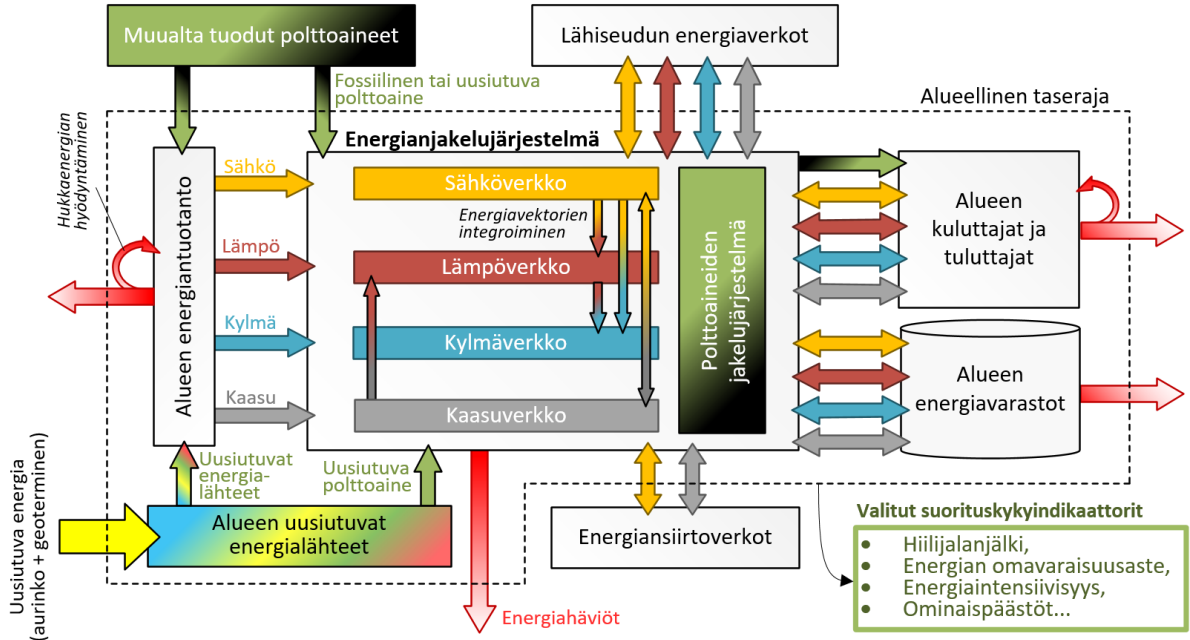


Kuva 6 Energiajärjestelmän taserajat. Nuolet kuvaavat järjestystä (huomioimatta mahdollisia kaksisuuntaisia energiavirtoja), katkoviivalliset laatikot taserajoja ja ääriviivalliset laatikot prosesseja tai rakenteita. (Mukaiillen: Forsström ym. 2011.)

Yksittäisen rakennuksen energiatehokkuus on lähimpänä loppukäyttäjää, ja se koostuu esimerkiksi taloteknisten laitteiden hyötysuhteista sekä rakennuksen vaipan ominaisuuksista. Alueellinen energiatehokkuus koostuu alueen kaikkien rakennuksien, muun infrastruktuurin, alueen energiantuotannon ja -jakelun sekä energian varastoinnin energiatehokkuudesta. Koko energiajärjestelmän energiatehokkuus huomioi energiajärjestelmän energiavirtojen energiaketjut kokonaisuudessaan. Yllä esitetystä energiajärjestelmän taserajojen määrittelytavassa yritetään hahmottaa energiajärjestelmän tärkeimmät energiamuunnos- ja siirtoprosessit, mutta se ei ole ehdoton tai absoluuttisen oikea tapa energiajärjestelmän taserajojen määrittelylle. Esimerkiksi kuvassa esiintyvä alueellisen energiatehokkuuden taseraja ei ole jäykkä, vaan on analyysin tavoitteista kiinni, sisällytetäänkö alueellisen energiatehokkuuden taserajaan myös alueen ulkopuoliset energiavirtojen energiaketjujen osat. Jos rakennuksilla tai alueella on omaa hajautettua energiantuotantoa tai energian varastointia, niin ne tulee sisällyttää asiaankuuluvan taserajan sisäpuolelle. Esimerkiksi rakennukseen integroitu energiantuotanto voitaisiin intuitiivisesti sisällyttää rakennusten energiatehokkuuden taserajaan, sillä rakennukseen integroitu energiantuotanto vähentää sen energiantarvetta. Aluetason energiantuotantolaitos puolestaan, joka palvelee esimerkiksi naapurustoa, voitaisiin vastavalla periaatteella sijoittaa alueellisen energiatehokkuuden taserajan sisäpuolelle. Taserajojen määrittely tuleekin aina tehdä tapauskohtaisesti perustuen tutkittavaan asiaan, haluttuun informaatioon ja saatavissa oleviin lähtötietoihin (Forsström ym. 2011; Pasanen ym. 2013).

Viholainen ym. (2016) esittävät alueelliselle taserajalle soveltuvan energiatasapainomallin. Malli on yksinkertainen kuvaus alueen energiavirroista, jossa ei oteta kantaa käytettävien energialähteiden alkuperään tai tarkkaan sijaintiin. Mallin avulla voidaan kuvata alueen toimijoiden ja energiainfrastruktuurin välisiä energiavirtoja sekä tunnistaa alueen ulkopuolelta

tulevat ja alueen ulkopuolelle syötettävät energiavirrat. Viholaisen ym. esittämä alueellinen energiatasapainomalli tarjoaa siten hyvän lähtökohdan alueellisten energiavirtojen tunnistamiselle ja alueellisen suorituskyvyn mittaamisen taserajan hahmottamiselle. Kuvassa 7 esitetään kyseistä mallia mukaileva mutta edistyksellisiä alueellisia energiajärjestelmiä (ks. luku 3.2) kokonaisvaltaisemmin kuvaava alueellinen energiatasapainomalli.



Kuva 7 Alueellinen energiatasapainomalli (mukaillen: Viholainen ym. 2016).

Yllä olevasta kuvasta voidaan myös havaita, kuinka suorituskykyindikaattorit linkittyvät valittuun taserajaan. Yleisimmät energiajärjestelmän suorituskykyä mittaavat indikaattorit pohjautuvat perimmiltään niin kutsuttuun panos–tuotos-hyötysuhteeseen (engl. *input–output efficiency*). Koko energiajärjestelmän tai sen yksittäisten komponenttien energiatehokkuus voidaan laskea panos–tuotos-hyötysuhteen avulla seuraavasti: (Forsström ym. 2011; Mancarella 2014)

$$\eta_{PT} = \frac{\text{Tuotos}}{\text{Panos}} = \frac{\text{Tuotettu hyödyllinen energia}}{\text{Sisään syötetty (hyödyllinen) energia}} \quad (3)$$

Jos tuotos ei ole mitattavissa olevaa energiaa, energiajärjestelmän energiatehokkuutta voidaan arvioida energiantensiteetin ( $I$ ) avulla seuraavasti: (Forsström ym. 2011)

$$I = \frac{\text{Panos}}{\text{Kysyntäindikaattori}} \quad (4)$$

Energiantensiteetin (engl. *energy intensity*) kaavan (yhtälö (4)) nimittäjässä esiintyvä kysyntäindikaattori (engl. *demand indicator*) ilmaisee hyödykettä, palvelua, prosessia, kulu-tusta tai muuta asiaa, joka aiheuttaa energiantarpeen eli vaatii panoksen. Energiantensiteetti on yksi tärkeimmistä indikaattoreista *energiavarojen* hyödyntämisen tehokkuuden arvioinnissa: sen avulla voidaan käytännössä vastata kysymykseen ”Kuinka paljon energiaa tarvitaan tuottamaan haluttu hyödyllinen asia?” Voidaan huomata, että energiantensiteetti on kääntäen verrannollinen energiatehokkuuteen eli sen kasvaessa energiatehokkuus pienenee. (Esen & Bayrak 2017; Forsström ym. 2011.) Näin ollen pieni energiantensiteetti implikoi



energiatehokkaasta energiajärjestelmästä (tai mistä tahansa muusta systeemistä). Energiaintensiteetin kaava (yhtälö (4)) johtaa myös seuraavaan perustavanlaatuisen riippuvuussuhteeseen energiantarpeen, energiaintensiteetin ja tuotoksen välillä:

$$Q = I \cdot S \quad (5)$$

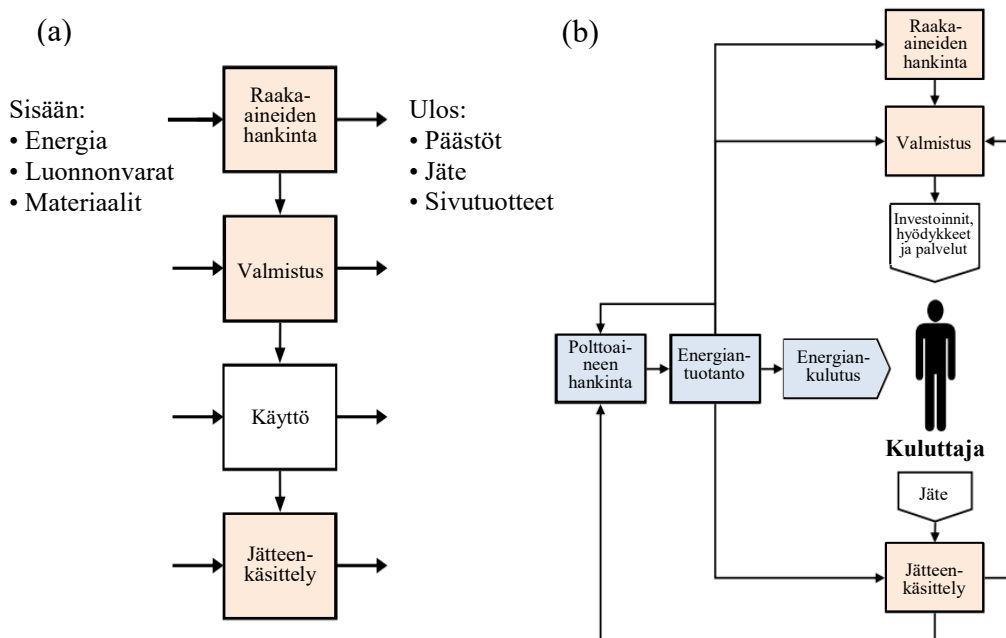
missä  $Q$  on kokonaisenergiankulutus (panos), joka vaaditaan tuottamaan energiaintensiteetin  $I$  omaava tuotos  $S$  (Forsström ym. 2011). Yhtälöissä (3)–(5) esitettyihin panos–tuotos-hyötysuhteeseen ja energiaintensiteetin periaatteeseen perustuvat indikaattorit ovat yleisesti käytettyjä energiajärjestelmien suorituskykymittareita, joiden perusteella voidaan myös arvioida koko yhteiskunnan energiatehokkuutta, kehityssuuntaa ja hyvinvointia laajemmastakin näkökulmasta (Esen & Bayrak 2017; Forsström ym. 2011).

Energiatehokkuuden indikaattorit voidaan jakaa neljään eri luokkaan sen perusteella, mitä suureita ne käyttävät määrittämään panoksen ja tuotoksen. Termodynaamiset indikaattorit mittaavat panoksen ja tuotoksen energiamäärien suhdetta (esim. lämmönvaihtimen hyötysuhde  $[J/J]$ ). Fysikaalis-termodynaamiset indikaattorit mittaavat panosta kulutettuna energiana mutta tuotosta fyysisenä yksikkönä (esim. rakennuksen energiankulutus asuinpinta-alaa kohden  $[kWh/m^2]$ ). Taloudelliset-termodynaamiset indikaattorit puolestaan mittaavat panosta kulutettuna energiana mutta tuotosta rahallisena kustannuksena (esim. bruttokansantuotteen energiaintensiteetti  $[MJ/€]$ ). Ja viimeisenä, taloudelliset indikaattorit mittaavat sekä panosta että tuotosta rahallisena kustannuksena (esim. investointikustannuksen ja rahallisen energiansäästön suhde  $[€/€]$ ). Jokainen edellä mainitusta neljästä luokasta sisältää lisäksi lukuisia alaluokkia. On huomioitava, että panoksen ja tuotoksen määrittely ei ole triviaalia vaan riippuu tarkastelun tavoitteesta ja taserajoista. (Forsström ym. 2011.)

Energiajärjestelmän suorituskykyindikaattorien panoksen ja tuotoksen määrittelyssä on joukko näkökulmia, jotka tulee ottaa huomioon tai jättää tietoisesti huomioimatta. Näitä ovat elinkaarinäkökulma, laatu- ja integroimisnäkökulma sekä vertailuarvonäkökulma. Laatu- ja integroimisnäkökulmalla tarkoitetaan sitä, että eri energiavirtojen vertailu keskenään pelkästään energiamäärien perusteella ei ole välttämättä riittävää. Energian laatu riippuu energian muodosta, *eksergiasta*, muunnettavuudesta, lämpötilasta tai muusta loppukäyttäjälle lisäarvoa tuovasta energiavirran ominaisuudesta, kuten tarpeellisuudesta tai käytettävyydestä. (Forsström ym. 2011; Midžić ym. 2014.) Ohta (1994) esitti, että eri energiamuotojen välille on mahdollista määrittää laatuhierarkia sen perusteella, kuinka helposti energiamuoto voidaan muuntaa toiseksi energiamuodoksi<sup>1</sup>: sähkömagneettinen energia > mekaaninen energia > valon energia > kemiallinen energia > lämpöenergia. Esimerkiksi sähköenergia voidaan muuntaa vastuksien avulla lämmöksi 100 %:n hyötysuhteella ja mekaaniseksi energiaksi lähes 100 %:n hyötysuhteella, mutta lämpö on mahdollista muuntaa mekaaniseksi energiaksi ja siten myös sähköksi ideaalisestikin enintään Carnot'n hyötysuhteella. Näin ollen sähköenergian eksergia on suurempi ja sen muunnettavuus on parempi kuin lämpöenergian. (Brown & Ulgiati 2004; Midžić ym. 2014.) Eksergian avulla voidaan vertailla myös saman energiamuodon laatua eri olosuhteissa. Kun systeemin eksergia on nolla, se on täydellisessä tasapainossa ympäristönsä kanssa eli niin kutsutussa kuolleessa tilassa (engl. *dead state*). Esimerkiksi korkealämpötilaiset lämpövirrat sisältävät siis enemmän eksergiaa

<sup>1</sup> Ohtan esittämä energiamuotojen laatu- ja integroimisnäkökulmia ei tarkasti ottaen pohjautu pelkästään energiamuotojen konversiohyötysuhteisiin, vaan kuvastaa yleisemmin eri energiamuotojen välisten muunnosten suhteellista helpoutta huomioiden myös energiamuotojen luonnollisen esiintymisen harvinaisuuden.

kuin matalalämpötilaiset lämpövirrat, mikä tarkoittaa, että niitä voidaan hyödyntää matalalämpötilaisia lämpövirtoja helpommin. (Müller ym. 2011.) Eksergiaan perustuvat suorituskykyindikaattorit ovat tietyissä tilanteissa sopivampia kuin energiamääriin perustuvat suorituskykyindikaattorit. Eksergiatarkastelun avulla saadaan esimerkiksi selville, onko arvokasta sähköenergiaa käytetty epätehokkaalla tavalla tuottamaan vähäarvoista lämpöenergiaa, eli saadaan tietoa, kuinka paljon on hukattu energian työhön kykenevää potentiaalia. (Forsström ym. 2011; Niemi ym. 2012.) Pelkällä energiankäytön määrällisellä tarkastelulla tätä ei ole mahdollista selvittää, mutta usein kiinnostuksen kohteena on vain niin kutsuttu maksettava osuus energiasta, joka saadaan normaalilla energiamäärien tarkastelulla selville (Mancarella 2014). Pelkissä energiamäärien tarkasteluissakin on silti syytä ottaa energian laatu huomioon esimerkiksi käytettävyyden osalta. Esimerkiksi Suomen olosuhteissa rakennukset tarvitsevat talvella paljon lämmitystä mutta kesällä vain vähän, eli lämpöenergian käytettävyyden on Suomessa talvella parempi kuin kesällä. Näin ollen lämpöenergian voidaan sanoa olevan laadukkaampaa talvella kuin kesällä Suomen olosuhteissa. Yhteistuotanto- ja integroimisnäkökulmalla tarkoitetaan yhteistuotannosta ja energiavirtojen tai prosessien integroimisesta aiheutuvia epämääräisyyksiä tuotetun hyödyn allokoinnissa. Jos esimerkiksi tuotantolaitos tuottaa hyödykettä, jonka sivuvirtana syntyy toiselle prosessille hyödynnettävissä olevaa materiaalia, niin ei ole yksikäsitteistä, kuinka tämä sivuvirta otetaan huomioon määrittäessä tuotantolaitoksen koko fysikaalis-termodynaamista hyötysuhdetta (ts. energiankulutus tuotettua hyödykettä kohden). Vertailuarvonäkökulman tärkeys tulee esille suhteellisissa indikaattoreissa, sillä kuten aiemmin mainittiin, suhteelliset indikaattorit tarvitsevat referenssiratkaisun, johon tarkasteltavaa ratkaisua verrataan. Tarkasteltavan ratkaisun ja referenssiratkaisun vertailukelpoisuuteen vaikuttavat muun muassa niissä käytetyt taserajat, tehdyt alkuoletukset ja huomioitavat näkökulmat – näiden pitäisi olla yhteneväiset vertailtavuuden takaamiseksi. (Forsström ym. 2011.) Kestävien energijärjestelmien suunnittelussa elinkaarinäkökulma on erityisen olennainen, minkä vuoksi sitä tarkastellaan seuraavaksi hieman muita näkökulmia laajemmin. Kuvassa 8 esitetään elinkaariajattelun peruseriaate sekä energia-, materiaali- ja kierrätysvirtojen linkittyminen toisiinsa.



Kuva 8 Elinkaariajattelun peruseriaate (a), materiaali- ja energiavirtojen elinkaaren kiertokulku (b). Oranssilla esitetään vaiheita, jotka huomioidaan sitoutuneen energian laskennassa. Sinisellä esitetään loppuenergian energiaketjua. (Muokattu: Forsström ym. 2011).

Yllä olevasta kuvasta huomataan, että erilaisilla elinkaarellisilla taserajoilla voidaan määrittää, mitkä osat tuotoksen elinkaaresta sisällytetään analyysiin. Voidaan esimerkiksi päätätä, että vain tuotoksen käytönaikainen energiantarve huomioidaan, tai vaihtoehtoisesti huomioidaan myös tuotokseen sen elinkaarensa aikana sitoutunut energia. Myös materiaalien- sekä energiankierrätyksen myönteinen vaikutus on mahdollista huomioida tai jättää huomiomatta. (Forsström ym. 2011.) Yllä esitetty analyysiperiaate tunnetaan yleisemmin elinkaariarviointina, jonka tuloksena saadaan LCA-indikaattoreita. LCA-indikaattoreita on käytetty useissa edistyksellisiä energijärjestelmiä koskevissa tutkimuksissa, ja on myös esitetty, että LCA-indikaattorit soveltuisivat paremmin kuvastamaan energijärjestelmän kokonaisvaltaisia ympäristövaikutuksia kuin yleiset, pelkästään primäärienergiäsäästöä mittaavat PES-indikaattorit. (Mancarella 2014.) Viholainen ym. (2016) toteavat LCA-indikaattorien soveltuvan hyvin myös alueellisiin energia-analyyseihin. Alueellisissa energia-analyyseissä sovelletut ympäristöystävällisyyden indikaattorit tyypillisesti mittaavat CO<sub>2</sub>-päästöjen määrää, mutta ympäristövaikutuksien laajuuden (paikallinen–globaali) ja luonteen (ilmastoa lämmitävä vaikutus vai muut ympäristövaikutukset) huomioiminen sekä muiden päästöjen mittaaminen (esimerkiksi CO-, NO<sub>x</sub>- ja hiukkaspäästöt) on harvinaisempaa (Lund 2008; Mancarella 2014).

Elinkaarianalyysin lisäksi monia muitakin konsepteja, kuten emergian (engl. *emergy*) käsitettä, on ehdotettu energijärjestelmien ympäristöystävällisyyden arviointiin ja vastaavien indikaattorien johtamiseen, mutta kyseiset konseptit eivät ole vakiintuneita (Brown & Ulgiati 2004; Mancarella 2014). Tiettyjen ehtojen vallitessa energiatehokkuusindikaattorien perusteella voidaan suoraan arvioida myös energijärjestelmän ympäristöystävällisyyttä (Mancarella 2014), mutta esimerkiksi Lund (2008) osoittaa, että energiatehokkuus- ja ympäristöystävällisyysindikaattorit voivat olla jopa käänteisesti verrannollisia keskenään. Energijärjestelmän ympäristövaikutuksia on mahdollista ja usein myös suotavaa tarkastella indikaattorien ohella erillisillä mallintamistyökaluilla, joilla voidaan suorittaa esimerkiksi saasteen levintäalueanalyysi (Mancarella 2014). Taulukkoon 1 on kirjallisuustutkimukseen pohjautuen (ks. esim. Forsström ym. 2011; Østergaard 2015) koottu energijärjestelmän suorituskyvyn ja kestävyuden analysoinnissa yleisiä indikaattoreita kuitenkin huomauttaen, että erilaisia energijärjestelmän suorituskykyindikaattoreita voidaan johtaa lähes lukemattomasti. Indikaattorien yhteydessä ei esitetä kaavoja, koska ne riippuvat esimerkiksi analyysin taserajavalinnoista.

*Taulukko 1 Alueellisen energiajärjestelmän suorituskyvyn ja kestävyuden analysoinnissa hyödyllisiä indikaattoreita sekä niiden tyypillinen tavoitteenasettelu.*

| Indikaattori [tavoite]  | Yksikkö   | Lyhyt kuvaus  |
|---|---|---|
| Energiantarve [MIN]   | <i>MWh</i>  | Alueen sekundäärienergiantarve (sektoreittain)  |
| Primäärienergiakulutus [MIN]  | <i>MWh</i>  | Alueen energihuollon primäärienergiakulutus   |
| Huipputehontarve [MIN]  | <i>MW</i>   | Alueen energian huipputehontarve (sektoreittain)  |
| Energiantensiivisyys [MIN] (EUI)  | $\frac{MWh \text{ tai } MW}{m^2 \text{ tai } hlö \text{ tai } €}$ | Alueen energiantarve valittua kysyntäindikaattoria kohden (esimerkiksi asuinpinta-alaa kohden)  |
| Hiilidioksidiekvivalentit päästöt [MIN] ( <i>suorat, epäsuorat tai elinkaariperusteiset</i> ) | <i>CO<sub>2</sub>e</i>  | Alueen energihuollosta syntyvät kasvihuonekaasupäästöt yhteismitallistettuna perustuen CO <sub>2</sub> :n ilmastoalämmittävään vaikutukseen                 |
| Ominaispäästöt (hiilidioksidiekvivalentteina) [MIN]   | <i>CO<sub>2</sub>e/MWh</i>  | Alueen hiilidioksidiekvivalentit päästöt (edellinen) alueen sekundäärienergiantarvetta kohden. Kutsutaan myös tuotetun energian <i>hiilijalanjäljeksi</i> . |
| Alkuinvestointikustannus [MIN]  | €   | Alueen energiajärjestelmän alkuinvestointikustannus (tuotanto, jakelu, varastointi, ICT)  |
| Elinkaarikustannukset [MIN]   | €   | Alueen energiajärjestelmän alkuinvestointi-, käyttö- ja huolto- sekä kierrätys-/hävityskustannukset   |
| LCOE [MIN]  | €/MWh   | Alueen energiajärjestelmän elinkaarikustannukset tuotettua hyödyllistä energiaa kohden  |
| Takaisinmaksuaika [MIN]   | <i>a</i>  | Alkuinvestoinnin takaisinmaksuaika  |
| Energian omavaraisuusaste [MAX]   | %   | Alueella omavaraisesti tuotetun ja itse hyödynnetyn energian osuus alueen energiantarpeesta   |
| Ylimäärätuotannon osuus [MIN]   | %   | Alueella tuotetun mutta itse hyödyntämättömän energian suhde alueella tuotettuun energiaan  |
| Uusiutuvan energian osuus [MAX]   | %   | Uusiutuvan energiantuotannon osuus alueen energiantuotannosta   |
| Biomassan osuus uusiutuvasta energiasta [MIN]   | %   | Biomassan energiakäytön osuus alueen uusiutuvasta energiantuotannosta   |
| Uusiutuvan energian itsekäyttöaste [MAX]  | %   | Alueen uusiutuvan energiantuotannon itse hyödynnettävä osuus  |
| Hyödyntämättömän hukkalämmön määrä tai osuus [MIN]  | <i>MWh tai %</i>  | Alueen prosesseissa muodostuvien hukkalämpöjen hyödyntämätön määrä tai osuus  |
| Jätteenpoltoaste [MIN] (kierrätys ja uusiokäyttö ensisijaisia)                                | %   | Alueella tuotetun jätteen energiakäyttö tuotettua jätemäärää kohden   |
| EROEI [MAX]   | –   | Alueen energiantuotantoteknologioiden tuottama hyödyllinen energia jaettuna niiden valmistamiseen sitoutuneella energialla                                  |
| ESOEI [MAX]   | –   | Alueen energiavarastoihin varastoitu energia jaettuna niiden valmistamiseen sitoutuneella energialla  |
| Joustavuusindikaattori [MAX]  | –   | Esim. alueen energiantarpeen ja uusiutuvan energian samanaikaisuus, kysyntäjoustokapasiteetti, varastointikapasiteetin ja energiantarpeen suhde jne.        |
| Energia- ja eksergiatehokkuus [MAX]   | –   | Alueen energiajärjestelmän kokonaisenergia- tai eksergiatehokkuus   |

Monet taulukossa 1 esitetyistä alueellisen energiajärjestelmän (ks. luku 3.2.1) suorituskykyindikaattoreista mittaavat alueen energia- tai ympäristötehokkuutta edustaen energianäkökulma edellä tehtävää aluesuunnittelua (engl. *energy-driven urban design*). Alueiden suunnittelussa on kuitenkin energianäkökulman lisäksi paljon muitakin tärkeitä huomioitavia näkökulmia sekä myös epäsuoralla tavalla energia- tai ympäristötehokkuuteen vaikuttavia asioita. Esimerkiksi alueen viihtyisyys ja turvallisuus ovat asioita, jotka eivät välttämättä edes epäsuorasti liity alueen energiatehokkuuteen, mutta ovat kuitenkin erittäin tärkeitä aluesuunnittelun näkökulmia, jotka voidaan valita energiatehokkuusindikaattorien ohella alueen suorituskyvyn indikaattoreiksi. Esimerkkejä epäsuorasti energia- ja ympäristötehokkuuteen vaikuttavista asioista ovat puolestaan alueen asukastiheys, näkymätekijä ja käveltävyys. Vaikka nämä asiat eivät suoraan mittaa alueen energiatehokkuutta, ne ovat siihen kuitenkin merkittävästi välillisesti kytköksissä, ja myös ne voidaan valita indikaattoreiksi alueen suorituskyvyn arvioinnissa. (Shi ym. 2017.) Esimerkiksi Shi ym. (2017) esittävät kattavan listauksen alueen energiatehokkuuteen epäsuorasti vaikuttavista aluesuunnittelun indikaattoreista.

Mitä suurempaa kokonaisuutta energia-analyysi koskee, sitä enemmän tulisi kiinnittää huomiota myös mahdollisiin ulkoisiin haittavaikutuksiin (engl. *externality*) ja rebound-vaikutukseen (engl. *rebound effect*). Jos ulkoiset haittavaikutukset eli ulkoiskustannukset otetaan mukaan kustannus-hyöty-analyysiin, merkittävästi suuremmat investointikustannukset ympäristöystävällisiin energiajärjestelmiin ovat perusteltuja. (Forsström ym. 2011.) Alueellisen energiajärjestelmän suorituskyvyn mittaamisessa on aina myös huomioitava, että alueellisella taserajalla saavutettu suorituskyvyn parantuminen voi tietyissä tilanteissa (esimerkiksi tehottomassa päästökauppajärjestelmässä) johtaa suorituskyvyn heikentymiseen laajemmalla taserajalla (Pasanen ym. 2013). Alueellisissa energia-analyyseissä tulisi käyttää energiavirtojen keskiarvoisten staattisten päästökertoimien sijasta ajan funktiona muuttuvia päästökertoimia eli *dynaamisia päästökertoimia*. Dynaamisilla päästökertoimilla voidaan huomioida esimerkiksi kaksisuuntaisissa energiaverkoissa loppukäyttäjien energiankulutuksen ja energian verkkoon myymisen ajanhetkien toisistaan mahdollisesti eroavat ympäristövaikutusten suuruudet. Tämä johtuu siitä, että eri ajanhetkillä energiajärjestelmän *marginaalituotanto* ja siten myös sen energiavirtojen *marginaalipäästökertoimet* vaihtelevat. (Alanne ym. 2010; Pasanen ym. 2013.)

## 3.2 Edistykselliset alueelliset energiajärjestelmät

### 3.2.1 Alueellisen energiajärjestelmän määritelmä

Suomenkielinen termi alueellinen energiajärjestelmä ei ole vakiintunut käsite, ja siten sille ei ole myöskään vakiintunutta määritelmää. Alueellisella energiajärjestelmällä voidaan tarkoittaa esimerkiksi täysin omavaraista alueen energiahuollon hoitavaa järjestelmää tai toisaalta vain jossain määrin itsenäistä kokonaisuutta osana laajempaa hajautettua tai keskitettyä energiajärjestelmää – tai mitä tahansa näiden väliltä. Periaatteessa alueellisen energiajärjestelmän primäärienergiana voi toimia mikä tai mitkä tahansa energialähteet. Uusimmissa tieteellisissä julkaisuissa alueelliset energiajärjestelmät (engl. *regional energy system, district energy system, urban energy system*) yleensä assosioidaan kuitenkin pääosin uusiutuvia ja vähäpäästöisiä energialähteitä hyödyntäviksi valtaverkosta irrotettavissa oleviksi itsenäisiksi ja älykkäiksi kokonaisuuksiksi (ks. esim. Lund 2014; Mancarella 2014; Viholainen ym. 2016). Yksi syy tähän voi olla se, että alueellisen energiajärjestelmän käsitteeseen usein sisällytetään merkittävä alueellinen energiaomavaraisuus, joka ei ole aiemmin mainitusti mahdollista suurimassa osassa maailmaa ilman uusiutuvaa energiaa ja edistyksellisiä energiajär-

jestelmiä. Huomionarvoista kuitenkin on, että tutkimuksissa käytetään useita eriäviä ja osittain merkitykseltään päällekkäisiäkin käsitteitä kuvaamaan alueellisia energijärjestelmiä ja niihin liittyviä asioita. Tämä käsitteiden vakiintumattomuus ja vaihtelevuus johtune siitä, että vasta 2000-luvulla hajautettuihin ja uusiutuviin energiantuotantotapoihin perustuvat energijärjestelmät – ja ylipäätään vähähiilisyys sekä kestävään kehitykseen tähtäävät energijärjestelmät – ovat herättäneet kaupallista mielenkiintoa, mikä on johtanut nopeaan aihetta koskevan tieteellisen tutkimuksen lisääntymiseen (Krog & Sperling 2019; Samarasinghe ym. 2019; Verbong & Geels 2007). Seuraavaksi esitetään lyhyt katsaus 2000-luvun aikana tapahtuneesta edistyksellisten energijärjestelmien käsitteiden ja konseptien kehityksestä sekä nykytilasta, johon pohjautuen määritellään alueellinen energijärjestelmä. Edistyksellisiä energijärjestelmiä koskevien käsitteiden ja konseptien yhteydessä esitetään valituilta osin myös niihin liitettyjä tärkeimpiä hyötyjä ja edellytyksiä sekä Suomen tilanne kyseisten konseptien toimeenpanossa.

Lasseter (2002) esitti *mikroverkkojen* konseptin (engl. *microgrids*) sen nykyistä vastaavassa merkityksessä. Hän määritteli mikroverkon olevan maantieteellisesti rajattu pienehkö itsenäinen energijärjestelmä, joka palvelee alueensa energiakuormia hyödyntämällä hajautettuja pienen kokoluokan energiantuotantotapoja ja hukkaenergiavirtoja. Mikroverkko muodostaa Lasseterin määritelmän mukaan siis yhtenäisen ja itsenäisesti ohjattavissa olevan kokonaisuuden. Mikroverkko on normaalissa tilassa kytkettynä valtakunnalliseen energiaverkkoon, jolloin energiaa voidaan siirtää mikroverkon ja valtakunnallisen energiaverkon välillä. Tällöin paikallisesti tuotettu ylimääräinen energia voidaan hyödyntää syöttämällä se valtakunnalliseen verkkoon (energian myynti), ja päinvastoin energiaa voidaan myös syöttää valtakunnallisesta verkosta mikroverkkoon (energian osto), silloin kun paikallinen energiantuotanto ei riitä kattamaan alueen energiantarvetta. Jos valtakunnalliseen verkkoon tulee energiakatkos, mikroverkko siirtyy saareketilaan (engl. *islanding*) välttämättä energiakatkoksen. Saareketilaan siirtymisen mahdollisuus lisää paikallisen energihuollon luotettavuutta, mitä pidetään yhtenä mikroverkon tärkeimmistä hyödyistä verrattuna perinteiseen energijärjestelmään. (Lasseter & Piagi 2004; Romankiewicz ym. 2013.) Muita mikroverkkoihin yleisesti liitettyjä hyötyjä ovat esimerkiksi energiatehokkuus, itsenäisyys, joustavuus, skaalautuvuus (modulaarisuus) ja vakaus (Lasseter 2002; Romankiewicz ym. 2013).

Mikroverkon konsepti on kehittynyt 2000-luvun aikana, mikä on johtanut uusien laajempien konseptien syntyyn. Muun muassa Farhangi (2010) ja Fang ym. (2012) esittävät, kuinka mikroverkot voidaan mieltää kuuluvan osaksi älykkäitä sähköverkkoja (engl. *Smart Grids*). Älykäs sähköverkko kykenee vaikuttamaan sähköntuotannon lisäksi reaaliaikaisesti myös sähkönkysyntään kaksisuuntaisen sähköverkon, kattavan automaatioteknologian ja sähköverkon sisäisen viestintä- ja mittarointiteknologian avulla (ts. kattavan *ICT-infrastruktuurin* avulla). Älykäs sähköverkko kykenee myös paikallistamaan ja korjaamaan verkon vikatapahtuman automaattisesti (engl. *self-healing*) erilaisten vikatapahtumaprotokollien avulla ja voi jopa ennustaa vikatapahtumia. Älykkään sähköverkon käyttäjät eivät ole vain passiivisia kuluttajia vaan niin kutsuttuja *tuluttajia*, eli he osallistuvat sähköverkon tasapainottamiseen aktiivisesti ja automaattisesti kysynnän joustamisen ja/tai paikallisen energiantuotannon avulla. Näin ollen älykkäissä sähköverkoissa sähköntuotanto, -jakelu ja varastointi sekä kysyntä ovat jatkuvassa vuorovaikutuksessa keskenään toimien yhtenä kokonaisuutena optimaalisella tavalla. Älykkään sähköverkon pääkomponentteja ovat tuotantopuolen automaatiojärjestelmät, älykkäät mittarointi- (engl. *smart metering*) ja viestintäjärjestelmät, kaksisuuntaisen sähköverkon sekä eri tason toimijat (esimerkiksi jakeluverkko-operaattorit ja *aggregaattorit*). Älykkäisiin sähköverkkoihin siirtyminen ei välttämättä vaadi täysinmittaista

sähkönjakelujärjestelmän kertaluonteista uusimista, vaan se voidaan – ja on perustelluinta – tehdä asteittain. Tämän mahdollistaisi älykkään sähköverkon liitettävyyden nykyiseen sähköverkkoon sekä sen komponenttien, kuten mikroverkkojen, modulaarisuus. Älykäs sähköverkko voisi siis rakentua vähitellen nykyisen sähköverkon rinnalle, niin että sitä sovellettaisiin ensin uudisalueilla, jotka puolestaan olisivat vuorovaikutuksessa nykyisen sähköverkon kanssa jakeluasemien välityksellä. Älykäs sähköverkko voisi sen jälkeen laajentua vie-reisille alueille hyödyntäen modulaarisuutta. Älykäs sähköverkko myös mahdollistaa aiemmin mainitut virtuaaliset voimalaitokset. (Fang ym. 2012; Farhangi 2010.) Taulukossa 2 esitetään perinteisen sähköverkon ja älykkään sähköverkon keskeisimmät erot. Taulukkoon 3 on koottu tärkeimpiä älykkäiden sähköverkkojen hyötyjä luokiteltuna hyötyvien osapuolten sekä hyödyn laadun mukaan. Taulukon 3 luokittelua tulisi tulkita enemmänkin suuntaa antavana kuin ehdottoman rajaavana.

*Taulukko 2 Älykkään sähköverkon ja perinteisen sähköverkon keskeisimmät erot (Fang ym. 2012).*

| Perinteinen sähköverkko                    | Älykäs sähköverkko                                       |
|--|--|
| Sähkömekaaninen                            | Digitaalinen   |
| Yksisuuntainen                             | Kaksisuuntainen  |
| Vain keskitetty tuotanto                   | Hajautettu tuotanto ja keskitetty tuotanto               |
| Suppea mittarointi                         | Kattava älykäs mittarointi                               |
| Manuaalinen valvonta                       | Automaattinen valvonta                                   |
| Altis vioille ja suurille sähkökatkoksille | Mukautuva ja saarekkeista koostuva sekä itseään korjaava |
| Rajoitettu ohjausmahdollisuus              | Kattava ohjausmahdollisuus                               |
| Käyttäjillä vähän vaikutusvaltaa           | Käyttäjillä paljon vaikutusvaltaa                        |

*Taulukko 3 Älykkään sähköverkon tärkeimmät hyödyt ja hyötyvät osapuolet (Romankiewicz ym. 2013).*

| Hyödyn laatu               | Hyöty   | Käyttäjä | Energia-yhtiö | Yhteis-kunta |
|----------------------------|---|----------|---------------|--------------|
| Taloudellinen <sup>a</sup> | Sähkön halpeneminen ja polttoainekustannusten pieneminen                                    | X        |               |              |
| Taloudellinen <sup>a</sup> | Ylimääräenergian myyntimahdollisuus   | X        | X             |              |
| Taloudellinen <sup>a</sup> | Osallistumismahdollisuus kysyntäjoustomarkkinoille  | X        | X             |              |
| Taloudellinen <sup>b</sup> | Energiaverkon ruuhkautumisen väheneminen  |          | X             | X            |
| Taloudellinen <sup>b</sup> | Energianjakelun häviöiden pieneminen  |          | X             | X            |
| Taloudellinen <sup>b</sup> | Tehoreservin tarpeen väheneminen  |          | X             |              |
| Luotettavuus               | Paikallisenergiakatkosten väheneminen   | X        |               |              |
| Luotettavuus               | Parempi uudelleenkäynnistämisen kyky (engl. <i>potential for black-start capabilities</i> ) |          | X             | X            |
| Laatu                      | Parempi sähköverkon reaktiivisen tehon ja jännitteen hallintamahdollisuus                   | X        | X             |              |
| Ympäristö                  | Uusiutuvien energialähteiden lisääntyvä hyödyntämismahdollisuus                             |          | X             | X            |
| Ympäristö                  | SO <sub>2</sub> -, NO <sub>x</sub> - ja CO <sub>2</sub> -päästöjen väheneminen              |          | X             | X            |
| Turvallisuus               | Laajojen ja pitkäkestoisten energiakatkosten välttäminen                                    | X        | X             | X            |

<sup>a</sup> suora hyöty – käyttäjä tai energiayhtiö voi saavuttaa suoria rahallisia säästöjä tai lisätuloja

<sup>b</sup> epäsuora hyöty – käyttäjä tai energiayhtiö voi saavuttaa välillisiä rahallisia hyötyjä

Älykkäiden sähköverkkojen rakentaminen on teknisessä mielessä nykyään mahdollista, mutta niiden toimintavarmuutta ja kustannustehokkuutta pitää vielä demonstroida laaja-alaisen yleistymisen toteutumiseksi. Esimerkkikohteiden vähyys ja tiedon puute (tai sen saatavuuden hankaluus) sekä älykkäitä sähköverkkoja koskevien standardien puute ovat merkittäviä esteitä älykkäiden sähköverkkojen yleistymiselle. Älykkään sähköverkon investointikustannuksien voidaan arvioida olevan 10–30 % suuremmat perinteiseen sähköverkkoon verrattuna riippuen älykkyyden määrästä, mutta elinkaarikustannuksissa mitattuna älykkäällä sähköverkolla on potentiaalia olla moninkertaisesti perinteistä sähköverkkoa edullisempi monen muun hyödyn ohella. (Kainulainen 2015.) Viime vuosien aikana useissa Pohjoismaissa on otettu käyttöön sähkön vähittäismarkkinoiden keskitetty tiedonvaihtojärjestelmä Datahub, joka mahdollistaa kaikkien sähkönkäyttäjien tietojen keskitetyn kontrolloimisen ja siten myös älykkäiden sähköverkkojen yleistymisen (Blomqvist ym. 2017). Suomessa järjestelmä otetaan käyttöön vuonna 2021 (Arffman ym. 2019). Uuden sukupolven älykkäät sähkömittarit (AMS) massa-asennetaan Suomeen 2020-luvun puolessa välissä, kun 2010-luvun alussa asennettujen etäluettavien mittarien (AMR) käyttöikä täyttyy (Niinikoski 2018; Pahkala ym. 2018). Työ- ja elinkeinoministeriön näkemyksen mukaan älykkäät sähköverkot yleistyvät Suomessa merkittävästi seuraavan kymmenen vuoden aikana (Pahkala ym. 2018). Suomessa onkin jo useampia älykkäisiin sähköverkkoihin liittyviä hankkeita toiminnassa, suunnitteilla ja valmisteilla, kuten esimerkiksi Kalasatama Smart Grid Helsingissä ja FLEXe DEMO -projekti Ahvenanmaalla (Blomqvist ym. 2017; Lindqvist ym. 2019). Useissa Euroopan maissa on suunnitteilla tai toteutuksessa vielä huomattavasti enemmän älykkäisiin sähköverkkoihin liittyviä demonstraatio- ja kehitysprojekteja (Blomqvist ym. 2017). Älykkäissä sähköverkoissa myös *älykotien* rooli korostuu, jos ja kun tavoitellaan yhä kokonaisvaltaisempaa energijärjestelmän älykkyyttä ja joustavuutta (Kainulainen 2015; Niinikoski 2018). Älykotien rakentaminen on nykyään teknisesti jo varsin triviaalia (ks. esim. Kettunen 2019; Kuronen 2017; Nousiainen 2017) ja kaupallistettua toimintaa (ks. esim. Haanpää 2015; OptiWatti 2019; Siemens 2019). Sen lisäksi, että älykodeilla on mahdollista lisätä energijärjestelmän joustavuutta, niillä on myös merkittävä suora energiansäästöpotentiaali (Reinisch ym. 2011). Tämän potentiaalın saavuttamista ei kuitenkaan tule pitää itsestäänselvyysnä, sillä asuntojen käyttöön liittyy vahvoja sosiaalisia ilmiöitä (Hargreaves ym. 2018; Keirstead & Shah 2013). Mitä vähemmän älykodit vaativat asukkailta aktiivista toimintaa ja aiheuttavat häiriötä asukkaiden elämään – kuitenkin aiheuttamatta kontrollin tunteen häviämistä – sitä paremmin älykotien suora energiansäästöpotentiaali ja energijärjestelmää tukeva vaikutus todennäköisesti saavutetaan (Hargreaves ym. 2018; Reinisch ym. 2011).

On syytä huomioida, että myös mikroverkon käsitettä on käytetty kirjallisuudessa kuvaamaan älykkään sähköverkon kaltaista järjestelmää ilman selvää erottelua näiden välillä. Joissakin yhteyksissä mainitaan myös käsite älykäs mikroverkko (engl. *smart microgrid*). Mikroverkon ja älykkään sähköverkon määritelmät eivät siis ole toisistaan täysin erillisiä. Kummatkin käsitteet ovat lisäksi kehittyneet 2000-luvun edetessä, joten niiden määritelmät riippuvat siitä, milloin ja missä kontekstissa niitä on käsitelty.

Erittäin pitkien välimatkojen, kuten mannertenväliseen, sähkönsiirtoon on kaavailtu niin kutsuttuja superverkkoja (engl. *supergrids*). Superverkolla tarkoitetaan vahvaa ja suurjännitetasavirralla (HVDC) operoivaa sähkönsiirtoverkkoa, jolla voidaan siirtää esimerkiksi kaukana ulkomerellä tuulivoimalla tuotettua sähköä pienihäviöisesti ja suurella siirtokapasiteetilla mantereelle (jossa superverkot yhdistyisivät mantereella sijaitseviin älyverkkoihin). On myös esitetty käsite superälykäs sähköverkko (engl. *SuperSmart Grid*), jolla tarkoitetaan



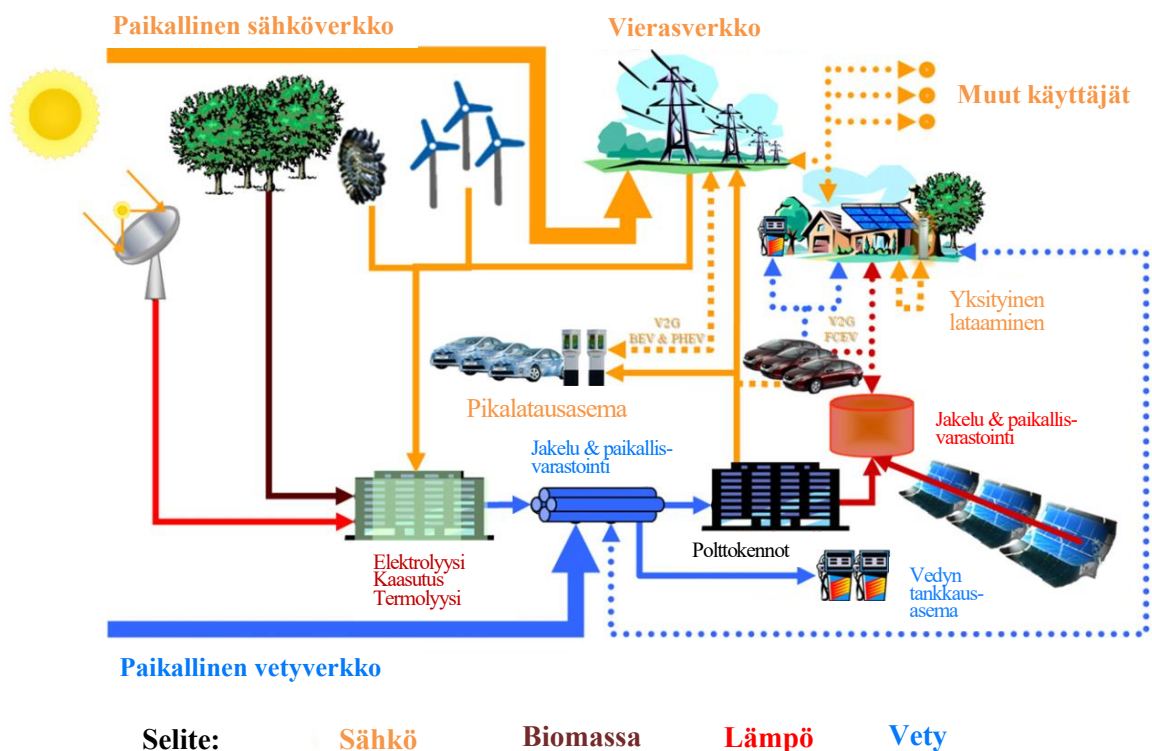
mannertenvälistä yhtenäistä sähköverkkoa, jossa yhdistyy sekä superverkkojen että älyverkkojen ominaisuudet. (Lund ym. 2015.) Lisäksi on esitetty käsitteet älykäs sähköverkko 2.0 ja 3.0 (engl. *Smart Grid 2.0/3.0*), joilla tarkoitetaan yleensä yhä älykkäämpiä ja laajemmin integroituja sähköverkkoja, mutta näiden käsitteiden käyttö ei ole varsinkaan tieteellisessä kirjallisuudessa yleistä. On myös visioitu eräänlaisesta energiajärjestelmien lopullisesta kehitysteestä, millä tarkoitetaan kokonaisvaltaisesti tekoälyä, itseoppimista ja automaatiota hyödyntävää pilvipohjaista energiajärjestelmää eli energian neuroverkkoa (engl. *Neural Grid*), joka sisältäisi myös lukuisia energiaan liittymättömiä palveluja (Elberg & Lawrence 2018). Alanne & Cao (2019) puolestaan esittävät idean kaikkialla läsnä olevaan eli ubiikkiin energiaan (engl. *ubiquitous energy*) perustuvasta osittain johdotonta sähkönsiirtoa ja energiankeruuta (engl. *energy harvesting*) hyödyntävästä dynaamisesta energiajärjestelmästä. Näihin konsepteihin ei kuitenkaan tässä syvennytä tarkemmin niiden visiomaisen luonteen takia, mutta esimerkiksi energian neuroverkot ja ubiikkiin energiaan perustuvat energiajärjestelmät kuvastavat hyvin sitä, että perinteinen energiajärjestelmä ei ole nyky-yhteiskunnassa eikä varsinkaan tulevaisuudessa ainut vaihtoehto energiavirtojen hallitun kontrolloimisen toteuttamiseen.

Nykyään toteutuskelpoisista energiajärjestelmäkonsepteista edistyksellisintä edustaa Orecchinin & Santiangelin (2011) esittämä<sup>2</sup> älykkäiden energiaverkkojen konsepti (engl. *Intelligent Energy Networks*), joka voidaan tulkita sektoraaliseksi laajennukseksi älykkäille sähköverkoille. Älykkäät sähköverkot eivät ota huomioon kaikkia energiavektoreita toisin kuin älykkäät energiaverkot, jotka integroivat älykkäällä ja optimaalisella tavalla kaikki hyödynnettävissä olevat energiavektorit täyttääkseen alueen energiantarpeen huomioiden tarvittavan energian määrän, muodon ja laadun. Tähän kuuluu esimerkiksi sähkö- ja lämpösektorien integroiminen sekä vedyn (tai muun kaasun) huomioiminen yhdeksi integroitavaksi energiavektoriksi. Muilta osin älykkäiden energiaverkkojen konsepti vastaa älykkäiden sähköverkkojen konseptia. Älykkäät energiaverkot voidaan mieltää siis älykkäiden sähköverkkojen ja integroidun energiajärjestelmän yhdistelmäksi, jossa älykkyys on läsnä kaikissa energiaverkoissa sekä niiden välisessä vuorovaikutuksessa optimaalisen systeemitason suorituskyvyn saavuttamiseksi. Älykkäät energiaverkot mahdollistavat energiavirtojen kokonaisvaltaisella hallinnalla älykkäitä sähköverkkoja paremman energia- ja ympäristötehokkuuden. Älykkäiden energiaverkkojen operointi on kuitenkin älykkäitä sähköverkkoja monimutkaisempaa usean integroitavan energiavektorin tuoman monimutkaisuuden takia. (Orecchini & Santiangeli 2011.) Älykkäiden energiaverkkojen ohjauksen keskeisimpiä vaihtoehtoisia periaatteita ovat esimerkiksi reaaliaikainen (engl. *real-time control*) tai vuorokausiohjaus (engl. *day-ahead control/scheduling*), keskitetty (engl. *centralized control*) tai hajautettu ohjaus (engl. *decentralized/distributed control*) sekä uusiutuvan energian tuotantopotentiaalın ja energiankulutuksen ennustuksia hyödyntävä (engl. *forecasting control*) tai hyödyntämätön ohjaus (ks. esim. Kolen ym. 2017; Müller ym. 2015). Reynolds ym. (2017) käsittelevät kattavasti älykkäiden energiaverkkojen aluetason ohjausstrategioita tuoden esille seuraavat lähestymistavat: tuluttajien sisäisiin energiamaarkkinoihin perustuva ohjaus (engl. *internal energy markets*), keskitetty suora ohjaus, ohjeistava ohjaus (engl. *intelligence update*) ja iteratiivinen ohjaus (engl. *demand response coordinator*). Edellä mainituissa ohjausstrategioissa energiajärjestelmän optimaalinen operointitapa voidaan määrittää lukuisilla menetelmillä, kuten esimerkiksi malliprediktiiivisellä optimointimenetelmiä hyödyntävällä säädöllä (engl.

<sup>2</sup> Vastaavia konsepteja on esitetty kirjallisuudessa laajasti mutta toisistaan eriävillä terminologioilla ja siten mahdollisesti myös Orecchinia & Santiangelia (2011) aikaisemmin. Sama huomio pätee myös muihin tässä luvussa esitettyihin energiajärjestelmäkonsepteihin.

*model predictive control*) tai sumeaa logiikkaa ja neuroverkkoja hyödyntävällä tekoälyälydöllä (engl. *neuro fuzzy logic*) (Orecchini & Santiangeli 2011; Reynolds ym. 2017). On huomioitava, että vaikka suoraviivaisin tapa älykkäiden energiaverkkojen ohjaukseen olisi nykyisessäkin energiajärjestelmässä käytettävä hintaohjautuva vuorokausiohjaus, niin reaaliaikaisemmilla ohjausstrategioilla voidaan saavuttaa vuorokausiohjaukseen verrattuna huomattavia energiajärjestelmän suorituskykyparannuksia (Reynolds ym. 2017). Älykkäiden energiaverkkojen ohjaukseen on jo olemassa kaupallisia ohjausratkaisuja, ja uusia kaupallisia ohjausratkaisuja kehitetään jatkuvasti (Rinne ym. 2018).

On syytä mainita, että mikroverkkoja ja älykästä sähköverkkoja vastaavasti myös älykkäiden energiaverkkojen määritelmä riippuu siitä, milloin ja missä kontekstissa käsitettä on käytetty. Englanninkielisellä *smart grids* -käsitteellä voidaan tarkoittaa älykkäiden sähköverkkojen lisäksi myös älykkäitä energiaverkkoja. Kuvassa 9 havainnollistetaan älykkäiden energiaverkkojen toimintaa ja vuorovaikutussuhteita illustratiivisella tavalla.



Kuva 9 Havainnollistava esitys älykkäiden energiaverkkojen konseptista (muokattu: Orecchini & Santiangeli 2011).

Niemi ym. (2012) kutsuvat älykkäitä energiaverkkoja monienergiajärjestelmäksi<sup>3</sup>, joka onkin uusimmassa kirjallisuudessa tyypillisesti käytetty käsite älykkäiden energiaverkkojen kaltaiseen energiajärjestelmään viitattaessa. Heidän määritelmänsä mukaan monienergiajärjestelmä on automaattisesti itseään optimoiva monitasoinen (ts. monta eri energiaverkkoja) ja integroitu energiajärjestelmä, joka kykenee täyttämään palvelualueensa energiantarpeen mahdollisimman energia- ja ympäristötehokkaalla tavalla. Niemen ym. käyttämä moniener-

<sup>3</sup> Monienergiajärjestelmästä voidaan käyttää myös käsitettä hybridienenergiajärjestelmä. Englanniksi vastaavat käsitteet ovat *multi-energy system (MES)* / *multi-carrier energy system* ja *hybrid energy system*.

giajärjestelmän määritelmä ei siis juurikaan eroa edellä esitetystä älykkäiden energiaverkkojen määritelmästä. Niemen ym. mukaan tällaisella älykkäällä monienergiajärjestelmällä voidaan merkittävästi lisätä uusiutuvaa energiaa: tutkimuksen mukaan älykkäiden sähkö- ja lämpöverkkojen integroiminen mahdollistaisi tuulivoiman osuuden olevan jopa yli 70 % Helsingin sähköntuotannosta. Tutkimuksessa todetaan, että pohjoisella alueella sijaitsevassa keskisuudessa kaupungissa älykkäiden sähkö- ja lämpöverkkojen integroimisella mahdollistetaan 40–200 %:n tuulivoimakapasiteetin lisäys verrattuna pelkästään älykkääseen sähköverkkoon perustuvaan energiajärjestelmään. Niemi ym. tutkivat vain sähkö- ja lämpösektorin integroimista, koska pohjoisissa kaupunkiympäristöissä heidän mukaansa tyypillisimmät energianmuunnosprosessit ovat polttoaineesta sähköksi (esim. lauhdevoimala) ja sähköstä lämmöksi tai kylmäksi (esim. lämpöpumput). Sähkön muuntaminen kaasuksi (esim. käänteinen polttokenno) on uusi potentiaalinen teknologia, joka lisäisi vaihtelevan uusiutuvan energian hyödyntämismahdollisuuksia, mutta sähkö- ja kaasusektorin integroimisen teknistaloudellinen potentiaali on vielä kiisteltyä (Böing & Regett 2019; Niemi ym. 2012).

Lukuisia muitakin käsitteitä on esitetty kuvaamaan älykkäiden energiaverkkojen kaltaista energiajärjestelmää. Esimerkiksi Keirstead & Shah (2013) ja Acha ym. (2018) sisällyttävät integroitujen energiajärjestelmien käsitteeseen älykkäiden energiaverkkojen kaltaiset ominaisuudet. Scheller & Bruckner (2019) puolestaan käyttävät käsitettä integroitu multimodaalinen energiajärjestelmä (engl. *Integrated Multi-Modal Energy System*). Esitettyjen käsitteiden paljoudesta huolimatta niiden määritelmät ovat lähes identtisiä keskenään vastaten pitkälti aiemmin esitettyjä älykkäiden energiaverkkojen ja monienergiajärjestelmän määritelmää. Käsitteiden paljouden takia on myös tehty kattavia kirjallisuuskatsauksia, joissa eri käsitteitä on pyritty kokoamaan ja yhtenäistämään. Esimerkiksi Mancarella (2014) esittää yleiskatsauksen monienergiajärjestelmiä (älykkäiden energiaverkkojen kaltaisia monienergiajärjestelmiä) koskevista tutkimuksista tavoitteenaan yhdenmukaistaa niissä käytetyt käsitteet ja tunnistaa monienergiajärjestelmiä yhdistävät tekijät. Mancarella tunnistaa kirjallisuuskatsauksen pohjalta neljä näkökulmaa, joiden avulla monienergiajärjestelmiä voidaan luonnehtia: alueellinen, verkostollinen, monipalvelullinen ja monikäyttövoimainen. Näillä tarkoitetaan lyhyesti, että monienergiajärjestelmät käyttävät useita energialähteitä tuottamaan useita palveluita integroidulla tavalla, niin että alueiden energiajärjestelmät ovat itsenäisiä mutta viereisten energiajärjestelmien kanssa vuorovaikutukseen kykeneviä kokonaisuuksia. Edistyksellisistä energiajärjestelmistä puhuttaessa näihin näkökulmiin liitetään usein lisäksi älykkyyden ja ympäristöystävällisyyden näkökulmat (ks. esim. Keirstead & Shah 2013; Lund 2014).

Lund (2014) esittää kenties kaikista intuitiivisimman ja yksinkertaisimman käsitteen seuraavan sukupolven edistyksellisistä energiajärjestelmistä: *uusiutuva energiajärjestelmä*. Lund mainitsee erikseen myös käsitteen *älykäs energiajärjestelmä*, joka hänen määritelmänsä mukaan on osa uusiutuvaa energiajärjestelmää. Seuraavan sukupolven edistyksellinen energiajärjestelmä voitaisiinkin määritellä älykkääksi uusiutuvaksi energiajärjestelmäksi, mutta termi älykäs voidaan jättää erikseen mainitsematta, koska uusiutuva energiajärjestelmä on luonnostaan vahvasti kytköksissä älykkääseen energiajärjestelmään.

Edellä esitettyihin käsitteisiin ja konsepteihin pohjautuen tässä työssä suomenkielisellä käsitteellä *alueellinen energiajärjestelmä* tarkoitetaan seuraavaa: valtakunnallisesta energiaverkosta ainakin hetkellisesti irrotettavissa oleva (saareketila) paikallinen energiajärjestelmä, joka pyrkii hyödyntämään paikallisia energialähteitä hajautetuilla tai keskitetyillä tavoilla tai näiden eriasteisilla yhdistelmillä. Alueellinen energiajärjestelmä on määritelty sekä

Kekkonen (2017) että Nissisen (2019) diplomitoissa samankaltaisesti. Alueellista energiajärjestelmää täydennetään käsitteellä *uusiutuva alueellinen energiajärjestelmä*. Uusiutuva alueellinen energiajärjestelmä laajentaa alueellisen energiajärjestelmän käsitettä kattavalla energiavektorien automatisoidun ohjauksen ja integroimisen mahdollisuudella sekä ympäristöystävällisyyden näkökulmalla: uusiutuva alueellinen energiajärjestelmä hyödyntää pääasiallisesti uusiutuvia ja vähäpäästöisiä energialähteitä optimoidulla tavalla (yksittäisten sektorien ja varsinkin koko järjestelmän tasolla) muun muassa energiavektorien integroimisen, kysyntäjouston (ks. luku 3.2.2) ja energian varastoinnin avulla. Uusiutuvaan alueelliseen energiajärjestelmään liittyy keskeisesti myös energiasektorin päätösvallan hajautuminen yksittäisiltä suurilta tuottajilta useille pienemmille tuottajille sekä kuluttajien esteetön mahdollisuus osallistua energiamarkkinoille ja päättää käyttämänsä energian alkuperästä, kuten Lund (2014) esittää. Koska uusiutuva energiajärjestelmä ja kestävä energiajärjestelmä eivät ole kaikissa tilanteissa synonyymejä (Lund 2014), niin lisäksi määritellään vielä erikseen *kestävä alueellinen energiajärjestelmä*, joka vastaa muuten uusiutuvaa alueellista energiajärjestelmää, mutta siinä kestävän kehityksen periaatteet otetaan huomioon kaikilta osin (ks. luku 3.1).

Kaikki edellä esitetyt edistyksellisiä energiajärjestelmiä koskevat käsitteet ja konseptit voidaan mieltää niin kutsuttujen viisaiden kaupunkien (engl. *Smart City*) ja viisaiden yhteisöjen (engl. *Smart Community*) alakäsitteiksi (Mancarella 2014). Viisaiden kaupunkien ja yhteisöjen käsitteet ovat väljiä ja monimerkityksellisiä ylätasoa viitekehyksiä, joiden tarkoitus on ohjata kaikkea kaupunkia ja yhteisöä koskevaa suunnittelua. Niillä tarkoitetaan sellaista suunnittelufilosofiaa, jolla pyritään jatkuvasti parantamaan ihmisten elinlaatua ja samalla vähentämään ympäristölle aiheutuvaa kuormitusta. Viisaiden kaupunkien ja yhteisöjen käsitteet kattavat siis energia- ja ympäristötehokkuuden lisäksi esimerkiksi kaupunkien viihtyisyyden, turvallisuuden ja innostavuuden. (Lindskog 2004; Mustonen ym. 2014.) Näin ollen viisaiden kaupunkien ja yhteisöjen viitekehukset asettavat rakennetulle ympäristölle energia- ja ympäristötehokkuuteen suoraan liittymättömiä vaatimuksia ja rajoitteita, jotka tulisi myös energiajärjestelmien suunnittelussa huomioida (esimerkiksi sivukadun katuvalaistus kuluttaa ”turhaa” energiaa, mutta toisaalta lisää viihtyisyyttä ja turvallisuutta), ja joita myös aiemmin luvussa 3.1.3 tuotiin esille.

### 3.2.2 Uusiutuvan energiajärjestelmän edellytykset

Uusiutuva energia on usein jaksottaista ja vaihtelevaa eli vahvasti ajasta ja paikasta riippuvaa (esimerkiksi tuulivoima ja aurinkoenergia), siis niin kutsuttua *vaihtelevaa uusiutuvaa energiaa*. Tämä johtaa siihen, että uusiutuvalta energiajärjestelmältä vaaditaan paljon joustavuutta. Energiajärjestelmän joustavuudella tarkoitetaan energiantuotannon, -jakelun ja -kysynnän valmiutta kompensoida alueen energiantuotannon ja -kulutuksen spatiotemporaalista vaihtelua. Edistykselliset energiajärjestelmät (esimerkiksi älykkäät ja integroidut energiajärjestelmät) ovat avainasemassa energiajärjestelmien joustavuuden lisäämisessä. (Lund ym. 2015.) Energiajärjestelmän joustavuutta voidaan arvioida energiajärjestelmän muuta suorituskykyä vastaavasti erilaisten indikaattorien avulla (ks. esim. taulukko 1). Joustavuuden indikaattoreissa pätevät pitkälti samat periaatteet, joita tuotiin aiemmin esille energiajärjestelmän muiden suorituskykyindikaattorien yhteydessä (ks. luku 3.1.3). (Lund ym. 2015.)

Kuten aiemmin mainittiin, sähköverkko on erityisen herkkä tuotannon ja kulutuksen ajalliselle eroavaisuudelle, vaikkakin esimerkiksi suuret sähkögeneraattorit luovat sille hieman luontaista joustavuutta. Sähköverkossa on myös tärkeää, varsinkin hienoelektroniikan yleistyttyä, että sähkön jännite ja taajuus pysyvät mahdollisimman tasaisina. (Lasseter 2002;

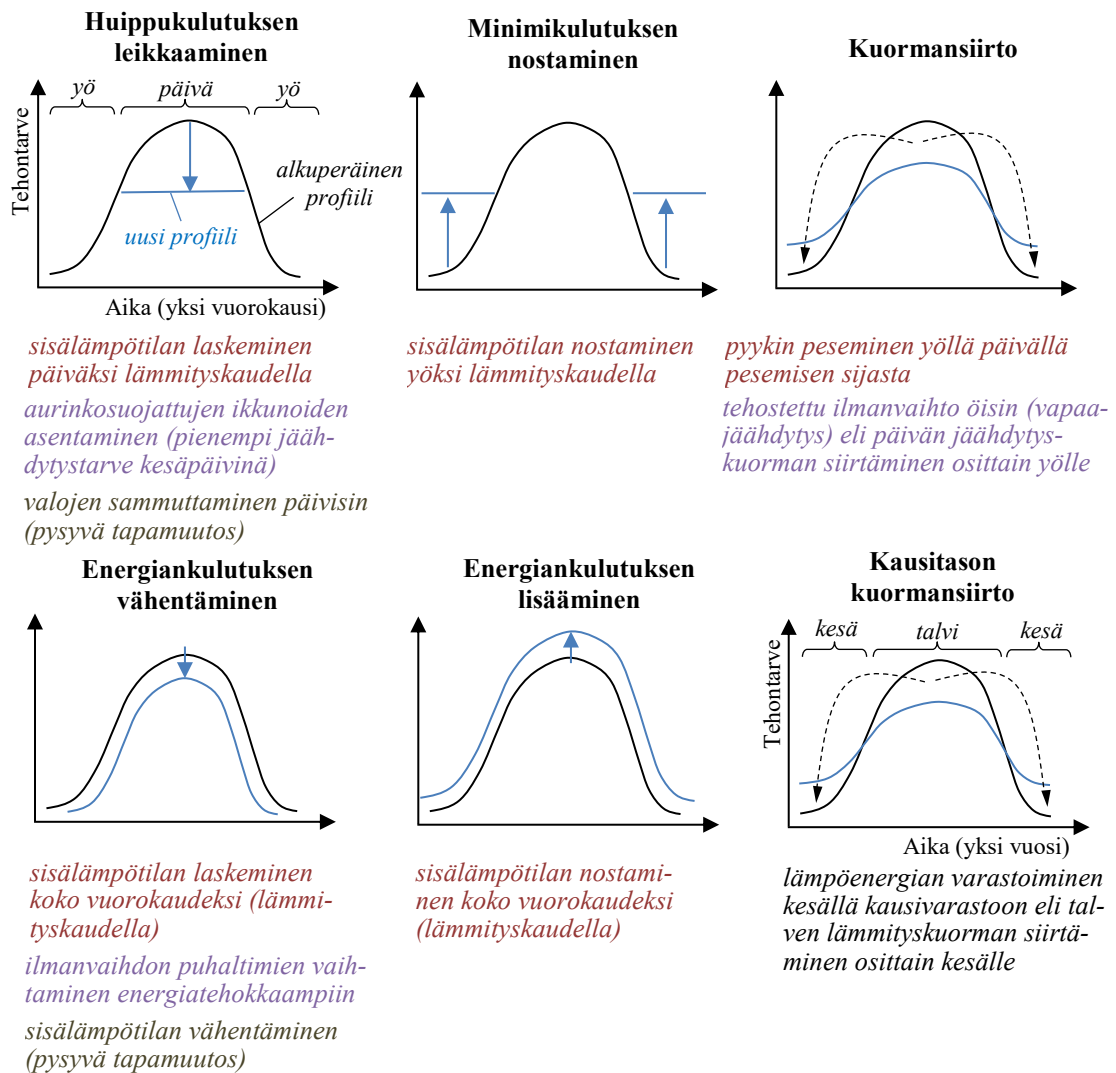
Lund ym. 2015.) Lämpöverkon ja rakennuksien suuret termiset massat tarjoavat lämpösektorille sen sijaan sähkösektoria enemmän luontaista joustavuutta, eikä lämpöverkko ole muutenkaan yhtä herkkä hetkellisille tuotannon ja kysynnän muutoksille kuin sähköverkko (Bloess ym. 2018). Myös kaasuverkko on luontaisesti varsin joustava ja energianvarastointikykyinen (Dehaeseleer ym. 2015).

Lund ym. (2015) esittävät laaja-alaisen katsauksen tavoista, joilla energiajärjestelmän joustavuutta voidaan lisätä. Joustavuutta lisäävät toimenpiteet voidaan jakaa erikseen tuotantoa ja kysyntää koskeviksi. Perinteinen energiajärjestelmä perustuu lähes pelkästään tuotanto puolen joustavuuteen, missä tuotanto mukautuu kysyntään säätämällä hetkittäistä tuotantokapasiteettiaan. Hetkittäisen kokonaistuotannon säätäminen toteutetaan perinteisesti monen eri tuotantolaitoksen yhteisvaikutuksella; tuotantolaitosten *tehonmuutosherkkyydet* eroavat toisistaan. Kun tuotantopuolen joustavuusraja ylitetään, energiaa joudutaan ostamaan muualta tai ylituotannon tapauksessa energiaa voidaan mahdollisuuksien mukaan myydä muualle. Se osuus ylituotannosta, jota ei voida myydä, joudutaan leikkaamaan (engl. *curtailment*) eli jättää hyödyntämättä. Yksinkertainen tapa lisätä energiajärjestelmän tuotantopuolen joustavuutta onkin ylimääräisen energiantuotannon leikkaaminen, joka on kohtuullisissa määrin ja oikein toteutettuna varsin hyödyllistäkin uusiutuvan energiantuotannon kannalta, mutta kestävään energiajärjestelmään pyrkiessä sen ei tulisi olla ensisijainen tai varsinkaan ainut vaihtoehto joustavuuden tuottamiseksi. (Lund ym. 2015.) Muita tuotantopuolen joustavuuden lisääjiä ovat muun muassa yhteistuotanto- ja kombivoimalaitokset, pumpattu ja padottu vesivoima sekä hajautetut mäntämoottori- ja turbiinigeneraattorit. Kaikki nämä soveltuvat käytettäväksi rinnakkain vaihtelevan uusiutuvan energian kanssa. (Lund ym. 2015; Riesz & Milligan 2015; Takahashi ym. 2005.) Pumpatun vesivoiman kohdalla on syytä mainita, että se on oikeastaan suurikapasiteettinen energiavarasto eikä energiantuotantotapa (Deane ym. 2009).

Energiantuotannon kokonaiskapasiteetti määräytyy pitkälti vuoden suurimman tehontarpeen hetken mukaisesti (Suomessa tyypillisesti kylmä talvipäivä), jotta voidaan varmistua energiantuotannon riittävydestä ympäri vuoden. Energiankulutus kuitenkin vaihtelee merkittävästi vuodenaikojen mukaan varsinkin Suomen olosuhteissa, jonka takia suurikapasiteettisia perusvoimalaitoksia ei ole järkevää mitoittaa kattamaan koko tehontarvetta (nk. huipputehontarvetta). Tämän johdosta tarvitaan *säätövoimaa*, joka on perinteisesti toteutettuna (esimerkiksi fossiilisiin polttoaineisiin perustuvat huipputehovoimalat) käyttökustannuksiltaan ja ympäristöystävällisyyden näkökulmasta epäsuotuisa vaihtoehto (Pikk & Viiding 2013; Riesz & Milligan 2015). Säätövoiman tarvetta voitaisiin pienentää tehostamalla kysyntäpuolen joustamiskykyä, mutta perinteisesti energiankysyntä ei teollisuutta pienemmässä mittakaavassa juurikaan mukaudu energiaverkkoa tasapainottavalla tavalla, vaikka myös muun kuin teollisuuskokoluokan kysynnän puolen joustamisessa olisi paljon potentiaalia (Lund ym. 2015; Pahkala ym. 2018).

*Kysyntäjoustolla* tarkoitetaan väliaikaisia toimenpiteitä, joilla voidaan vaikuttaa verkkoa tasapainottavalla tavalla väliaikaisesti energian loppukäytön profiiliin, ja siten hillitä energiantuotantoon kohdistuvaa joustavuuden ja säätövoiman lisäämisen painetta. Vaihtelevat sekä tehonsäätökyvyttömät energiantuotantotavat, kuten tuulivoima ja ydinvoima, lisäävät kysyntäjouston tarvetta. Kysyntäjoustoa laajempi käsite on *kysynnän muokkaaminen*, joka sisältää energian loppukäytön väliaikaisen muokkaamisen (eli kysyntäjouston) lisäksi toimenpiteet, joilla tehdään pysyviä muutoksia energian loppukäytön profiiliin. Tällöisiä toimenpiteitä ovat *energiatehokkuustoimenpiteet* ja pysyväluonteinen *energian säästäminen*.

Hyvin toteutettuna kysynnän muokkaaminen vähentää energiantuotannon huipputehon, sää- tövoiman ja leikkaamisen tarvetta samalla vähentäen energian hintahuippuja ja keskimää- räistä markkinahintaa. Kysynnän muokkaamisella voidaan myös hillitä energiajärjestelmiin liittyvän infrastruktuurin laajentamistarvetta sekä vähentää energiansiirto- ja jakeluhäviöitä. Kysynnän muokkaamisen keinoista erityisesti kysyntäjousto mahdollistaa myös kuluttajien roolin aktiivisena toimijana energiamarkkinoilla. *Edistyksellinen kysyntäjousto* on välttämätöntä laajamittaisen uusiutuvan energiantuotannon mahdollistamiseksi. (Lund ym. 2015; Takahashi ym. 2005.) Kuvassa 10 esitetään kysynnän muokkaamisen keinot.



Kuva 10 Kysynnän muokkaamisen keinot. Keinojen yhteydessä esitetään yksittäisen rakennuksen tasolla mahdollinen esimerkkitoimenpide: punertavalla värillä merkitään väliaikaista kysyntäjoustopidettä, violetilla pysyvää energiatehokkuustoimenpidettä ja kellertävällä kuluttajälähtöistä pysyväluonteista energian säästämistä. Huomaa kausitason kuormansiirrosta (oikea alakulma) muista keinoista poikkeava ajanjakso. (Mukaiillen: Lund ym. 2015.)

Vaikka energiatehokkuustoimenpiteet ja energian säästäminen ovat kestävästä energiajärjestelmän kannalta erittäin tärkeitä asioita, niin niillä ei kuitenkaan voida reaaliaikaisesti tasapainottaa energiajärjestelmää samalla tavalla kuin edistyksellisellä automatisoidulla kysyn-

täjoustolla. Kysyntäjoustopuolen toimenpiteistä erityisesti energian loppukäytön ajankohdan siirtämismahdollisuus eli *kuormansiirto* on erityisen hyödyllistä ja olennaista uusiutuvien energiajärjestelmien kannalta, koska kuormansiirrolla voidaan lisätä energiajärjestelmän joustavuutta mahdollisimman pienellä vaikutuksella loppukäyttäjien elintasoon (loppukäyttäjän nettoenergiankäyttö ei muutu). Esimerkiksi asuinrakennuksen kuormansiirto voidaan toteuttaa käyttöveden lämmitysajankohdan (tarvitaan lämminvesivaraaja) ja kodinkoneiden käyttöajankohdan siirtämisellä minimikulutuksen ajankohtaan (eli normaalitilanteessa yöaikaan) tai hyödyntämällä etukäteen rakennuksen termistä massaa tulevaa lämmitys- tai jäähdytystarvetta varten (esimerkiksi asunnon jäähdyttäminen yöllä keskipäivän jäähdytystehontarpeen pienentämiseksi). Kysyntäjoustopuoltoa voidaan toteuttaa automatisoidusti tai manuaalisesti, mutta manuaalinen toteutus vaatii aktiivista kuluttajatasen osallistumista verkon tasapainottamiseen, minkä on todettu olevan huonosti reagoiva ja epätehokas tapa toteuttaa kysyntäjoustopuoltoa. (Lund ym. 2015.) Toisaalta kysyntäjoustopuolen pelillistämällä, ja sen kautta hyvin onnistuneella loppukäyttäjien aktivoinnilla ja motivoinnilla, saatiin sähkön kulutushuippuja varsin tehokkaasti leikattua Helsingissä, Nizzassa ja Wienissä vuosina 2014–2017 pilotoidussa CITYOPT-hankkeessa (Heimonen 2017). Kysyntäjoustopuolen tehokas toteutus vaatii joka tapauksessa energiajärjestelmän edistyksellisyttä eli kattavia automaatiojärjestelmiä ja älykkyyttä, erityisesti mahdollisimman reaaliaikaista älymittarointia (engl. *smart metering*) (Lund ym. 2015; Takahashi ym. 2005). Suomessa on jo käytännössä kaikissa rakennuksissa aikaisemman sukupolven *älymittarit*, jotka uusitaan uuden sukupolven älymittareiksi 2020-luvun puolivälissä (Pahkala ym. 2018). Edistyksellisen kysyntäjoustopuolen vaatima teknologia on jo muiltakin osin olemassa. Esimerkiksi Suomessa on jo toteutettu sekä sähkön että lämmön edistyksellisen kysyntäjoustopuolen pilottikohteita. (Ks. esim. Ahonen & Honkapuro 2017; Energiakokeilut.fi 2019.)

Kysyntäjoustopuolen käyttöönotto on edennyt kuitenkin hitaasti johtuen useista eri syistä, kuten riittämättömästä kannusteesta kysyntäjoustopuoleen liittyviin investointeihin ja tarvittavan ICT-infrastruktuurin rahoituksen puutteesta. Juuri energiajärjestelmän ICT-infrastruktuuri onkin tärkein yksittäinen teknologinen mahdollistaja tehokkaan kysyntäjoustopuolejärjestelmän käyttöönotolle (ts. edistyksellinen energiajärjestelmä). (Lund ym. 2015.) Jo rakenteilla oleva 5G-verkko myös osaltaan edistää edistyksellistä kysyntäjoustopuoltoa ja ylipäätään edistyksellisiä energiajärjestelmiä, vaikkakaan 5G-verkon ja energiajärjestelmien saumaton yhdistäminen ei ole yksinkertainen tehtävä (Leligou ym. 2018). Suomessa kysyntäjoustopuoltoa toteutetaan tällä hetkellä lähinnä teollisuuden suurien sähkökuormien kautta, joista osa on kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:n hallinnassa (Pöyry & Fingrid 2014). Suomessa suurin kysyntäjoustopuolen potentiaali on energiaintensiivisessä teollisuudessa, mutta toisaalta myös asuin- ja toimistorakennuksilla on merkittävä potentiaali, varsinkin jos ne rinnastetaan osaksi kysyntäjoustopuoltoa aggregaattorien avulla. Suomen olosuhteissa asuin- ja toimistorakennuksissa varsinkin sähkölämmityksellä, mutta myös vesi- ja kylmäkalusteilla sekä lämpöpumpuilla on tutkittu olevan selvää kysyntäjoustopuolen potentiaalia. (Ahonen & Honkapuro 2017; Pöyry & Fingrid 2014.)

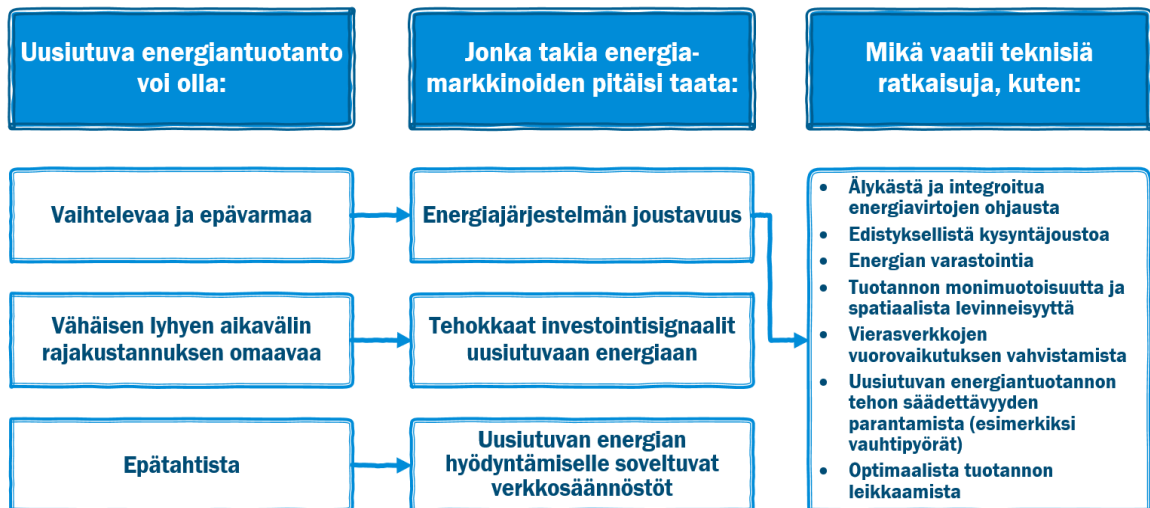
Tuotantopuolen joustavuuden ja kysyntäjoustopuolen ohella uusiutuvien energiajärjestelmien tärkeitä joustavuuden lisääjiä ovat energiavektorien integroiminen ja älykäs ohjaaminen, tuotantopuolen monipuolisuus, energiavarastot, vahvat siirtoyhteydet vierasverkkojen kanssa, mahdollisimman tarkka energiantarpeen ja -tuotantopotentiaalin ennustamiskyky (esimerkiksi tuuliprofiilin ennustaminen) ja energiaverkkojen hyödyntäminen. Energiaverkoilla, lukuun ottamatta sähköverkkoa, on luontaista joustavuutta, ja niiden avulla voidaan myös kierrättää energiavirtoja, mikä lisää merkittävästi energiajärjestelmän joustavuutta. (Lund 2014; Lund ym. 2015.) Energian varastoiminen on varsin ilmeinen ja myös hyvä tapa

lisätä energiajärjestelmän joustavuutta, mutta energiavarastoja ei tulisi kuitenkaan pitää yleispätevänä tai ainoana ratkaisuna energiajärjestelmien joustavuusongelmaan. Tämä johdetaan siitä, että suurella määrällä vaihtelevaa uusiutuvaa energiantuotantoa vaadittaisiin valtavasti tehonmuutosherkkää varastointikapasiteettia, jos energian varastoiminen olisi yksin vastuussa energiajärjestelmän joustavuudesta. Energiavarastojen kapasiteetti on kuitenkin varsin rajoitettua (erityisesti sähkövarastojen) eivätkä suurikapasiteettiset energiavarastot tyypillisesti ole tehonmuutosherkkiä (lämpövarastot), ja lisäksi energiavarastojen kustannustehokkuus on tapauskohtaista riippuen monista tekijöistä. (Lund ym. 2015; Mohd ym. 2008.) On hyvä myös huomata, että kysyntäjoustolla on energian varastointiin verrattuna selviä etuja: se voi toimia periaatteessa 100 %:n hyötysuhteella, ei vaadi tilaa eikä investointikustannuksia (olettaen, että edistyksellinen energiajärjestelmä rakennetaan joka tapauksessa), ei kuluta materiaaleja eikä aiheuta päästöjä (sitoutuneita tai käytönaikaisia) (Lund ym. 2015).

Energiajärjestelmän joustavuuspotentiaali on kaikkien yllä mainittujen toimenpiteiden jälkeenkin rajoitettua ilman kokonaisvaltaista lähestymistapaa. Kokonaisvaltainen integroitu energiajärjestelmä, kuten uusiutuva alueellinen energiajärjestelmä (ks. luku 3.2.1), on edellytys energiajärjestelmän maksimaalisen joustavuuden saavuttamiseksi (Bačeković & Østergaard 2018; Keirstead & Shah 2013; Lund 2014; Lund ym. 2015). Tulee kuitenkin huomioida, että energiajärjestelmän joustavuuden lisääminen ei saa vaikuttaa negatiivisesti energiajärjestelmältä vaadittaviin muihin ominaisuuksiin, kuten jatkuvaan käytettävyyteen (loppukäyttäjillä mahdollisuus saada tarpeenmukainen määrä oikeanlaatuista energiaa verkosta), luotettavuuteen (energianjakelu on katkotonta ja energia on hyvä- sekä tasalaatuista), turvallisuuteen (energiajärjestelmä aiheuttaa käyttäjilleen minimaalisen terveystarpeen) ja ympäristöystävällisyyteen sekä kustannustehokkuuteen (Orecchini & Santiangeli 2011). Älykkäiden energiaverkkojen kaltaisissa energiajärjestelmissä kaikkia näitä ominaisuuksia on kuitenkin mahdollista parantaa perinteiseen energiajärjestelmään verrattuna (Bačeković & Østergaard 2018; Kainulainen 2015; Lund 2014; Orecchini & Santiangeli 2011).

Energiajärjestelmän joustavuuden puutteen lisäksi vaihtelevalle energiantuotannolle sopimattomat markkinamekanismit hankaloittavat oleellisesti uusiutuvan energian yleistymistä. Perinteisen energiajärjestelmän tarpeisiin luodut energiamarkkinamekanismit voivat toimia jopa täydellisenä esteenä uusiutuvaan energiaan tehtäviin investointeihin – myös sellaisiin investointeihin, jotka uudella markkinamekanismeilla tarjoaisivat teknistaloudellisesti merkittävän parannuksen perinteiseen energiajärjestelmään verrattuna. (Pikk & Viiding 2013; Riesz & Milligan 2015; Takahashi ym. 2005.) Usein jo pienillä markkinamekanismien muutoksilla voitaisiin saavuttaa uusiutuvalla energialle parempi kustannustehokkuus. Uusiutuvan ja perinteisen energiantuotantotavan erottaa toisistaan varsinkin energiamarkkinoiden näkökulmasta kolme uusiutuvan energian ominaispiirrettä: vaihtelevuus ja epävarmuus, pienet lyhyen aikavälin rajakustannukset sekä epätahtisuus (engl. *non-synchronous generation*). Epätahtisuudella tarkoitetaan esimerkiksi tuuliturbiinin tuottaman sähkön taajuuden riippuvuutta tuulen nopeudesta, ellei tehdä korjaavia toimenpiteitä, kuten tuulivoimalan laipojen kulman muutosta tai käytetä taajuusmuuttajaa. (Riesz & Milligan 2015.) Edellä luetellut kolme uusiutuvan energian erityispiirrettä asettavat energiamarkkinoille sopeutumista vaativia vaatimuksia ja edellyttävät energiajärjestelmältä uusia teknisiä ratkaisuja kuvan 11 osoittamalla tavalla.





Kuva 11 Uusiutuvan energiantuotannon erityspiirteet, energiemarkkinoiden sopeutuminen niihin ja tarvittavia teknisiä toimenpiteitä (mukaillen: Riesz & Milligan 2015).

Yllä esitetyt energiemarkkinoiden näkökulmat edustavat ylipäätään hyvää energiajärjestelmien markkinasuunnittelua, ja nykyisissäkin energiajärjestelmissä kaikki esitetyt sopeutumistarpeet ovat jo jossain määrin esillä. Uusiutuvan energian yleistyminen oikeastaan vain korostaa ja asettaa näille sopeutumistarpeille tiukempia vaatimuksia. (Riesz & Milligan 2015.) Esimerkiksi Hedman (2016), Lund ym. (2015), Pikk & Viiding (2013), Riesz & Milligan (2015) ja Takahashi ym. (2005) esittävät erilaisia markkinamekanismeja, hinnoittelumenetelmiä ja poliittisia ohjaustoimenpiteitä, joilla kuvassa 11 esitettyjä energiamaarkkinoinhin kohdistuvia sopeutusvaatimuksia voitaisiin edesauttaa. Näissä tutkimuksissa käsitellään kattavasti muun muassa kysyntäjoustop edistämistä energiamaarkkinoiden avulla: ilman poliittisia ohjaustoimenpiteitä kysyntäjoustop yleistyminen ja siihen liittyvät hyödyt voidaan saavuttaa vain, jos energiamaarkkinat itsessään tukevat ja kannustavat kysyntäjoustop liittymistä. Sama pätee edistyksellisten energiajärjestelmien ja uusiutuvan energian yleistymiseen. Uusiutuvan energian laaja-alaisen yleistymisen ja paremman kustannustehokkuuden saavuttamisen suurin teknologinen este on energiajärjestelmän rajoitettu joustavuus, minkä takia energiamaarkkinoiden ja säännöstelyn tulisi ennen kaikkea ohjata investointeja energiajärjestelmän joustavuuden parantamiseksi (Ahonen & Honkapuro 2017; Lund 2014; Lund ym. 2015).

Yllä mainituissa tutkimuksissa esitetyistä markkinamekanismeista ja hinnoittelumenetelmistä voidaan tunnistaa keskeisenä ajatuksena tarve mahdollisimman reaaliaikaiselle, dynaamiselle ja laajalle energiamaarkkinalle, jossa energiaverkon asiakkailta on nykyistä enemmän vaikutusvaltaa. Esimerkiksi lohkoketjuja (engl. *blockchain technologies*) on ehdotettu potentiaalisiksi ratkaisuksi tällaisen laajasti hajautetun ja reaaliaikaisen sekä dynaamisen energiamaarkkinan tuomiin kirjanpidollisiin ja turvallisuuteen liittyviin ongelmiin (Andoni ym. 2019). Toinen keskeinen ajatus, jota varsinkin Takahashi ym. (2005) painottavat, on energiamaarkkinoiden luominen, jossa energiayhtiöiden tuotto ei ole suoraan kytköksissä myydyin energian määrään, koska muuten energiayhtiöillä ei ole juurikaan kannustetta pyrkiä vähentämään energiankulutusta (esimerkiksi hajautetun energiantuotannon tai energiatehokkuustoimenpiteiden avulla) – pikemminkin päinvastoin. Takahashi ym. tuovat myös kattavasti esille energiajärjestelmän eri sidosryhmien (kuluttajat/tuottajat, verkko-operaattorit, tuottajat) näkökulmia ja tunnistavat energiamaarkkinoiden muutoksen vaikutuksia ja es-

teitä kunkin sidosryhmän kannalta. Lisäksi yllä mainittujen tutkimuksien keskeisimpiä sanomia on, että tuotannon ja kysynnän puolen joustavuuden lisäämiselle pitää olla tarpeeksi vahva markkinasignaali, kuten myös jo aiemmin tuotiin ilmi. Tutkimuksissa eritellään myös yksityiskohtaisesti, kuinka uusiutuva energiantuotanto ja kysyntäjousto voivat osallistua verkkoa tukeviin palveluihin (engl. *grid ancillary services*) ja niihin liittyviin markkinoihin.

On kuitenkin huomioitava, että uusiutuvalla energialle parhaiten sopivan energiamarkkinamallin kehittäminen on jatkuvan yhteiskunnallisen keskustelun alaista, ja siihen liittyy vielä ratkaistavia ongelmakohtia. Yksi kiistelyn aiheista on sääntelyn rooli uusiutuvan energian lisäämisessä. Liialliset poliittiset ohjaustoimenpiteet voivat estää hyvin toimivan energiamarkkinan muodostumisen mutta toisaalta olla myös edellytys uusiutuvaan energiaan tehtäviin investointeihin. Uusiutuva energia ei kuitenkaan ole este tehokkaiden ja hyvin toimivien energiamarkkinoiden muodostumiselle, mutta kuten aiemmin mainittiin, sen erityispiirteet korostavat jo kauan keskusteltuja energiamarkkinoiden ongelmakohtia. Lyhyen aikavälin rajakustannushinnoitteluun (engl. *short-run marginal cost*) perustuva energiamarkkina (esimerkiksi Pohjoismaiden Nord Pool -sähköpörssi) onkin perustavanlaatuisen kysymysten (ja muutosten) äärellä. Skenaariossa, jossa energia tuotetaan erittäin pienten marginaalikustannusten teknologioilla (esimerkiksi tuulivoima ja aurinkoenergia), tulee vääjäämättä eteen kannusteen puuttumisesta aiheutuva pattitilanne: jos energian tuottamisesta saavat tulot eivät enää riitä edes kattamaan energiantuotantoon tehtyä investointia ja kiinteitä kustannuksia (koska energian myyntihinta tippuu erittäin alas), miksi kukaan enää investoisi energiantuotantokapasiteettiin? Tämä ongelmallisuus juontaa juurensa markkinatalouden peruseräiteisiin asti. (Pikk & Viiding 2013; Riesz & Milligan 2015; Takahashi ym. 2005.) Perinteisessä energiamarkkinamallissa verkkohaltijan ja energiantuottajien näkökulmista verkon asiakkaiden oma hajautettu energiantuotanto on ongelmallista, koska energiaverkon kiinteät kustannukset (investoinnit ja huoltokustannukset) eivät muutu paikallisesti tuotetun energian lisääntyessä, mutta toisaalta myydyn energian määrä vähenee, mikä siis johtaa verkkohaltijan ja energiantuottajien liikevaihdon pienenemiseen. Toinen verkon asiakkaiden omaan energiantuotantoon liittyvä ongelmallisuus on se, että omaa energiantuotantokapasiteettia omaavat asiakkaat ovat kaikkien muiden verkon käyttäjien tavoin oikeutettuja saamaan verkosta jokaisena ajanhetkenä riittävästi energiaa. Tämän takia energiantuottajat ja verkon hallitsija joutuvat joka tapauksessa varautumaan päivittäin skenaarioon, jossa kukaan asiakkaista ei käytä omaa tuotantokapasiteettiaan. Nämä ongelmat olisivat kuitenkin suurilta osin vältettävissä uudennlaisilla hinnoittelumeکانismeilla, kuten internet-liittymiin perinteisesti sovelletun kaistahinnoitteluperiaatteen (engl. *access rate*) energiamarkkinoihin räätälöidyllä muunnelmalla. (Takahashi ym. 2005.)

Theo ym. (2017) tuovat kattavasti esille teknisiä, taloudellisia, poliittisia, institutionaalisia ja sosiaalisia esteitä, joita hajautettuihin uusiutuviin energiajärjestelmiin kohdistuu. He mainitsevat muun muassa, että maailmalla on varsin yleistä tilanne, jossa keskitettyä energiantuotantoa suosiva politiikka ja säännöstely estävät hajautettujen uusiutuvien energiantuotantotapojen yleistymisen ja kehityksen. Hirvosen (2015) haastattelututkimuksessa tarkastellaan hajautetun uusiutuvan energian potentiaalia ja esteitä erityisesti Suomen näkökulmasta. Haastateltujen asiantuntijoiden mukaan hajautetulla uusiutuvalla energialla on Suomessa paljon – tai jopa aivan valtavasti – teknistaloudellista potentiaalia, mutta myös monia esteitä, jotka liittyvät esimerkiksi verotuksellisiin, poliittisiin ja lupakäytännöllisiin ongelmakohtiin. Tämän lisäksi Hirvonen tunnistaa asiantuntijahaastatteluihin perustuen yleisen asenneilma-  
piirin ja erityisesti niin kutsutun *polkuriippuvuuden* yhdeksi suurimmista energiajärjestelmien kehityksen esteistä. Polkuriippuvuuden roolia energiajärjestelmien kehityksessä on

laajemmin käsitelty esimerkiksi Unruhin (2000) tutkimuksessa. Hirvosen (2015) tutkimuksessa todetaan myös, että hajautettu energiantuotanto olisi teknisesti täysin kypsää laaja-alaiseen markkinoille osallistumiseen, mutta tämä vaatisi ainakin sitä koskevien hallinnollisten esteiden systemaattista purkamista ja fossiilisten energiatukien vähentämistä. Hedman (2016) puolestaan tutkii väitöskirjassaan lainsäädännön roolia energiatehokkaassa kaupunkisuunnittelussa. Hän toteaa, että sääntely on hyödyllistä erityisesti silloin, kun etsitään ratkaisuja, jotka hyödyttävät yhteiskuntaa pidemmällä aikavälillä. Tämä johtuu siitä, että pidemmällä aikavälillä hyötyä tuovat ratkaisut eivät aina ole lyhyellä aikavälillä taloudellisesti kannattavia. Väitöskirjassa tuodaan esille konkreettisia suosituksia Suomen kaupunkisuunnittelun säännöstelyn kehittämiseksi, joilla kaupunkisuunnittelua voitaisiin ohjata kestäväen kehityksen mukaiseksi kuitenkin estämättä uusien innovatiivisten ratkaisujen syntyä. Lisäksi väitöskirjassa painotetaan kokonaisvaltaisen lähestymistavan, tiiviin eri alojen välisen yhteistyön sekä helposti lähestyttävien työkalujen ja selkeiden ohjeistuksien tärkeyttä, kun yritetään parantaa rakennetun ympäristön energiatehokkuutta optimaalisella tavalla. Pahkala (2018) työryhmineen esittää konkreettisia toimia, joilla yksityiset asiakkaat Suomessa voivat osallistua sähkömarkkinoille edistämällä samalla energiajärjestelmän toimintavarmuutta. Työryhmän johtopäätös on, että kysyntäjoustopuoli tulisi olla kilpailtua liiketoimintaa eli jakeluverkkoyhtiöiden keskitetty kuormanohjaus sekä energiavarastojen omistaminen ja käyttö tulisi siirtää hallitusti kaikille markkinatoimijoille. He toteavat, että rakennusten teknisten järjestelmien suunnittelussa tulisi myös aina ottaa huomioon kysyntäjoustopuoliin liittymisen mahdollisuus. Työryhmä suhtautuu positiivisesti myös alueellisiin energiaratkaisuihin (energia-yhteisöihin) ja aggregaattoritoimintaan. Hinnoittelumekanismiin liittyen työryhmä mainitsee, että sähkönsiirron kiinteä maksu tulisi korvata tehokomponentilla, ja että suhteelliseen sähköverotukseen liittyy monia ongelmia, joiden vuoksi sitä ei nähdä järkevänä vaihtoehtona. Esitettyjen toimenpiteiden tavoitteeksi työryhmä mainitsee, että uudet toimijat voisivat osallistua sähkömarkkinoille tasapuolisesti ja markkinaehtoisesti. Pahkalan ym. raportti ottaa kantaa vain sähkömarkkinoihin, mutta raportissa esitettyjä toimenpiteitä voidaan pitää ainakin osittain pätevänä myös täysin integroidussa monienergiajärjestelmässä. Helsingin kaupungin (2015) teettämässä selvityksessä esitetään hajautetun energiantuotannon ja energiatehokkuustoimenpiteiden edistämiseen vaadittavia toimenpiteitä Helsingissä. Tällaisiksi toimenpiteiksi mainitaan esimerkiksi selkeät neuvonta- ja ohjauspalvelut kuluttajille (esimerkiksi vapaasti internetissä käytettävät visuaaliset ja helposti käytettävät työkalut energiaremonttien omatoimiselle analysoinnille), energiarenessanssi-toimintamallin kehittäminen (alueellisia malliratkaisuja), kaupungin ja yritysten välisen yhteistyön kehittäminen, päätöksenteon sujuvoittaminen, keskitetyn uusiutuvan energiantuotannon sijoitteluperiaatteiden selventäminen, maalämmön hyödyntämisen sääntöjen selkeyttäminen (saako naapurin tontille porata kaivoja), tontinluovutusehtoihin liittyvä porkkanointi ja esimerkkeinä toimivien uudenlaisten pilottikohteiden implementoiminen.

Perinteinen yksisuuntainen ja passiivinen keskitettyyn energiantuotantoon perustuva energiajärjestelmä ei tarjoa tarpeeksi joustavuutta, jotta vaihteleva uusiutuva energia voisi muodostua sen pääasialliseksi energiantuotantomuodoksi (Koljonen ym. 2012; Mancarella 2014). Edistyskelliset energiajärjestelmät, joita käsiteltiin luvussa 3.2.1 (esimerkiksi älykkäät energiaverkot), sen sijaan mahdollistavat energiajärjestelmän riittävän joustavuuden uusiutuvan energian merkittävälle lisäämiselle (Lund ym. 2015; Niemi ym. 2012). Energiajärjestelmien muutos perinteisistä edistyskellisiin on kuitenkin vaikea ja paljon työtä vaativa prosessi, joka koskee koko yhteiskuntaa. Uudenlaiset energiamarkkinakonseptit, laaja-alai-

nen yhteistyö yhteiskunnan eri sidosryhmien kesken, poliittiset ohjaustoimenpiteet sekä kuluttajatasen muutokset edesauttavat edistyksellisten energiajärjestelmien kehitystä. (Lund 2014; Lund ym. 2015.)

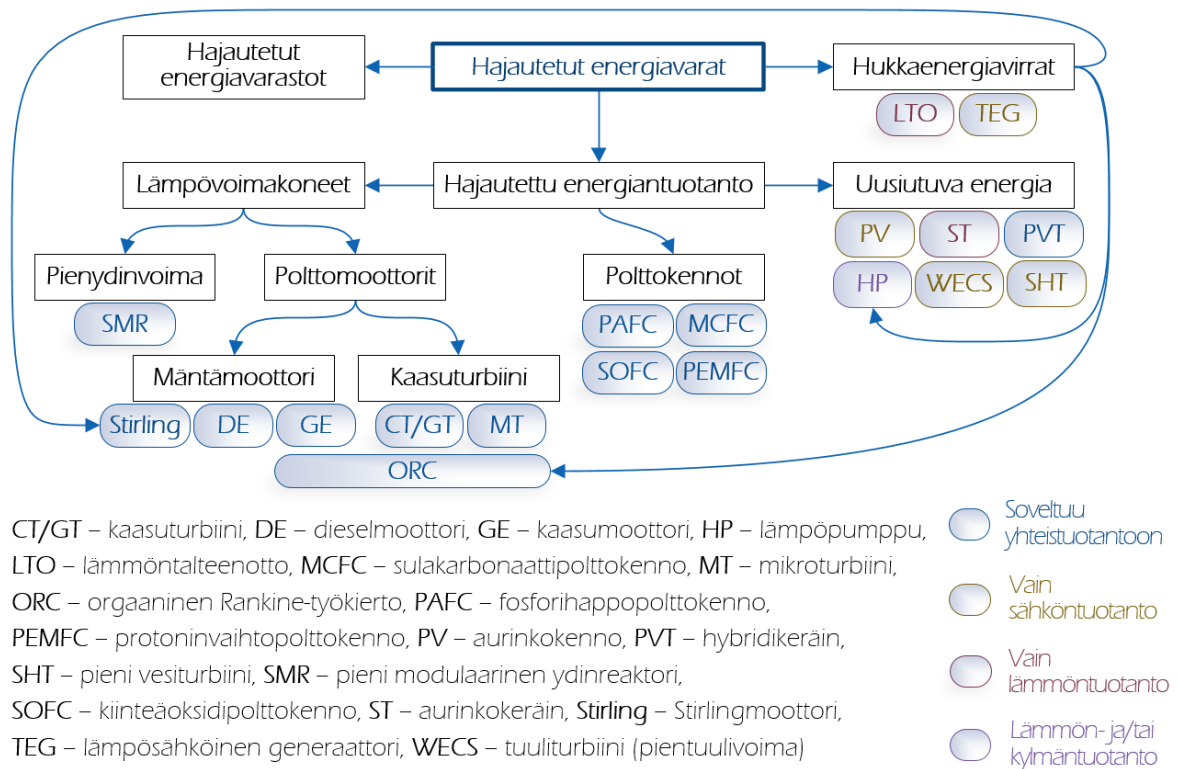
### 3.2.3 Energiantuotanto-, energianjakelu- ja energian varastointijärjestelmät

Ympäristöystävällisiä teknologisesti kypsiä energiantuotantoratkaisuja on olemassa jo kattavasti. Urbanissa ympäristössä uusiutuvista energialähteistä varsinkin aurinkoenergiaa voidaan suoraan hyödyntää vaivattomasti ja tehokkaasti esimerkiksi rakennuksiin integroitavilla aurinkoenergiajärjestelmillä. (Niemi ym. 2012.) Myös maalämpö (tai muu *ympäristölämpö*) soveltuu hyvin urbaaniin ympäristöön integroitavaksi energiantuotantotavaksi (engl. *city-integrated renewable energy*), varsinkin jos sen hyödyntäminen huomioidaan jo alueen kaavoitusta tehdessä. Näiden lisäksi tuulivoimaa voidaan pienissä määrin sisällyttää kaupunkirakenteen sekaan saavuttaen samalla mahdollisesti muitakin tuuliprofiilin muutoksesta aiheutuvia hyötyjä. Tiivis kaupunkirakenne kuitenkin osaltaan myös rajoittaa sen sisällä tapahtuvaa energiantuotantoa esimerkiksi tilankäyttöisten ja ilmanlaadullisten seikkojen takia. (Kammen & Sunter 2016; Keirstead & Shah 2013.) Tämän takia keskitetty energiantuotanto ei yleensä sijaitse kaupungin sisällä (keskustassa), sillä se vaatii paljon tilaa, ja orgaanisten yhdisteiden polttamiseen perustuvat energiantuotantotavat aiheuttavat lisäksi paikallisia päästöjä. On kuitenkin huomioitava, että selvä erottelu kaupungin (tai muun alueen) sisäisen energiantuotannon ja sen ulkopuolisen energiantuotannon välillä ei välttämättä ole mielekästä, koska varsinkin sähkö- ja kaasusektorilla energiantuotanto ja -kulutus saattavat sijaita toisistaan satojenkin kilometrien päässä. Tällöin on vaikeaa osoittaa yksikäsitteisesti, mikä osuus alueen ulkopuolisesta energiantuotannosta kuuluisi sisällyttää alueen omaan energiantuotantoon. Tämä puolestaan liittyy pohjimmiltaan alueellisen taserajan määrittelyn monitulkintaisuuteen (ks. luku 3.1.3). (Keirstead & Shah 2013.) Yksi lähestymistapa voisi olla alueen ulkopuolella sijaitsevan energiantuotantokapasiteetin sertifiointi tietylle alueelle kuuluvaksi, jolloin se voitaisiin alueellisessa energia-analyysissä tulkita alueen omaksi energiantuotannoksi.

Viime vuosina uusiutuvan energian markkinaosuus on globaalilla tasolla varsinkin sähkösektorilla kasvanut kiihtyvällä tahdilla, ja tämän kiihtyvän kasvun on ennustettu myös jatkuvan seuraavien vuosien aikana (IEA 2019). Suomen markkinoilla uusiutuva energia on edennyt hillitymmin, vaikka sen osuus onkin viime vuosina kasvanut melko tasaisesti, ja kasvun odotetaan Suomen kansallisen energia- ja ilmastostrategian mukaisesti myös jatkuvan seuraavina vuosikymmeninä (Huttunen 2017). Useiden Suomen kaupunkien, kuten Helsingin, Lahden ja Tampereen, omat energia- ja ympäristötavoitteet ovat kunnianhimoisempia ja nopeampiaikatauluisia (Helsingin kaupunki 2018; Rosberg 2019; Tampereen kaupunkiseutu 2010), mutta niissäkään ei uusiutuvan tai hajautetun energiantuotannon osuuden lisääntyminen pääsääntöisesti yllä globaalin kehitysennusteen tasolle – varsinkaan jos biomassan energiakäytön lisäämistä ei huomioida uusiutuvan energian lisäämisenä. Suomen kansallisessa energia- ja ilmastostrategiassa tosin pohditaan erillistarkasteluna täysin uusiutuvaan energiaan perustuvan skenaarion mahdollisuutta, jossa myös mainitaan, että Suomi tavoittelee pitkällä aikavälillä hiilineutraalia ja vahvemmin uusiutuvien energialähteiden käyttöön perustuvaa yhteiskuntaa (Huttunen 2017). Selviä toimenpiteitä *täysin uusiutuvan energiajärjestelmän* toteuttamiseksi ei kyseisen erillistarkastelun pohjalta ehdoteta. Suomi kuitenkin aikoo lopettaa hiilen energiakäytön vuoden 2029 toukokuuhun mennessä (Laki hiilen energiakäytön kieltämisestä 416/2019) ja hallitusohjelman tavoitteiden mukaisesti sähkön- ja lämmöntuotannon tulisi olla Suomessa lähes päästötöntä vuoden 2030 loppuun

mennessä sekä koko Suomen tulisi saavuttaa hiilineutraalius vuonna 2035 (Valtioneuvosto 2019). Nämä päätökset ja tavoitteet tulevat vaatimaan perinteisestä poikkeavia energiantuotanto- ja varastointiratkaisuja varsin nopealla aikataululla.

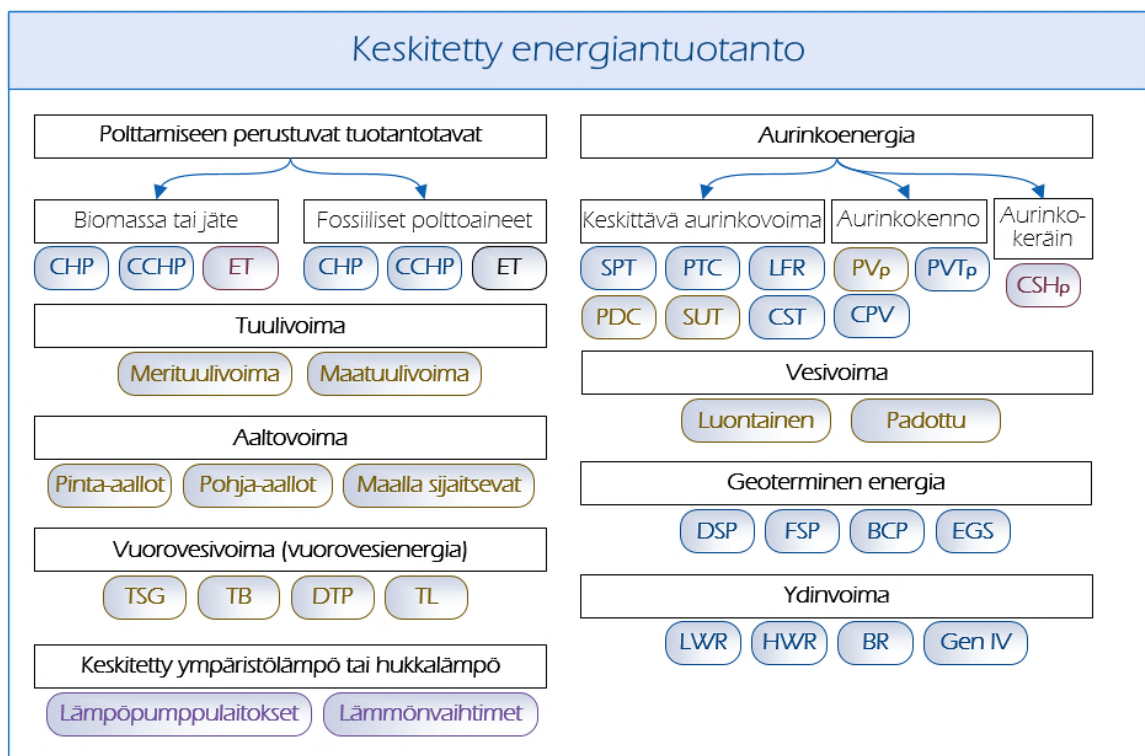
Seuraavaksi esitetään hajautettuja ja keskitettyjä energiantuotanto- ja varastointijärjestelmiä sekä neljännen sukupolven kaukolämpöverkon konsepti. Alueellisessa energiaoptimoinnissa voidaan käyttää muuttujina tässä luvussa esitettyjä teknologioita, kun etsitään parasta mahdollista energiantuotanto- ja varastointiratkaisua alueelle. Teknologioiden suorituskyvyn tarkempaa analysointia tai vertailua ei tässä tehdä, koska alueellisen energiaoptimoinnin yksi tärkeistä hyödyistä on, että optimointimenetelmä tekee tämän vertailun. Kattavia listauksia eri teknologioiden suorituskykyparametreista ei myöskään esitetä sen takia, että erityisesti uusiutuvaan energiaan liittyvien teknologioiden suorituskyky paranee globaalin kehitystyön tuloksena jatkuvasti, minkä vuoksi niihin liittyvien parametrien arvot (esimerkiksi hyötysuhteet ja investointikustannukset) muuttuvat nopeasti. Tämän vuoksi teknologioiden suorituskykyyn tai kustannuksiin liittyvät parametrit tulisi alueellista energiaoptimointia tehdessä tarkastaa mahdollisimman ajantasaisesta teknologioita kartoittavasta ja vertailevasta tieteellisestä teoksesta tai muusta luotettavasta lähteestä. Ziyad Salamehin (2014) kirja *Renewable Energy System Design* voidaan mainita esimerkkinä tällaisesta varsin tuoreesta teoksesta, jossa esitetään ja vertaillaan kattavasti energiantuotanto- ja varastointitekniikkien ominaisuuksia keskittyen etenkin uusiutuviin energijärjestelmiin. On tosin huomioitava, että uusiutuvan energian nopean kehitystahdin myötä Salamehinkin teoksessa esitetyt teknologioiden parametrit ja vertailut eivät enää ole täysin ajantasaisia. Alla kuvassa 12 esitetään hajautettuja energiantuotantotapoja, jotka puolestaan kuuluvat laajempaan *hajautettujen energiavarojen* käsitteeseen. Kuvissa 12–14 yhteistuotannolla tarkoitetaan lämmön ja sähkön yhteistuotantoa.



Kuva 12 Hajautetut energiavarat (mukaillen: Akorede ym. 2010).

Yllä olevassa kuvassa esiintyvät polttomoottoritekniikkaan perustuvat hajautetut energiantuotantoteknologiat toimivat fossiilisten polttoaineiden lisäksi biopolttoaineilla tai biokaasulla. Stirlingmoottorien ja orgaaniseen Rankine-työkiertoon (ORC) perustuvien teknologioiden ”polttoaineiksi” soveltuvat lisäksi erilaiset hukkalämpövirrat tai esimerkiksi aurinkolämpö. (Alanne & Cao 2019.) Tarkempaa analyysiä hajautetuista energiantuotantotavoista esittävät esimerkiksi Akorede ym. (2010), Alanne & Cao (2019) sekä Lund ym. (2015). Kyseisissä tutkimuksissa esitetään myös kattavasti suorituskykyparametreja hajautetuille energiantuotanto- ja varastointiteknologioille.

Kuvassa 13 esitetään keskitettyjä energiantuotantotapoja. Kuten aiemmin mainittiin, alueelliseksi energiantuotannoksi voidaan ajatella tietyiltä osin lukeutuvan myös alueen fyysisen rajan ulkopuolella sijaitsevaa energiantuotantoa, vaikkakin tämä on jokseenkin tulkinnanvaraista. Varsinkin uusiutuviin energiavirtoihin perustuvat keskitetyt energiantuotantotavat (esimerkiksi suuret tuulivoimapuistot) kannattaakin sijoittaa alueille, joissa niiden tuotantopotentiaali on maksimaalinen ja maankäytöllinen vaihtoehtokustannus on minimaalinen (olettaen, että energian siirtäminen ei aiheuta merkittäviä häviöitä tai muita haittoja).



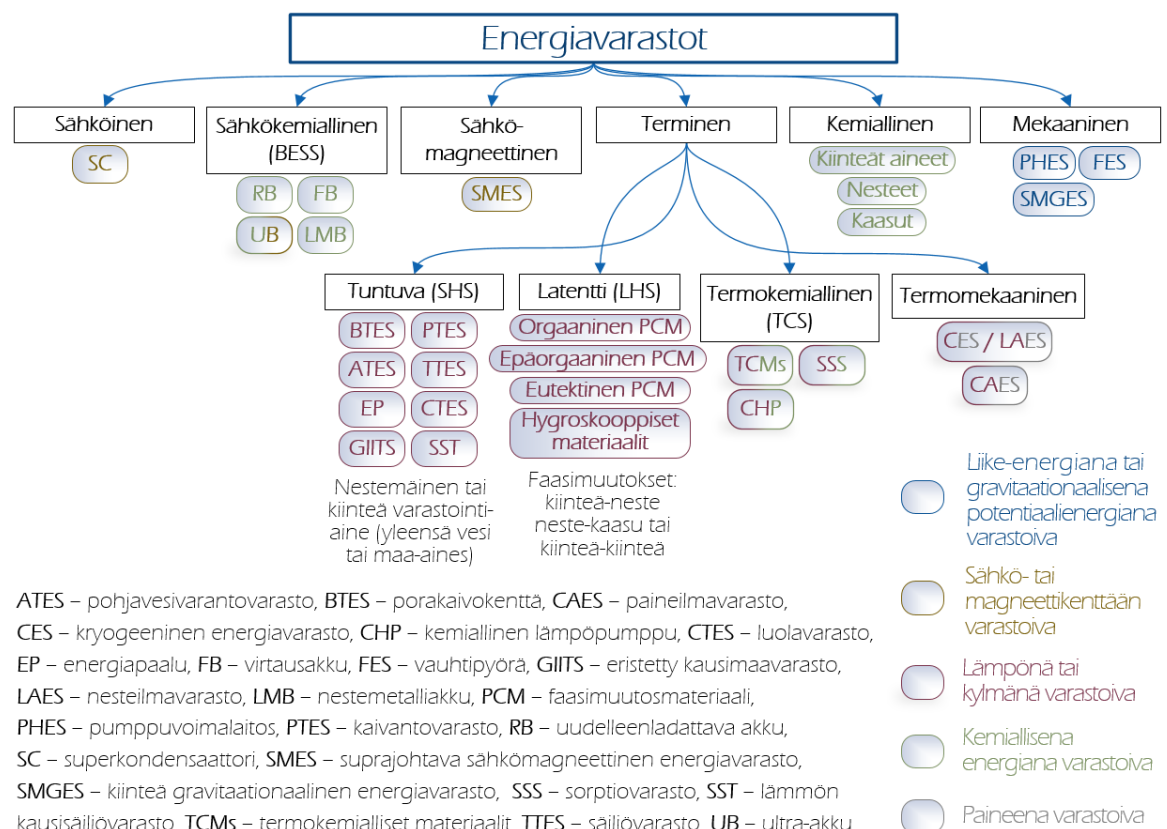
BCP – binäärikiertovoimala, BR – hyötöreaktori, CCHP – kolmoistuotanto, CHP – yhteistuotanto, CPV – keskittävä aurinkokenno, CSHp – aurinkolämpölaitos, CST – keskittävä lämpösähköinen generaattori, DSP – kuivahöyryvoimala, DTP – dynaaminen vuorovesivoima, EGS – tehostettu geoterminen järjestelmä, ET – erillistuotanto, FSP – leimuhöyryvoimala, Gen IV – neljännen sukupolven reaktorit, HWR – raskasvesireaktori, LFR – Fresnel-levykeräin, LWR – kevytvesireaktori, PDC – parabolinen lautaskeräin, PTC – parabolinen kourukeräin, PVp – aurinkovoimala, PVTp – hybridikeräinvoimala, SPT – aurinkoenergiatorni, SUT – aurinkotorni, TSG – vuorovesivirtageneraattori, TB – vuorovesipato, TL – vuorovesilaguuni

Soveltuu yhteistuotantoon  
 Vain sähkötuotanto  
 Vain lämmöntuotanto  
 Lämmön- ja/tai kylmäntuotanto  
 Sähkön- tai lämmöntuotanto

Kuva 13 Keskitetyt energiantuotantotavat.

Yllä esitetty erottelu hajautettujen ja keskitettyjen energiantuotantoteknologioiden välillä ei ole kaikkien teknologioiden osalta täysin ehdoton, vaan esimerkiksi keskittäviä aurinkovoimaratkaisuja ja suuren kapasiteetin lämmönvaihtimia voidaan toteuttaa myös hajautetusti. Kuvissa 12 ja 13 on pyritty tyhjentävän teknologialistauksen sijaan tunnistamaan eri energiantuotantotavat ja luokittelemaan ne mahdollisimman intuitiivisella tavalla. Tuotantotapojen alle on koottu tyypillisimpiä teknisesti kypsiä tai lähes kypsiä teknologioita (tai teknologioiden yläkategorioita) jaotellen ne tuottamansa energiavektorin tai energiavektorien mukaan. Tämä jaottelu on tehty teknisestä näkökulmasta, mutta on huomioitava, että joidenkin teknologioiden kohdalla saattaa olla lisäksi muitakin kuin teknisiä rajoitteita. Esimerkiksi ydinvoiman kohdalla erilaiset säädökset voivat rajoittaa yhteistuotannon hyödyntämistä.

Energiantuotantoteknologioiden valinnassa huomioitavia asioita ovat muun muassa niiden investointi- ja käyttökustannukset, ympäristö- ja terveysvaikutukset (esimerkiksi hiukkaspäästöt, värinä- ja meluongelmat), turvallisuus, toimintavarmuus, huoltotarve, tilantarve, käyttöikä, hyötysuhde, maksimi- ja minimiteho, tehonmuutosherkkyys ja säädettävyys, suorituskyky osateholla (jos osatehoajo on mahdollista), modulaarisuus, yhdistettävyys muihin järjestelmiin, sammuttamisen ja uudelleenkäynnistämisen helppous ja nopeus, esteettisyys ja EROEI-arvo. Polttoaineita käyttävien tuotantoteknologioiden kohdalla on lisäksi huomioitava polttoaineen saatavuus ja omavaraisuus sekä polttoaineen jakeluketjun edellytykset ja ympäristövaikutukset. (Akorede ym. 2010; Lund ym. 2015.) Alla kuvassa 14 esitetään energian varastointitapoja ja -teknologioita.

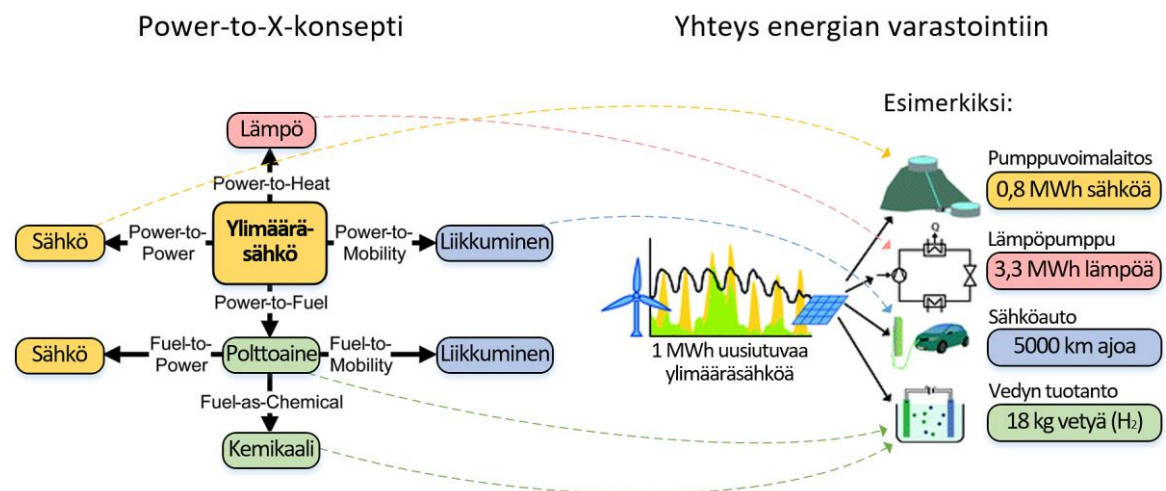


Kuva 14 Energian varastointitavat.

Energiavarastot voidaan energiantuotantotapoja vastaavasti jaotella hajautettuihin ja keskitettyihin energiavarastoihin, vaikka tämä ei olekaan tyypillinen jaottelu niiden kohdalla. Ha-

jautetuiksi energiavarastoiksi voidaan mieltää esimerkiksi rakennuksien lämminvesivaraajat, rakennuksien terminen massa, sähköverkkoon kytkettävissä olevat ajoneuvot (engl. *plug-in electric vehicles*), energianjakelujärjestelmä (erityisesti lämpö- ja kaasuverkot) ja kaikki pienen kapasiteetin energian varastointitekniologiat (esimerkiksi pellettivarastot ja sähköakkujärjestelmät). Suuren kapasiteetin energiavarastot voidaan puolestaan mieltää keskitetyiksi energiavarastoiksi (esimerkiksi laaja porakaivokenttä tai pumppuvoimalaitos).

Yllä kuvassa 14 energiavarastot on luokiteltu energiavaraston energiamuodon mukaan: esimerkiksi pumppuvoimalaitos lukeutuu gravitaationaalisiin potentiaalienergiavarastoihin eikä sähkövarastoihin. On kuitenkin huomioitava, että energian varastointi perustuu usein energiamuunnoksiin. Siinä tapauksessa energiavarasto voidaan luokitella myös siihen syötettävän energiamuodon perusteella varaston oman energiamuodon sijasta. Esimerkiksi pumppuvoimalaitos olisi tästä näkökulmasta tarkasteltuna pikemminkin sähkövarasto kuin gravitaationaalinen potentiaalienergiavarasto, sillä se muuntaa (ylimääräistä) sähköenergiaa gravitaationaaliseksi potentiaalienergiaksi pumppujen avulla. Ylimääräsähkön muuntaminen toiseksi energiamuodoksi onkin uusiutuvassa energialähteessä erityisen hyödyllinen varastointimenetelmä, sillä monet uusiutuvat energialähteet muunnetaan suoraan sähköksi (ks. kuvat 12 ja 13), mutta sähköä ei juurikaan voida sellaisenaan varastoida (superkondensaattoria lukuun ottamatta). Ylimääräsähkön muuntamista toiseksi energiamuodoksi kutsutaan Power-to-X-konseptiksi (P2X). P2X-konsepti on osa kokonaisvaltaisesti integroitua energialähteen, mutta toisaalta se on myös vahvasti yhteydessä energian varastointiin. (Bloess ym. 2018; Lund ym. 2015; Sternberg & Bardow 2015.) Kuvassa 15 havainnollistetaan P2X-konseptia ja sen yhteyttä energian varastointiin.



Kuva 15 Power-to-X-konseptin yhteys energian varastointiin. Kuvan oikeassa reunassa esitetyt esimerkkiarvot ovat suuntaa antavia. (Muokattu: Sternberg & Bardow 2015.)

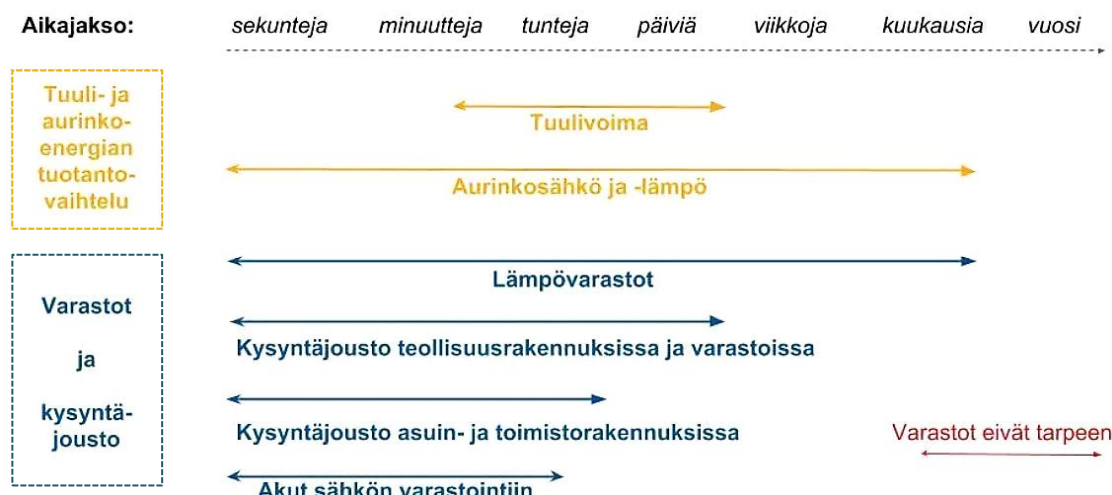
Energiavarastojen hyötysuhteena käytetään niin kutsuttua round-trip-hyötysuhdetta (engl. *round-trip efficiency*). Round-trip-hyötysuhde ottaa huomioon kaikki energian varastointiprosessissa tapahtuvat energiamuunnokset. Esimerkiksi pumppuvoimalaitoksen round-trip-hyötysuhde koostuu sähköön muunnoksesta ensin gravitaationaaliseksi potentiaalienergiaksi ja sen jälkeen potentiaalienergian muunnoksesta takaisin sähköksi, jolloin pumppuvoimalaitoksen round-trip-hyötysuhteeksi muodostuu tyypillisesti 70–85 %. Varsinkin sähköisissä, sähkökemiallisissa, termisissä ja liike-energiaan perustuvissa varastointitavoissa on round-trip-hyötysuhteen lisäksi huomioitava myös energiavaraston ominaisenergiahäviöt (engl. *self-discharge losses*). Esimerkiksi energiatehokkaan vauhtipyörän ominaisenergiahäviöt



ovat noin prosentin verran varastoidusta energiasta tunnissa ja energiatehokkaan sähköakun noin 0,1 % vuorokaudessa (virtausakuilla on lähes olemattomat ominaisenergiahäviöt). (Alanne & Cao 2019; Lund ym. 2015; Sternberg & Bardow 2015.) Tuntuvien termisten lämpövarastojen ominaisenergiahäviöt vaihtelevat suuresti riippuen energiavaraston muodosta (pinta-alan ja tilavuuden suhteesta), lämpötilasta ja lämmönsiirtymiskertoimesta. Mitä suurempia ovat pinta-ala, lämpötilaero ja lämmönsiirtymiskerroin lämpövaraston ja ympäristön välillä, sitä suuremmat ovat sen ominaisenergiahäviöt. Lämmönsiirtymiskerrottua voidaan pienentää eristämällä lämpövarasto hyvin. Eristeenä voi toimia esimerkiksi maa-aines, joka voi samalla muodostaa myös lämpövaraston varastointimassan (esimerkiksi porakaivokennissä). (Pinel ym. 2011.) Maahan upotetun tuntuvan kausilämpövaraston ominaisenergiahäviöt pienenevät ensimmäisten käyttövuosien aikana, kun lämpövaraston ympärille muodostuu vähitellen normaalia maaperää lämpimämpi rajavyöhyke (Honkonen 2016; Socaciu 2012).

Round-trip-hyötysuhteen ja ominaisenergiahäviöiden lisäksi energian varastointitapojen valinnassa huomioitavia asioita ovat muun muassa niiden investointi- ja käyttökustannukset, energia- ja tehotiheys (tilavuutta kohden) sekä ominaisenergia ja -teho (massaa kohden) eri olosuhteissa, turvallisuus, tilantarve, modulaarisuus, siirrettävyys (jos tarvetta siirtämiselle), materiaalien ja itse varaston ympäristövaikutukset; materiaalien saatavuus, omavaraisuus ja ehtyvyys; pitkän aikavälin suorituskyky (esimerkiksi porakaivokenttien ja sähköakkujen kohdalla) ja ESOEI-arvo. Monet energiavarastot ovat lisäksi riippuvaisia ympäristön soveltuvuudesta kyseiselle varastointitavalle (esimerkiksi maanalaiset lämpövarastot ja pumppuvoimalaitokset), mikä on otettava aina tapauskohtaisesti huomioon. (Lund ym. 2015; N'Tsoukpoe ym. 2009; Sternberg & Bardow 2015.) Sähkökemiallisissa varastointitavoissa myös syklinen elinikä (engl. *cycle life*) ja purkausyvyys (engl. *depth of discharge*) ovat olennaisia parametreja (Lund ym. 2015).

Energian optimaalinen varastoiminen on kysyntäjoustop ohella olennainen toimenpide energiamurroksessa kohti uusiutuvia energijärjestelmiä. Kuvassa 16 havainnollistetaan, kuinka energiavarastoilla ja kysyntäjoustoplla voidaan tasapainottaa vaihtelevaa uusiutuvaa energiantuotantoa eri aikaväleillä. (Rinne ym. 2018.)



Kuva 16 Energiavarastojen ja kysyntäjoustop soveltuvuus vaihtelevan uusiutuvan energian tasapainottamiseen eri aikaväleillä (Rinne ym. 2018).

Energiantuotanto- ja varastointitapojen valitsemisen lisäksi alueelliseen energiasuunniteluun kuuluu alueen energianjakelun toteutustavan valitseminen. Periaatteessa tiheään asutulle alueelle kannattaa pyrkiä rakentamaan kattavat älykkäät energiaverkot (sähköverkko, lämpö- ja kylmäverkko sekä kaasuverkko), koska tällä tavalla mahdollistetaan sekä keskitehty energiantuotannon että hajautettujen energiavarojen optimaalinen hyödyntäminen ja alueellisen tason energiavirtojen maksimaalinen kierrättäminen (ts. älykäs integroitu energiajärjestelmä, ks. luku 3.1.1). (Hong ym. 2016; Keirstead & Shah 2013.) Tämä ei välttämättä kuitenkaan päde harvaan asutulla tai rajoitetusti eri energiavektoreita hyödyntävällä alueella, sillä energiaverkot (erityisesti lämpöverkot) tarvitsevat riittävän energiankysynnän tiheyden, jotta niistä saadaan suurin hyöty. Käytännössä energiaverkkojen rakentamiselle voi olla myös muita esteitä, kuten liian suuret investointikustannukset. Investointi- ja huoltokustannuksien lisäksi energiaverkkojen suunnittelussa on yleisesti otettava huomioon ainakin niiden luotettavuus, turvallisuus, huollettavuus, käyttöikä, tilantarve, ympäristövaikutukset, rakenteellinen kestävyys ja esteettisyys. (Keirstead & Shah 2013; Lund ym. 2014.)

Energiaverkkojen älykkyyden tason ohella eri energiavektorien verkoilla on kullakin omat toteutusvaihtoehdot, jotka voivat vaikuttaa alueellisen energiaoptimoinnin lopputulokseen. Esimerkiksi sähköverkoissa on mahdollista käyttää maa- tai ilmakaapelointia, jotka eroavat toisistaan muun muassa tilantarpeen, luotettavuuden ja investointi- sekä huoltokustannuksien osilta – tosin varsinkin taajama-alueilla maakaapelointi on jo hyväksi todettu vakiintunut tapa (Ala-Kokko 2018). Kaasuverkkojen toteutusvaihtoehdot liittyvät esimerkiksi verkostoon soveltuvien kaasuseoksien, painetasojen ja putkien halkaisijoiden määrittämiseen, joilla voidaan muuttaa kaasuverkon varastointikapasiteettia ja integroituvuutta uusiutuviin energiajärjestelmiin (Dehaeseleer ym. 2015). Lämpöverkon toteutusvaihtoehdot liittyvät kiertovesiputkien suunnitteluvaihtoehtoihin (esimerkiksi asettelun ja materiaalivalinnan osalta) sekä lämpöverkon virtaaman ja lämpötilatason määrittämiseen (Aitkaliyev 2017). Lämpöverkon lämmityskapasiteettia ja -tehoa voidaan muuttaa kiertoveden lämpötilaa ja virtaaman suuruutta säätämällä. Lämpöverkoissa kannattaa pyrkiä saavuttamaan mahdollisimman suuri lämpötilaero meno- ja paluuveden välille mahdollisimman matalalla menoveden lämpötilalla. Kun kiertovesiputken siirtohäviöt lisäksi minimoidaan, tarkoittaa tämä rakennuksissa tapahtuvan hyödyllisen lämmönsiirron maksimointia. (Gadd & Werner 2014; Lund ym. 2014.) Periaatteessa suuri lämmitysteho on mahdollista saavuttaa myös pienellä meno- ja paluuveden lämpötilaerolla suurentamalla lämpöverkon virtaamaa. Tämä ei kuitenkaan ole monessakaan mielessä edullista. Virtaaman suuruuden kasvaessa verkostossa tapahtuvat painehäviöt nousevat merkittävästi. Suuri virtaama vaatii myös suuremmat kiertovesiputket ja enemmän pumppaustehoa, mikä nostaa sekä lämpöverkon investointi- että käyttökustannuksia. Suuremmilla kiertovesiputkilla on lisäksi suuremmat siirtohäviöt (lämpöhäviöt), koska niillä on pienempiä putkia enemmän lämmönsiirtopinta-alaa maata vasten. (Aitkaliyev 2017; Gadd & Werner 2014.) Lämpöverkon lämpötilalla on erityisen suuri merkitys alueellisessa energiaoptimoinnissa, koska sillä on merkittävä suora vaikutus alueellisen energiaoptimoinnin lopputulokseen muun muassa teknologiavalintojen osalta (Ommen ym. 2016; Østergaard & Andersen 2016). Voidaan tunnistaa kaksi toisistaan periaatteellisesti eroavaa lähestymistapaa, joilla lämpöverkon kiertoveden lämpötilaa voidaan madaltaa: loppukäytön lämpötilavaatimuksen madaltaminen tai vaihtoehtoisesti lämpötilan nostaminen loppukäyttäjien läheisyydessä esimerkiksi kiinteistökohtaisesti. Loppukäytön lämpötilavaatimusta voidaan madaltaa vähentämällä rakennuksien lämmitystehontarvetta (esimerkiksi lisäeristyksillä tai uudisalueilla rakentamalla matalaenergiataloja), lisäämällä rakennuksien lämmönsiirtopinta-alaa (esimerkiksi lattia- tai seinälämmityksellä) ja parantamalla lämmi-

tyslaitteiden hyötysuhdetta sekä lämmönsiirtymiskerrointa (modernit ja hyväkuntoiset lämmityslaitteet). Nämä asiat madaltavat erityisesti rakennuksien tilalämmityksen lämpötilavaatimusta, mutta eivät juurikaan lämpimän käyttöveden lämpötilavaatimusta. (Lund ym. 2014; Ommen ym. 2016.) Lämpimän käyttöveden lämpötilan alaraja on tyypillisesti noin 55 °C (legionellatartuntojen ehkäisemisen takia), mutta rakenteeltaan tai käyttökatkosten suhteen ongelmallisissa lämminvesijärjestelmissä käyttöveden lämpötilavaatimus voi olla jopa 65 °C (THL 2019). Uusissa matalaenergiarakennuksissa tilalämmityksen lämpötilavaatimus voi olla jopa alle 40 °C, mutta vanhoissa heikommin eristetyissä ja pinta-alaltaan pienemmillä lämmönvaihtimilla varustetuissa rakennuksissa tilalämmityksen lämpötilavaatimus voi olla merkittävästi korkeampikin (Lund ym. 2014; Ommen ym. 2016). Kiinteistökohtaisia lämpötilan nostamisen ratkaisuja tarkastellaan jäljempänä.

Nykyisiä, kolmannen sukupolven, kaukolämpöverkkoja matalalämpötilaisempia lämpöverkkoja kutsutaan matalalämpöverkoiksi (LTDH) (Yang ym. 2016). Matalalämpöverkot sisältyvät puolestaan laajempaan, neljännen sukupolven kaukolämpöverkkojen (4GDH) konseptiin. Lund ym. (2014) määrittävät neljännen sukupolven kaukolämpöverkon olevan nykyistä kaukolämpöverkkoa matalalämpötilaisempi älykäs lämpöverkko (meno- ja paluuviesien lämpötilat esimerkiksi ~50/20 °C), joka soveltuu erityisen hyvin osaksi uusiutuvia integroituja energijärjestelmiä. Lämpöverkon rakenteen osalta 4GDH-konseptiin kuuluu hyvin eristetyt kaksoisputkijärjestelmät (engl. *twin pipes*) ja silmukkatopologia (engl. *loop layout*). Lämpöverkon älykkyyteen liittyvien etujen lisäksi (ks. luku 3.2.1) kiertoveden matala lämpötila mahdollistaa neljännen sukupolven lämpöverkoille monia etuja verrattuna nykyisiin kaukolämpöverkkoihin: merkittävästi pienemmät siirtohäviöt, lämpöverkkoon yhdistettyjen lämpöpumppujen ja aurinkokeräinten paremman suorituskyvyn, yhteistuotantolaitosten sähköntuotannon korkeamman hyötysuhteen ja hajautettujen energiavarojen (esimerkiksi hukkalämpövirtojen, *geoenergian* ja lämpövarastojen) paremman hyödynnettävyyden. Matalalämpöverkkojen eduiksi voidaan lisäksi mainita parempi turvallisuus ja huollettavuus (kiertovedellä matalampi lämpötila ja paine), vähäisempi kiertovesiputkien lämpölaajeneminen, pienempi riski kiertoveden kiehumiselle ja mahdollisuus käyttää kiertovesiputkissa teräksen sijasta muitakin materiaaleja. (Lund ym. 2014.) Kuten edellä mainittiin, erittäin matalalämpötilaisissa lämpöverkoissa saatetaan kuitenkin tarvita kiinteistökohtaisia tehostelämpöpumppuja (engl. *booster heat pumps*) tai sähkövastusjärjestelmiä nostamaan rakennuksen oman kiertoveden lämpötila lämpimän käyttöveden vaatimalle tasolle – vanhoissa rakennuksissa mahdollisesti myös tukemaan tilalämmitystä (Ommen ym. 2016). Ommen ym. (2016) väittävät, että 65–70 °C olisi optimaalinen lämpötila kaukolämpöverkon menovedelle, koska siten minimoitaisiin verkoston lämpöhäviöt ja maksimoitaisiin hajautettujen energiavarojen hyödyntämismahdollisuudet ilman tarvetta kiinteistökohtaisille lämpimän käyttöveden lisälämmityslaitteille. On kuitenkin huomioitava, että tämä on yleisesti hyväksytyn totuuden sijasta pikemminkin kiistelyn alainen asia. Esimerkiksi Lund ym. (2014) esittävät, että käyttöveden tuottamiseen ilman lisälämmitystarvetta saattaisi riittää lämpötilaltaan 45–55 °C oleva kaukolämmön menovesi tietyillä teknisillä toimenpiteillä kiinteistöissä. Yang ym. (2016) puolestaan esittävät, kuinka 45 °C:sen matalalämpöverkon (menoveden lämpötila) ja kiinteistökohtaisten älykkäiden sähköisten lisälämmitysjärjestelmien yhdistelmällä voitaisiin energiatehokkaasti ja turvallisesti tuottaa lämmintä käyttövettä (tilalämmityksen toteutus ilman lisälämmitysjärjestelmiä). Østergaard & Andersen (2016) päätyvät vastaavanlaiseen lopputulokseen matalalämpöverkon ja tehostelämpöpumppujen yhdistelmän osalta. Neljännen sukupolven matalalämpöverkot on mahdollista liittää olemassa oleviin kolmannen sukupolven kaukolämpöverkkoihin modulaarisella tavalla vastaavalla

periaatteella kuin olemassa olevaan sähköverkkoon liitettävissä olevat älykkäät mikroverkot (ks. luku 3.2.1) (Ommen ym. 2016).

Kirjallisuustutkimuksen perusteella voidaan todeta, että lämpöverkoissa kannattaa pyrkiä mataliin lämpötiloihin ja maksimoida rakennuksissa tapahtuva hyödyllinen lämmönsiirto. Siitä ei kuitenkaan ole selvää yhteisymmärrystä, onko suotuisaa laskea lämpöverkon menoveden lämpötilaa loppukäytön korkeinta lämpötilavaatimusta matalammaksi (uusissa asuinrakennuksissa lämpimän käyttöveden lämpötilavaatimus). Lisälämmityslaitteiden suurimmat ongelmallisuudet liittyvät investointikustannuksiin ja sähkön lisääntyvään tarpeeseen sekä siihen mahdollisesti kytköksissä oleviin päästöihin (Ommen ym. 2016). Uusiutuvasa energiajärjestelmässä sähkö tuotetaan päästöttömästi, jolloin lämpimän käyttöveden lisälämmityslaitteiden ongelmaksi muodostuu pääasiassa enää investointikustannukset. Näin ollen voidaan tehdä johtopäätös, että kestävään energiajärjestelmään pyrkiessä lämpöverkon meno- ja paluuviesien lämpötilat olisi suotuisaa madaltaa ainakin tilalämmitystarvetta vastaavaksi, mikä tarkoittaa matalaenergiataloista koostuvilla uudisalueilla ohjeellisesti ~50/20 °C lämpötiloja meno- ja paluuviesille. Tämä johtaisi aluetasolla lämpösektorin osalta parempaan energia- ja eksergiatehokkuuteen samalla tukien uusiutuviin energiajärjestelmiin siirtymistä. Lämpöverkon lämpötilan madaltamisen taloudellista arvoa on vaikea arvioida yleisellä tasolla energiajärjestelmien monimutkaisuuden ja erilaisuuksien takia, mutta suuntaa antavasti Gadd & Werner (2014) mainitsevat lämpöverkon paluuviesien lämpötilan madaltamisen 1 °C:lla johtavan systeemitasolla 0,05–0,5 €/MWh suuruiseen rahalliseen säästöön. Yllä esitettyä johtopäätöstä tukee myös se, että tulevaisuuden uusiutuviin energiajärjestelmiin visioituissa (ja hiljattain jo rakenteilla olevissa) viidennen sukupolven yhdistetyissä kaukolämpö- ja kylmäverkoissa (5GDHC) menoveden lämpötilan on esitetty olevan lähes samanlämpöistä kiertovesiputkia ympäröivän maaperän kanssa (Buffa ym. 2019). Taulukossa 4 esitetään vielä yhteenveto kaukolämpöverkkojen kehityksestä.

*Taulukko 4 Kaukolämpöverkkotyypit (Buffa ym. 2019; Lund ym. 2014).*

| Lämpöverkon tyyppi    | Vuosi      | Lämmönsiirtoaine       | Menoveden lämpötila (°C) | Kytkeä lämmitysjärjestelmään            |
|-----------------------|------------|------------------------|--------------------------|---|
| 1. sukupolven         | 1880–1930  | paineistettu vesihöyry | < 200                    | suora                                   |
| 2. sukupolven         | 1930–1980  | paineistettu vesi      | > 100                    | suora tai epäsuora                      |
| 3. sukupolven         | nykyinen   | paineistettu vesi      | 65–115                   | suora tai epäsuora                      |
| 4. sukupolven (4GDH)  | 2020–2050? | vesi                   | 30–70                    | epäsuora ja/tai tehostettu <sup>a</sup> |
| 5. sukupolven (5GDHC) | 2050? →    | vesi tai suolaliuos    | -5–35                    | tehostettu                              |

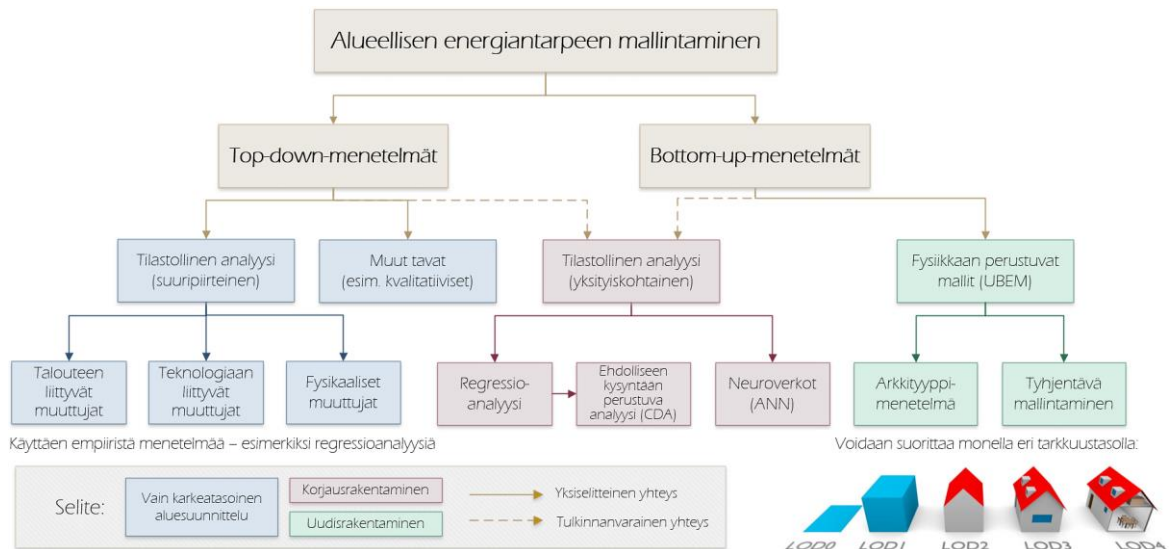
<sup>a</sup> kiinteistökohtaiset tehostelämpöpumput tai muut lisälämmitysjärjestelmät

### 3.2.4 Alueellisen energiajärjestelmän mallintaminen

Mallintaminen tarkoittaa todellisuuden jäljittelemistä jonkin tietyn tai joidenkin tiettyjen näkökulmien kautta. Tietokonemallintamisen (tästä eteenpäin: mallintamisen) tuotosta eli tietokonemallia (tästä eteenpäin: mallia) voidaan *simuloida*, mikä mahdollistaa eri suunnitteluvaihtoehtojen analysoimisen ja vertailemisen välttämällä oikeassa maailmassa tapahtuvaa yrityksen ja erehdyksen (engl. *trial and error*) kautta oppimista. Mallia simuloimalla voidaan tehdä myös perusteltuja ennustuksia tulevaisuudesta. (Frigg & Hartmann 2012.) Koska malli on aina kuitenkin vain kuvaus todellisuudesta (esimerkiksi matemaattinen kuvaus), liittyy siihen yksinkertaisuuksia ja epävarmuutta. Mitä suurempaa ja monimutkaisempaa systeemiä

mallinnetaan, sitä enemmän mallin epävarmuus lisääntyy, ja yleensä tällaisten systeemien mallintamisessa joudutaan tekemään myös enemmän yksinkertaistuksia. Vastaava lainalaisuus on tyypillisesti tulevaisuuden simuloinnissa: pidemmälle tulevaisuuteen menevät simuloinnit ovat epävarmempia. (Frigg & Hartmann 2012; Muehleisen & Bergerson 2016.) Energiajärjestelmät ovat erittäin monimutkaisia systeemejä, varsinkin edistykselliset uusiutuvat energiajärjestelmät, minkä lisäksi energiajärjestelmiin liittyvä päätöksenteko vaatii usein jopa kymmenien vuosien päähän tehtäviä ennustuksia. On siis varsin selvää, että energiajärjestelmien mallintaminen ei ole suoraviivainen tehtävä, eikä siihen siksi ole myöskään olemassa yksiselitteisen tyhjentävää ja kokonaisvaltaista tapaa. Tietotekniikan kehittyminen on kuitenkin tuonut paljon uusia mahdollisuuksia energiajärjestelmien mallintamiseen samalla, kun energiamurros lisää tarvetta yhä edistyksellisemmille dynaamisille energiajärjestelmämalleille (Remmen ym. 2018). Tässä luvussa ei syvennytä energiajärjestelmämallien matemaattiseen muotoilemiseen, vaan esitetään ja luokitellaan energiajärjestelmien mallintamisen lähestymistapoja tuoden samalla esille alueelliseen energiamallintamiseen soveltuvia työkaluja. Lisäksi pohditaan urbaanin ympäristön erityispiirteitä, jotka tulisi ottaa energiajärjestelmän mallintamisessa huomioon. Esimerkiksi Ghorab (2019), Haikarainen ym. (2019), Han & Kim (2019), Keirstead & Shah (2013) ja Niemi ym. (2012) esittävät yhtälötasolla esimerkkejä energiajärjestelmän matemaattisesta mallintamisesta, joita mukailemalla on mahdollista luoda täysin räätälöity matemaattinen energiajärjestelmän malli – varsinaiset mallintamis- ja simulointityökalut eroavat itse luodusta matemaattisesta mallista periaatteessa vain siten, että niihin on jo valmiiksi ohjelmoitu matemaattiset kuvaukset todellisuudesta (eli yhtälöt), jolloin työkalun käyttäjän tehtäväksi jää enää syöttää työkaluun sen sisältämien yhtälöiden tarvitsemat lähtötiedot.

Usein alueelliset energia-analyysit aloitetaan alueen (rakennuksien) energiantarpeen mallintamisella ja simuloinnilla, josta saadaan selville alueen tuntikohtaiset (tai muun aikavälin) energiankulutusprofiilit energiamuodoittain. Alueellisen energiantarpeen simuloinnin luotettavuudella on äärimmäisen suuri vaikutus koko alueellisen energia-analyysin luotettavuuteen. (Ferrari ym. 2019; Pickering & Choudhary 2019.) Alueellisen energiantarpeen mallintamisessa voidaan soveltaa niin kutsuttuja top-down- ja bottom-up-menetelmiä (ks. kuva 17). Nämä menetelmät eroavat toisistaan periaatteellisesti siten, että top-down-menetelmissä aluetta käsitellään ”ylhäältä katsottuna” yhtenä kokonaisuutena, jossa alueen energiantarve on usein jaoteltu vain käyttöluokittain (esimerkiksi liikenne, teollisuus, toimistorakennukset, julkiset rakennukset ja asuinrakennukset). Top-down-menetelmissä ei siis mallinneta yksittäisiä rakennuksia, eikä siten voida myöskään analysoida eksplisiittisesti yksittäisten rakennuksien vaikutusta koko alueen energiantarpeeseen. Bottom-up-menetelmät sen sijaan lähestyvät alueellisen energiantarpeen mallintamista yksityiskohtaisesti aloittaen ”alhaalta” yksittäisen rakennuksen tai laitteiston mallintamisesta, mikä skaalataan aluetasolle tai vaihtoehtoisesti alueen jokainen rakennus mallinnetaan tyhjentävästi erikseen (engl. *whole city model*). (Wenliang ym. 2017.) Alueellisen energiantarpeen mallintamisessa on mahdollista hyödyntää myös samanaikaisesti sekä top-down- että bottom-up-menetelmien periaatteita (Baynes & Wiedmann 2012). Moresinon & Fragnièren (2018) mukaan kokonaisvaltaisessa energiajärjestelmien mallintamisessa, jossa pyritään mallintamaan teknisten näkökulmien lisäksi sosiaaliset ja taloudelliset näkökulmat, vallitsee laaja akateeminen yhteisymmärrys bottom-up- ja top-down-menetelmien yhdistämisen eli niin kutsutun hybridimallintamisen (engl. *hybrid energy model*) eduista. Esimerkiksi rakennuksien energiatehokkuutta parantavan uuden teknologian vaikutus ja leviäminen energiajärjestelmässä, kuten energiatehokkaampien valaisimien ilmestyminen markkinoille, on hyvä esimerkki hybridimallintamiselle soveltuvasta mallintamisongelmasta (Keirstead & Shah 2013; Moresino & Fragnier 2018).



Kuva 17 Alueellisen energiantarpeen mallintaminen. Värikoodeilla esitetty luokittelu ei ole luonteeltaan ehdoton. (Luokittelut mukailten: Wenliang ym. 2017; LOD-havainnollistus oikealla alareunassa: Weiler ym. 2019).

Top-down-menetelmillä saadaan suuripiirteisiä tuloksia, jotka perustuvat aiemmista havainnoista muodostettuihin riippuvuussuhteita kuvaaviin malleihin eli toisin sanoen mitattuun tai tilastoituun dataan (engl. *data-driven modeling*). Top-down-mallit luodaan empiirisillä menetelmillä, joissa suuresta joukosta havaintoja muodostetaan yksinkertaistettu ennustava tilastollinen malli (ts. matemaattinen funktio). (Wenliang ym. 2017.) Esimerkiksi Nesbakken (1998) muodostaa aiempiin havaintoihin perustuvalla empiirisellä tavalla ekonometrisen mallin, joka kuvaa Norjan rakennuksien lämmitystarpeen riippuvuutta lämmityksen toteutustavasta. Tutkimuksessa havaitaan myös läheinen riippuvuussuhde energiantarpeen, palkkatason ja energian hinnan välille. Top-down-menetelmät ovatkin erityisen hyödyllisiä, kun halutaan saada tietoa tutkittavan (jo olemassa olevan) systeemin keskimääräisestä vasteesta valitulle muuttujalle. Top-down-menetelmät ovat tyypillisesti myös suhteellisen yksinkertaisia, vähän syöttötietoja vaativia ja nopeasti suoritettavia analyysejä mutta kuitenkin aina riippuvaisia olemassa olevan informaation saatavuudesta ja luotettavuudesta. (Wenliang ym. 2017.) Top-down-menetelmät eivät sovellu energijärjestelmän yksityiskohtaiseen analysointiin eivätkä myöskään eksplisiittisesti uudisalueiden energiantarpeen mallintamiseen, vaikka uudisrakentamisessa onkin mahdollista tehdä epäsuoria päätelmiä top-down-menetelmien tuloksiin perustuen (Moresino & Fragnière 2018). Yksinkertainen esimerkki top-down-menetelmästä uudisalueen energiantarpeen mallintamisessa voisi olla seuraava: tunnistetaan uudisaluetta vastaava jo olemassa oleva alue, selvitetään olemassa olevan alueen kerrosneliömetrit ja mitataan sen energiantarve, lasketaan näiden perusteella olemassa olevan alueen keskimääräinen energiantarve kerrosneliömetriä kohden, muodostetaan energiantarpeen funktio kerrosneliömetreille ja päätellään lopuksi tämän funktion perusteella tulevan uudisalueen energiantarve olettamalla, että funktio soveltuu myös tulevan uudisalueen energiantarpeen määrittämiseen.

Alueellisen energiantarpeen mallintamisen bottom-up-menetelmät voidaan jakaa tilastollisiin ja fysiikkaan perustuviin menetelmiin. Yllä kuvassa 17 punaisella värillä esitetyt bottom-up-tilastolliset menetelmät vastaavat muuten top-down-menetelmiä, mutta ne ovat yksityiskohtaisempia käyttäen tyypillisesti yksittäisten rakennuksien tai laitteiden energianku-

lutustietoja, minkä vuoksi niiden perusteella voidaan tehdä päätelmiä yksittäisiin rakennuksiin tai laitteisiin tehtävistä toimenpiteistä. (Wenliang ym. 2017.) Tilastollisissa bottom-up-menetelmissä (ja top-down-menetelmissä) voidaan hyödyntää regressioanalyysiä (Perez ym. 2017), regressioanalyysiin perustuvaa ehdollisen kysynnän metodia (CDA) (Tiedemann 2007) ja tekoälyyn perustuvia metodeja, kuten neuroverkkoja (ANN) (Neto & Fiorelli 2008). Aydinalp-Koksal & Ugursal (2008) vertailevat arkkityyppimenetelmää (käsitellään myöhemmin), ehdollisen kysynnän metodia ja neuroverkkoja olemassa olevan rakennuskannan energiantarpeen mallintamisessa ja toteavat, että näillä kaikilla menetelmillä voidaan riittäväällä tarkkuudella mallintaa ja ennustaa aluetasolla rakennuksien energiantarvetta, mutta kaikilla tavoilla on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Yllä kuvassa 17 vihreällä värillä merkityt bottom-up-mallit perustuvat rakennuksien fysikaalisten ja erityisesti termodynaamisten ominaisuuksien ja ilmiöiden mallintamiseen (engl. *physics-based modeling*). Fysiikkaan perustuvat rakennuksien energiamallit eivät tarvitse lähtötiedokseen rakennuksien aiempaa energiantarvetta, vaikkakin ne voidaan kalibroida ja validoida toteutuneen eli mitatun energiantarpeen avulla (uudisalueiden kohdalla eksplisiittisesti vasta rakennuksien valmistumisen jälkeen). Selvä ero fysikaalisten ja tilastollisten bottom-up-mallien välillä on se, että fysikaalisten mallien avulla voidaan eksplisiittisesti ja yksityiskohtaisesti tutkia eri suunnitteluvaihtoehtojen vaikutusta alueen energiantarpeeseen, vaikka rakennuksia ei olisi vielä olemassa (olettaen, että malli kuvastaa todellisuutta riittäväällä tarkkuudella). Huonoina puolina fysiikkaan perustuvissa malleissa on niiden suuri syöttötietojen määrä, mallintamisen vaikeus ja simuloinnin merkittävä laskentatehon tarve, jotka kaikki kuitenkin riippuvat mallin tarkkuudesta ja mallintamisen automatisoinnin laajuudesta. Fysiikkaan perustuvissa malleissa on myös haastavaa huomioida sosioekonomisia näkökulmia, mikä saattaa johtaa epärealistiseen todellisuuden mallintamiseen. Tämä puolestaan voi johtaa (oikeassa maailmassa) epäoptimaalisiin lopputuloksiin. Toisaalta mahdollisuus irrottaa malli täydellisesti sosioekonomisesta ympäristöstään voi olla tarpeesta riippuen myös hyödyllistä. (Moresino & Fragnière 2018; Wenliang ym. 2017.)

Aluetason tyhjentävään mallintamiseen (ts. bottom-up fysikaalinen mallintaminen, jossa alueen jokainen rakennus mallinnetaan erikseen) soveltuvia helposti lähestyttäviä ja avoimesti saatavilla olevia mallintamistyökaluja on varsin rajoitetusti (Dogan 2015; Ferrari ym. 2019; Heidarinejad ym. 2017; Shi ym. 2017). Joitakin edistyksellisiä pioneeriohjelmia on jo ilmestynyt (esimerkiksi CitySim, CityBES), mutta ne eivät uutuudestaan johtuen ole vielä täysin validoituja, muiden ohjelmien kanssa yhteensopivia ja helposti lähestyttäviä työkaluja. Lisäksi niissä on vielä kehitettävää muun muassa simuloinnin tarkkuuden, joustavuuden ja kokonaisvaltaisuuden osilta. (Mohammadi ym. 2013; Zheng ym. 2019.) Viime vuosien ohjelmistokehitykseen perustuen on kuitenkin odotettavissa, että aluetason tyhjentävät energiantarpeen mallintamistyökalut – tai yleisemmin aluetason energiamallintamisohjelmat – tulevat yleistymään ja kaupallistumaan avaten paljon uusia mahdollisuuksia aluetason energiasuunnitteluun (Dogan & Reinhart 2017). Keskeisessä asemassa tässä kehityksessä on tehokkaiden algoritmien (työkalujen) luominen, joilla voidaan muuntaa arkkitehdin IFC-malli tai kaupunkisuunnittelijan massoitusmalli automaattisesti energiamalliksi tai semanttiseksi CityGML-tietomalliksi sekä toisin päin (Dogan 2015; Dogan & Reinhart 2017; Mekawy ym. 2011). Automatisoitu energiamallien ja CityGML-mallien luominen puolestaan mahdollistaa alueen tyhjentävän energiantarpeen mallin automatisoidun luomisen heti suunnitteluprosessin alkuvaiheessa (CityGML-mallit voidaan muuntaa energiamalleiksi esimerkiksi CityBES-ohjelmalla). Vaikka automatisoituun alueellisten energiamallien luomiseen liittyvät menetelmät omaavat valtavan potentiaalin esimerkiksi mahdollistamalla kaupunkitai aluerakenteen parametrin energiasuunnittelun ja -optimoinnin (Dogan & Reinhart

2017), niin niiden yleistymistä hidastavat esimerkiksi kaupunkien tietomallintamisen puutteellinen standardointi ja helposti lähestyttävien työkalujen vähyys. On kuitenkin selvää, että kattavan ja vapaasti saatavan CityGML-tietomallin vakiintuminen aluesuunnittelussa olisi erittäin suotavaa, jotta eri ohjelmistoja voitaisiin hyödyntää saumattomasti yhdessä jo suunnitteluprosessin aikaisessa vaiheessa. (Hietanen & Kokko 2016; Mekawy ym. 2011.) Euroopassa CityGML on muodostumassa kaupunkien tietomallien standardiformaatiksi, ja esimerkiksi Helsingistä on vapaasti saatavissa suhteellisen kattava CityGML-tietomalli, jota olisi mahdollista jatkokehittää alueellista energiasuunnittelua (etenkin korjausrakentamista) yhä laajemmin tukevaksi työkaluksi (Helsingin kaupunki 2016; Schiefelbein ym. 2019).

Usein alueellisen energiantarpeen bottom-up-mallintamisessa sovelletaan tyhjentävän tavan sijasta kuitenkin niin kutsuttua arkkityyppimenetelmää (engl. *archetype modeling*) (Dogan & Reinhart 2017; Zheng ym. 2019). Arkkityyppimenetelmästä on esitetty lukuisia variaatioita (ks. esim. Davila ym. 2016; Heidarinejad ym. 2017; Heiple 2007; Schiefelbein ym. 2019), mutta lähtökohta arkkityyppimenetelmälle on ajatus siitä, että koko alueen rakennuskohtainen tyhjentävä mallintaminen on liian vaivalloinen, hidas ja laskentaintensiivinen menetelmä, jotta sitä voitaisiin hyödyntää aluetason energiasuunnittelussa tehokkaalla tavalla. Arkkityyppimenetelmässä mallinnetaan yleensä muutamista kymmeneen edustavia rakennuksia, joiden simuloinnilla saadut energiantarveprofiilit ekstrapoloidaan rakennuksien pinta-alan tai määrän mukaisesti vastaamaan koko aluetta. (Dogan 2015; Dogan & Reinhart 2017; Zheng ym. 2019.) Arkkityyppimenetelmä koostuu pääpiirteittäin kolmesta vaiheesta (olettaen, että rakennuksien arkkityyppimallit ovat jo olemassa), jotka ovat segmentointi (engl. *segmentation*) eli alueen rakennus- tai tilatyypikartoitus, karakterisointi (engl. *characterization*) eli arkkityyppimallien liittäminen segmentteihin ja kvantifiointi (engl. *quantification*) eli arkkityyppimallien energiantarveprofiilien ekstrapolointi segmentteittäin (ks. liite 2). Uudisrakentamisessa segmentointi voi pohjautua esimerkiksi kaavoitussuunnitelmaan ja kvantifiointi alue- tai kaupunkimalliin. Korjausrakentamisessa segmentointi voi pohjautua esimerkiksi rakennustietokantaan tai laajaan kyselyyn ja kvantifiointi puolestaan kaupunkirakenteesta automatisoidusti GIS-pohjaisella menetelmällä tai manuaalisesti tuotettuun kaupunkimalliin, jos valmista kaupunkimallia ei ole saatavilla. (Dogan 2015; Sola ym. 2018.) Arkkityyppimenetelmässä voidaan käyttää joko yksinkertaistettuja tai tarkkoja<sup>4</sup> rakennuksien energiamalleja (Ferrari ym. 2019). Tarkkojen energiamallien käyttämisessä on pyrittävä hyvään korrelaatioon alueen todellisten rakennuksien kanssa, jotta minimoidaan systemaattisen kerrannaisvirheen vaara (Dogan 2015). Lisäksi arkkityyppimenetelmät voidaan jakaa rakennuksen tarkan geometriatiedon hävittäviin ja säilyttäviin menetelmiin, joista jälkimmäiset ovat edistyneisempiä ja tarkempia. Geometriatiedon säilyttävissä menetelmissä alueen rakennuksien geometriat mallinnetaan rakennuskohtaisesti mutta geometriaan liittymättömät parametrit, kuten käyttöaikataulut ja rakennusmateriaalit, liitetään rakennuksien energiamalleihin segmentoinnin ja karakterisoinnin prosessilla. (Dogan & Reinhart 2017.) Geometriatiedon säilyttävät arkkityyppimenetelmät voidaan siten mieltää myös alueen tyhjentäväksi mallintamiseksi. Arkkityyppimallintamisella ei voida eksplisiittisesti huomioida rakennuksien välisiä vuorovaikutuksia, kuten niiden toisiaan varjostavaa vaikutusta, vierekkäisyyttä tai muiden rakennuksien aiheuttamaa paikallista mikroilmastoa, mikä voi aiheuttaa merkittävää epätarkkuutta simuloinnin tuloksiin. Arkkityyppimenetelmän tarkkuus on herkkä myös simuloitujen arkkityyppimallien edustavuudelle (ts. kuinka tarkasti arkkityyppimalli vastaa mallintamisen kohteena olevaa rakennusta), jota voidaan parantaa

<sup>4</sup> Tässä yhteydessä tarkalla rakennuksen energiamallilla tarkoitetaan, että rakennuksen geometria on mallinnettu yksityiskohtaisesti, rakennuksen sisätilat on mallinnettu useilla termisillä vyöhykkeillä esimerkiksi tilakohtaisesti (LOD 3–4) ja mallissa on paljon räätälöityjä syöttötietoja.



arkkityyppimallien määrää nostamalla, mutta tarkkaa raja-arvoa tarvittavalle arkkityyppimallien määrälle tietyn luotettavuustason saavuttamiseksi ei ole onnistuttu osoittamaan. (Dogan 2015; Zheng ym. 2019.) Toisaalta arkkityyppimallien määrän nostaminen lisää myös mallintamiseen vaadittavaa aikaa ja vaivaa (segmentoinnin ja karakterisoinnin osilta), mikä ei ole toivottavaa varsinkaan aikaisen vaiheen aluesuunnittelussa (Sola ym. 2018). Arkkityyppimallin energiantarveprofiili voidaan epäsuorasti validoida vertaamalla ja säätämällä sitä perustuen olemassa olevan rakennuksen tai rakennuksien mitattuun energiantarpeeseen. Vastaavasti arkkityyppimalleista kvantifioinnin avulla tuotettu alueen energiantarveprofiili voidaan epäsuorasti validoida vertaamalla ja säätämällä sitä perustuen olemassa olevan alueen tai alueiden mitattuun energiantarpeeseen. (Bucher & Andersson 2012; Heiple 2007; Mikkola 2017.) Energiamallien validoinnissa hyödynnetään erilaisia tilastollisia tunnuslukuja, kuten prosentuaalista virhettä (PE), absoluuttista prosentuaalista virhettä (MAPE), keskimääräistä virhettä (MBE) (mallin systemaattisen virheen positiivinen/negatiivinen luonne), keskimääräistä absoluuttista virhettä (MAE) (mallin systemaattisen virheen keskimääräinen suuruus), neliöllisen keskiarvon virhettä (RMSE) (suurimpia virheitä painotetaan) ja sen normalisoituja versioita (esimerkiksi NRMSE ja CVRMSE). (Dogan 2015; Heidarinejad ym. 2017; Wenliang ym. 2017; Zheng ym. 2019.) Energiamallin säätäminen voidaan tehdä manuaalisesti asiantuntijuutta hyödyntäen, mutta suositeltavampaa ja tehokkaampaa on soveltaa esimerkiksi optimointimenetelmiä tai Bayesian-kalibrointia (Muehleisen & Bergerson 2016; Wenliang ym. 2017). Arkkityyppimenetelmän soveltamista nopeuttaa huomattavasti, jos mallintajalla on käytettävissään rakennuksien energiamallien arkkityyppikirjasto. Esimerkiksi Yhdysvaltain energiaministeriön julkaisema DOE-arkkityyppikirjasto (DOE 2019) on eräs alueellisen energiantarpeen simuloinnissa yleisesti käytetyistä arkkityyppikirjastoista (Ferrari ym. 2019).

Kun rakennuksen arkkitehti- tai massoitusmallista luodaan automatisoidusti tai manuaalisesti rakennuksen energiamalli, niin keskeisessä asemassa on tapa, jolla algoritmi tai suunnittelija luo rakennuksen termiset vyöhykkeet. Yksittäisen rakennuksen energiasimuloinnissa voidaan käyttää nykyään erittäin yksityiskohtaisia malleja, mutta aluetason tyhjentävässä mallintamisessa joudutaan turvautumaan yksinkertaistettuihin rakennuksien energiamalleihin (engl. *reduced-order BEM*). Tämä johtuu yksityiskohtaisten mallien tarvitsemasta valtavasta syöttötietojen määrästä, tietokoneiden laskentatehon ja keskusmuistin rajallisuudesta, ja lisäksi erityisesti uudisalueiden kohdalla suunnittelun alkuvaiheessa ei ole vielä selvyyttä rakennuksien sisätilojen arkkitehtisuunnittelusta eikä välttämättä edes rakennuksien tarkasta geometriasta. (Dogan & Reinhart 2017; Heidarinejad ym. 2017.) Aluetason yksinkertaistettuja energiamalleja voidaan luoda monilla tavoilla, kuten yksiulotteisilla vastuskapasitanssi-menetelmillä (engl. *resistor-capacitance method*) tai normatiivisilla ensimmäisen asteen malleilla (engl. *first order energy model*), joiden laskenta pohjautuu näennäisvakiotilaisiin lämpötasapainoyhtälöihin (engl. *quasi-steady-state heat balance equations*) (Hong ym. 2016). Yksinkertaisimmissa kolmiulotteisissa lähestymistavoissa alueen rakennukset mallinnetaan suorakulmaisina särmiöinä, joista jokainen sisältää vain yhden termisen vyöhykkeen, mitä kutsutaan kenkälaatikkomallintamiseksi (engl. *shoebbox-modeling*) (Dogan 2015). Alueen yksinkertaistetusta energiamallista on kuitenkin mahdollista saada tarkemmin todellisuutta kuvaava, jos sen rakennukset mallinnetaan useammalla termisellä vyöhykkeellä (Hong ym. 2016). Edistyneisemmissä alueen yksinkertaistetuissa energiamalleissa rakennuksien termiset vyöhykkeet muodostetaan niin kutsutulla reunus-sisus-menetelmällä (engl. *perimeter-core zoning*), joka on myös ASHRAE-standardin mukainen tapa muodostaa termisiä vyöhykkeitä rakennukselle, jonka sisätilojen arkkitehtisuunnittelusta ei ole vielä tarkempaa tietoa (Dogan 2015). Reunus-sisus-menetelmää on mahdollista soveltaa

koko rakennukselle kerrallaan tai vaihtoehtoisesti kerroksittain. Jos alueen rakennuksien ikkunoiden sijoittelusta ei ole tarkempaa tietoa, ne voidaan reunus-sisus-menetelmässä mallintaa jokaisen kerroksen ulkoseinän keskelle niin kutsuttuina nauhaikkunoina (ts. yksi jatkuva ikkuna seinää kohden). (Heidarinejad ym. 2017.) Reunus-sisus-menetelmästä on esitetty myös erilaisia muunnelmia sen laskentaintensiivisyyden ja mallintamisen vaivalloisuuden vähentämiseksi (Dogan & Reinhart 2017). Heidarinejad ym. (2017) esittävät, että rakennuksien yksinkertaistettuja energiamalleja (geometrian ja vyöhykejaon osilta), voidaan käyttää alueellisen energiantarpeen simuloinnissa hyvällä luotettavuustasolla. Dogan (2015) kuitenkin osoittaa, että rakennuksien yksinkertaistettujen energiamallien (reunus-sisus-menetelmä) saattaa yksittäisien rakennuksien energiasimuloinnissa johtaa suuriin virhemarginaaleihin, mutta toteaa mallinnustavan luotettavuuden parantuvan suuremmassa mittakaavassa (kun mallinnetaan monia kymmeniä tai satoja rakennuksia). Heidarinejad ym. (2017) mukaan rakennuksen termisten vyöhykkeiden ja rakennuksen muodon harkitut yksinkertaistamiset aiheuttavat yhteensä enintään 10 %:n virhemarginaalin tyypillisen toimistorakennuksen energiantarpeen simuloinnissa. Dogan (2015) toteaa, huomattavasti suurempaan otantaan perustuen, että reunus-sisus-menetelmän soveltaminen johtaa aluetasolla rakennuksien mitattujen ja simuloitujen energiantarpeiden välillä noin 15 %:n keskimääräiseen neliölliseen virheeseen (RMSE) yksittäisien rakennuksien RMSE-arvojen vaihteluvälin ollessa jopa -28–58 %. Näihin tuloksiin pohjautuen voidaan todeta, että alueellisen energiantarpeen mallintamisessa voidaan perustellusti käyttää yksinkertaistettuja rakennuksien energiamalleja edellyttäen kuitenkin mallintajalta vahvaa energiasuunnittelua koskevaa asiantuntemusta, sillä liikaa tai vääränlaisella tavalla yksinkertaistetut mallit voivat johtaa suuriin virhemarginaaleihin.

Rakennuksen yksinkertaistetun energiamallin geometrian luomisessa tulee kiinnittää erityistä huomiota rakennuksen ulkopinta-alan ja tilavuuden suhteeseen, julkisivun ja ikkunoiden pinta-alojen suhteeseen, rakennuksen orientaatioon (erityisesti jos rakennus on epäsymmetrinen) sekä rakennuksen kerroskorkeuteen ja varjostuksiin: näiden tulisi vastata mahdollisimman tarkasti mallinnuksen kohteena olevaa rakennusta. Geometrian lisäksi rakennuksen yksinkertaistetun energiamallin luomisessa tulisi pyrkiä tunnistamaan ja valitsemaan olennaisimmat simuloinnin luotettavuuteen vaikuttavat syöttötiedot. (Heidarinejad ym. 2017.) Esimerkiksi Heidarinejad ym. (2017) esittävät kattavan listauksen kaikista rakennuksen energiamallin simuloituun energiantarpeeseen vaikuttavista syöttötiedoista. On kuitenkin huomioitava, että rakennuksen energiamallin luomiseen kuluva aika nousee lineaarisesti ja simulointiaika nousee jopa eksponentiaalisesti mallin tarkkuuden ja monimutkaisuuden lisääntyessä. Tämän vuoksi alueellisen energiantarpeen mallintamisessa pyritään usein löytämään pienin mahdollinen yksityiskohtaisuuden taso ja tarvittavien syöttötietojen määrä, joilla saavutetaan tarvittava luotettavuus simuloinnin tuloksille. (Heidarinejad ym. 2017; Schiefelbein ym. 2019.) Alueellisen energiamallin simulointiaikaa voidaan lyhentää sen sisältämien rakennuksien energiamallien yksinkertaistamisen lisäksi hyödyntämällä saarekesimulointia (ts. simuloidaan vain tarvittava osa alueesta kerrallaan), rinnakkaissimulointia (engl. *parallel computing/simulation*) ja erilaisia mallin suodatusmenetelmiä (engl. *filtering methods*). Jos kyseisiä menetelmiä hyödynnetään asiantuntemuksella, voidaan alueellisen energiantarpeen (ja myös muiden alueellisten energiasimulaatioiden) simulointiaikaa lyhentää huomattavasti vaikuttamatta juuri lainkaan tulosten luotettavuuteen. (Zheng ym. 2019.) Alueellisen energiamallin simulointiaika on alueellisen energioptimoinnin laajuuden ja tehokkuuden kannalta erittäin ratkaisevassa asemassa, jos alueen energiamallia hyödynnetään optimointimenetelmässä yhdistetyllä tavalla (ks. luku 3.3.2).

Ihmisten toimintaa ei voida täydellisesti ennustaa, mutta se vaikuttaa olennaisesti rakennuksen energiantarpeeseen (Bollinger & Evins 2015; Dickert & Schegner 2010; Richardson ym. 2010). Rakennuksien käyttöprofiilien luomisessa eli ihmisten toiminnan simuloinnissa, varsinkin alueellisella tasolla, käytetään tästä johtuen usein stokastista lähestymistapaa (Ferrari ym. 2019). Voidaan ajatella, että varsinkin asuinrakennuksen hetkellinen sähköenergian tarve koostuu luotettavasti ennustettavasta *peruskuormasta* (esimerkiksi jääkaapin sähkötarve) ja vaikeammin ennustettavasta *vaihtelevasta kuormasta* (esimerkiksi valaistuksen ja laitteiden sähkötarpeet) (Dickert & Schegner 2010). Vaihtelevaa kuormaa voidaan, ja on usein perustellumpaa<sup>5</sup>, mallintaa deterministisen tavan sijaan stokastisesti esimerkiksi erilaisten todennäköisyysjakaumien (Schiefelbein ym. 2019) tai Markovin ketjujen avulla (Virote & Neves-Silva 2012): sekä bottom-up- että top-down-lähestymistapoja on mahdollista soveltaa (Bucher & Andersson 2012; Dickert & Schegner 2010). Jos stokastista lähestymistapaa ei sovelleta rakennuksien vaihtelevan kuorman simuloinnissa, johtaa se aluetasolla liian korkeaan *huipputehontarpeen samanaikaisuuskertoimeen* eli epärealistisen suureen simuloituun samanaikaiseen huipputehontarpeeseen (engl. *coincident peak demand*), mikä puolestaan johtaa energiainfrastruktuurin ylimitoitukseen. Yksittäisien asuinrakennuksien (tai asuntojen) ihmisten toiminnasta riippuva huipputehontarve tulisi tämän vuoksi mallintaa (oikealle) vinoutuneella normaalijakaumalla tai sopivalla Beta-jakaumalla; rakennuksien huipputehontarve ei ole rakennus- eikä aluetasolla normaalijakautunutta. (Dickert & Schegner 2010; Loponen 2017.) Vaihtelevan kuorman dynaamisessa stokastisessa simuloinnissa on lisäksi päätettävä, käsitelläänkö peräkkäisten ajanhetkien vaihtelevia kuormia toisistaan täysin riippumattomina vai ei. Sen sijaan, että vaihtelevalle kuormalle määritettäisiin jokaisella ajanhetkellä täysin edellisestä ajanhetkestä riippumaton satunnainen (esimerkiksi vinoa normaalijakaumaa noudattava) arvo, voidaan peräkkäisten ajanhetkien vaihtelevien kuormien välistä riippuvuutta mallintaa soveltaen ehdollista todennäköisyyttä. Tämä on mahdollista tehdä esimerkiksi Markovin ketjujen ja Monte Carlo -menetelmän yhdistelmällä (engl. *Markov-Chain Monte-Carlo technique*), jossa tilanmuutoksen todennäköisyysmatriiseilla (engl. *transition probability matrix*) määritetään ehdollinen todennäköisyys esimerkiksi ihmisen läsnäololle rakennuksessa seuraavalla ajanhetkellä, kun hän on ollut tai ei ole ollut rakennuksessa edellisellä ajanhetkellä (Richardson ym. 2008). Richardson ym. (2010) hyödyntävät tilanmuutoksen todennäköisyysmatriiseja rakennuksien sähkötarpeen stokastisessa mallintamisessa. He myös luovat menetelmään perustuvan vapaasti ladattavan ja muokattavan VBA-ohjelmointia hyödyntävän Excel-pohjaisen työkalun. Yang ym. (2016) lähestyvät usean asunnon sisältävän kerrostalon vaihtelevan kuorman mallintamista kolmella eri tavalla: standardiprofiilin moninkertaistaminen, olemassa olevasta asunnosta mitatun profiilin moninkertaistaminen ja standardiprofiilin muokkaaminen stokastisesti. Kahdessa ensimmäisessä tapauksessa usean asunnon huipputehontarpeen samanaikaisuuskerroin on suuri, jolla huomattiin tutkimuksessa olevan erittäin suuri negatiivinen vaikutus rakennuksen keskitetyn älykkään lämmitysjärjestelmän simuloituun energiansäästöpotentiaaliin. Tutkimuksessa asuntojen stokastiset profiilit luotiin siirtämällä yksittäisiä standardiprofiileja satunnaisesti aika-akselin suhteen ja summaamalla nämä lopuksi yhteen, jolla saatiin tehokkaasti vähennettyä simulaation huipputehontarpeen samanaikaisuuskerrointa. Aluetason vaihtelevan

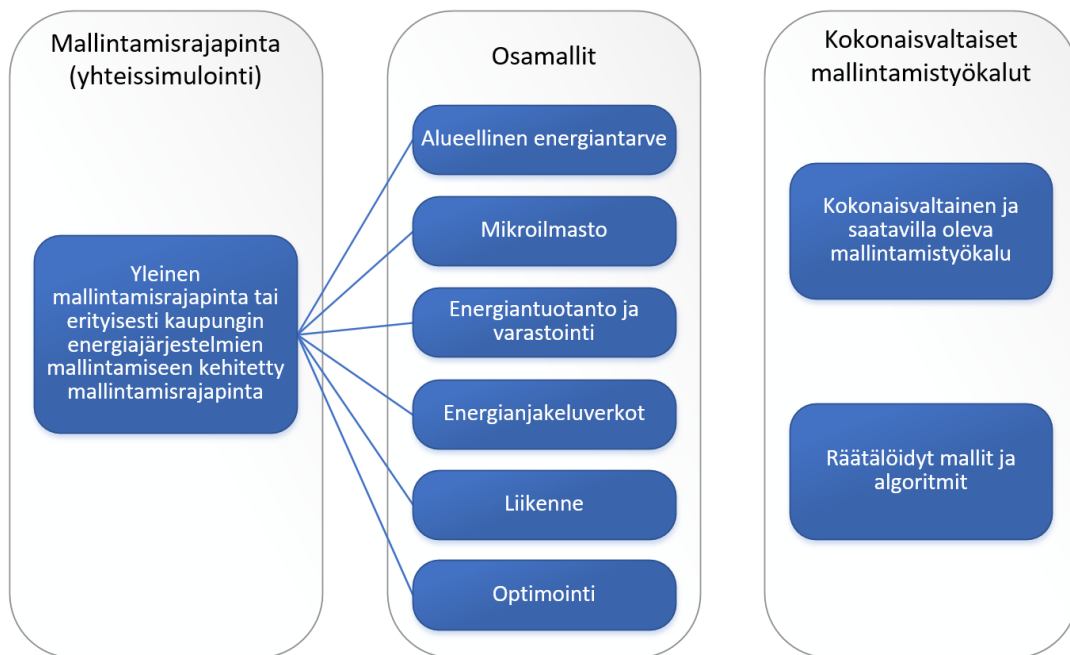
<sup>5</sup> Asuinrakennuksien (sähkön) huipputehontarpeen päivittäinen kesto-aika on tilastollisesti erittäin lyhyt suhteessa ihmisten toiminnan satunnaisuuteen. Se puolestaan tarkoittaa, että aluetasolla (sähkön) huipputehontarve kasvaa vain vähän rakennuksien määrän lisääntyessä. Tämän takia aluetason (sähkön) huipputehontarvetta (tai ylipäätään sähkötarpeen profiilia) ei voida perustellusti ekstrapoloida aluetasolle vain kertomalla yksittäisen simuloitun rakennuksen (sähkön) huipputehontarvetta alueen rakennuksien määrällä. (Dickert & Schegner 2010.)

van kuorman ja ylipäättään ihmisten toiminnan mallintaminen on kuitenkin varsin monimutkainen, laaja ja nopeasti kehittyvä tutkimusala, ja edellä esitettiin vain tyypillisimpiä ja varsin suoraviivaisia lähestymistapoja aluetason vaihtelevan kuorman mallintamiseen. Ferrari ym. (2019) esittävät kattavan listauksen tutkimuksista, joissa luodaan aluetasolla rakennuksien stokastinen energiantarveprofiili lisäksi eritellen ja kooten tutkimuksia, joissa esitetään tuntikohtaisia aluetason energiantarveprofiileja. Näitä profiileja voidaan hyödyntää itse luodun alueellisen energiamallin validoinnissa. On hyvä myös huomioida, että varsinkin asuinrakennuksissa jäähdytyksen huipputehontarve on sähkön huipputehontarpeen tavoin vahvasti kytköksissä ihmisten toimintaan, minkä takia myös aluetason jäähdytystehontarpeen mallintamisessa olisi syytä soveltaa stokastista lähestymistapaa. Ihmisten toiminta vaikuttaa myös rakennuksien tilalämmitystarpeeseen (esimerkiksi sisälämpötilan asetusarvon säädettävyyden myötä), mutta Schiefelbein ym. (2019) tutkimuksen mukaan lämpöhäviöiltään tavanomaisten rakennuksien tilalämmitystehontarve on lähes normaalijakautunutta (vain hieman oikealle vinoutunutta) eli stokastista mallintamistapaa ei välttämättä vaadita; matala- ja nollaenergiarakentamisen yleistyessä ihmisten toiminnan suhteellinen vaikutus rakennuksien tilalämmitystehontarpeeseen kuitenkin kasvaa (verrattuna perinteisesti dominoivaan ulkolämpötilan vaikutukseen), jolloin myös aluetason tilalämmitystarpeen stokastisen mallintamistavan oleellisuus korostuu. Rakennuksien lämpimän käyttöveden lämmitystehontarve on sen sijaan aina luonteeltaan selvästi stokastista vaihtelevaa kuormaa (Yang ym. 2016).

Kysyntäjoustoa voidaan mallintaa aluetasolla hyvin yksinkertaisilla bottom-up-menettimillä esimerkiksi määrittämällä jokaiselle ajanhetkelle tietty määrä joustavaa kuormaa, jota voidaan hyödyntää aluetason kysyntäjoustossa (Dickert & Schegner 2010; Lund & Thelufsen 2019). Dynaamisilla rakennuksien energiasimulointiohjelmilla, kuten EnergyPlus ja IDA ICE -ohjelmilla, on mahdollista mallintaa kysyntäjoustoa myös yksityiskohtaisemmin yksittäisten taloteknisten järjestelmien tasolla (Alimohammadisagvand ym. 2017). Kysyntäjouston mallintamista voidaan lähestyä lisäksi esimerkiksi *toimijapohjaisella mallintamisella* (Leobner ym. 2018), jota voidaan soveltaa myös rakennuksien energiantarpeen mallintamisessa (Allegrini ym. 2015). Helposti lähestyttäviä työkaluja dynaamisen ja yksityiskohdaisen kysyntäjouston (rakennuksien järjestelmätaso ja niiden optimaalinen vuorovaikutus älyverkon kanssa) mallintamiselle alueellisella tasolla ei kuitenkaan vielä ole (Leobner ym. 2018). Kysyntäjouston mallintamisessa on tärkeää huomioida, että kysyntäjousto ei lähtökohtaisesti saa vaikuttaa haitallisesti rakennuksien sisäilmaolosuhteisiin tai muullakaan tavoin ihmisten elintasoon (Alimohammadisagvand ym. 2017).

Edellä käsiteltiin alueellisen energiantarpeen ja kysyntäjouston mallintamista keskittyen erityisesti fysikaaliseen bottom-up-mallintamiseen. Alueellisen energijärjestelmän mallintaminen sisältää alueellisen energiantarpeen mallintamisen lisäksi muitakin osa-alueita (ks. kuva 18). Alueellisen energiantarpeen mallintamisen tavoin myös alueellisen energijärjestelmän muita osa-alueita voidaan mallintaa sekä top-down- että bottom-up-menettimillä, mutta tässä keskitytään vain fysikaalisiin bottom-up-menettimiin, koska ne mahdollistavat uudisrakentamisen eksplisiittisen energiasuunnittelun ja -optimoinnin. Alueelliset energijärjestelmät voidaan periaatteessa mallintaa yhdellä kokonaisvaltaisella mallilla, joka huomioi alueellisen energijärjestelmän kaikki osa-alueet (tai vain valitut osa-alueet), tai vaihtoehtoisesti modulaarisella tavalla käyttäen useaa osamallia (engl. *sub-models*), joiden tulokset yhdistetään mallintamisrajapinnan (engl. *UEM platform, API*) avulla keskenään. Kokonaisvaltaisen mallintamisen työkalut (engl. *multi-domain simulators*) voidaan jakaa yleisiin simulaatiotyökaluihin (engl. *specific simulation engines*) ja yksittäisiin kohteisiin tai yksittäisissä tutkimuksissa räätälöityihin, usein hyvin matemaattisiin, malleihin (engl. *tailor-*

*made models*). (Sola ym. 2018.) Kuvassa 18 esitetään edellä kuvatun mukainen luokittelu alueellisen energiajärjestelmän mallintamismenetelmille. Steinbrink ym. (2017) esittävät lisäksi, kuinka (energiajärjestelmien) simulointimenetelmät voidaan luokitella monoliittisiin simulointimenetelmiin, joita ovat klassinen simulointi<sup>6</sup> (engl. *classic simulation*) ja hybridisimulointi<sup>7</sup> (engl. *hybrid/merged simulation*), sekä hajautettuihin simulointimenetelmiin, joita ovat rinnakkaissimulointi<sup>8</sup> (engl. *parallel simulation*) ja yhteissimulointi<sup>9</sup> (engl. *co-simulation*). Steinbrink ym. esittämä luokittelu pohjautuu siihen, että malli itsessään ja mallin simuloinnin suorittava toiminto eli niin kutsuttu ratkaisija (engl. *solver*) voidaan käsittää toisistaan erillisiksi kokonaisuuksiksi, jotka puolestaan voivat linkittyä toisiinsa eri tavoilla. Mallintamisrajoitukset hyödyntävät yhteissimulointia (tai hybridisimulointia) ja kokonaisvaltaiset työkalut klassista simulointia. Kummassakin tavassa voidaan soveltaa lisäksi rinnakkaissimulointia (yhteissimuloinnissa erikseen jokaisen osamallin kohdalla).



Kuva 18 Alueellisen energiajärjestelmän mallintamismenetelmien luokittelu (muokattu: (Sola ym. 2018).

Yllä esitetyt energiajärjestelmien osamallit ovat kehityskaaressa kokonaisvaltaisia työkaluja kypsempiä. Osamallien luominen on helpompaa, koska niissä tarkastelu rajataan yleensä vain yhteen näkökulmaan, jolloin ei tarvitse ottaa huomioon eikä siis myöskään mallintaa (ainakaan eksplisiittisesti) muita näkökulmia tai niiden ristivaikutuksia mallinnettavan näkökulman kanssa. (Mohammadi ym. 2013.) Esimerkiksi Allegrini ym. (2015) ja Machado ym. (2019) esittävät kattavat listaukset alueelliseen energiasuunnitteluun soveltuvista energiantuotannon ja varastoinnin mallintamistyökaluista, joista voidaan nostaa esille esimerkiksi TRNSYS, EnergyPLAN ja energyPRO. Energiantuotannon ja varastoinnin osamallit kykenevät usein suorittamaan myös energiantuotanto- ja varastointijärjestelmien operaationaalisen optimoinnin (ks. luku 3.3.2). Energiantuotantolaitoksien yksityiskohtaiseen mallin-

<sup>6</sup> klassinen simulointi: yksi malli ja yksi ratkaisija

<sup>7</sup> hybridisimulointi: monta mallia ja yksi ratkaisija

<sup>8</sup> rinnakkaissimulointi: yksi malli ja monta ratkaisijaa

<sup>9</sup> yhteissimulointi: monta mallia ja monta ratkaisijaa

tamiseen on olemassa lukuisia työkaluja (esimerkiksi Apros ja GT-SUITE), mutta alueellisen energiajärjestelmän aikaisen vaiheen suunnittelussa (ts. alueellisen energiaoptimoinnin yhteydessä, ks. luku 3.3.1) energiantuotantolaitosten yksityiskohtainen komponenttitason mallintaminen ei ole tyypillisesti tarpeellista. Kaupunkirakenteeseen integroitavan uusiutuvan energian tuotantopotentiaali (esimerkiksi tunti- ja neliömetrikohtainen tuuli- ja aurinkonsäteilyprofiili tai suoraan paikallinen tuuli- ja aurinkovoimapotentiaali) voidaan simuloida samanaikaisesti jo alueellisen energiantarpeen simuloinnin yhteydessä (ks. esimerkiksi Akhtari & Baneshi 2019; Orehounig ym. 2014; Theo ym. 2017). Energiaverkkojen osamallit (esimerkiksi NEPLAN, GridLAB-D ja TERMIS) soveltuvat muun muassa energiaverkkojen mitoitukseen ja reitittämiseen. Etenkin älykkäissä sähköverkoissa, mutta myös muissa (älykkäissä) energiaverkoissa, olisi hyvä jo alueellisen energiaoptimoinnin yhteydessä mallintaa energiaverkot dynaamisesti tunnistuen mahdolliset käytönaikaiset rajoitteet (esimerkiksi verkon liiallinen ruuhkautuminen). (Dickert & Schegner 2010; Nardelli ym. 2014; Theo ym. 2017.) Liikenteen osamallissa alueellisten energiajärjestelmien kannalta olennaista on autokannan murroksen ja etenkin autokannan sähköistymisen vaikutukset energiajärjestelmään. Autokannan sähköistyminen lisää huomattavasti alueellista sähköntarvetta, ja biokaasuautojen lisääntyminen puolestaan lisää alueellista biokaasuntarvetta. Toisaalta verkkoon kytkettävien sähköautojen mahdollistamia V2G-strategioita pidetään erittäin potentiaalisina uusiutuvien energiajärjestelmien joustavuuden lisääjinä (Galus ym. 2013). Liikenteen mallintamisessa voidaan hyödyntää esimerkiksi toimijapohjaista mallintamista (Keirstead ym. 2012; Lindgren & Lund 2015), mutta työn rajauksen johdosta liikenteen ja V2G-strategioiden mallintamiseen ei perehdytä tässä tarkemmin. Kaupunkiympäristön mikroilmastoa ja sen mallintamista käsitellään tämän luvun lopussa. Esimerkiksi Allegrini ym. (2015), Machado ym. (2019) ja Sola ym. (2018) esittävät laajat katsaukset energiajärjestelmien mallintamistyökaluista tuoden esille mallintamistyökaluja kaikista kuvassa 18 esiintyvistä kategorioista ja osamalleista. On huomioitava, että alueellisessa energimallintamisessa voidaan tarkastella kuvassa 18 esitettyjen näkökulmien lisäksi muitakin näkökulmia. Esimerkiksi rakennetun ympäristön hiilijalanjäljen ja sitoutuneen energian määrittämiseen voitaisiin käyttää erillistä osamallia, kuten One Click LCA:ta.

Täysin kokonaisvaltaista, dynaamista ja uusiutuvien energiajärjestelmien vaatiman yksityiskohtaisuuden omaavaa alueellisten energiajärjestelmien mallintamistyökalua ei ole ainakaan avoimesti vielä saatavilla (Allegrini ym. 2015; Zheng ym. 2019). Esimerkiksi CitySim-ohjelma (Robinson ym. 2009; Walter & Kämpf 2015) edustaa nykyisen hetken edistyneen tason kokonaisvaltaista alueellisen energiajärjestelmän mallintamistyökalua (ts. ei mallintamisrajoitukseen perustuvaa), mutta sekin on vielä varsin rajallinen simuloinnin joustavuuden, yksityiskohtaisuuden ja kokonaisvaltaisuuden osilta (Allegrini ym. 2015), ja lisäksi sen täysi toiminnallisuus vaatii maksullisen lisenssin. Kokonaisvaltaisiksi energiajärjestelmien mallintamistyökaluiksi voidaan periaatteessa mieltää myös yleistasoiset (visuaaliset) ohjelmointiympäristöt, joita ei alun perin ole erityisesti kehitetty energiajärjestelmien mallintamista varten (esimerkiksi Dymola, Simulink+Insel ja Grasshopper) sekä erilaiset olio-ohjelmointiin (engl. *object-oriented programming*) pohjautuvat työkalut, kuten Modelica-ohjelmointikielellä luotu Teaser-työkalu (Allegrini ym. 2015; Remmen ym. 2018). Edellä mainittujen yleistasoisten ohjelmointiympäristöjen ja varsinaisten mallintamisrajoitusten ero on monessa tapauksessa varsin tulkinnanvaraista. Tässä yhteydessä energiajärjestelmien kokonaisvaltaisella mallintamisella tarkoitetaan erityisesti fysikaalisten ja termodynaamisten vuorovaikutusten suhteen kokonaisvaltaista mallintamista, mutta kuten luvussa 3.1 tuotiin ilmi, täysin kokonaisvaltaisen energiajärjestelmämallin tulisi kyetä ottamaan myös sosiaaliset ja taloudelliset näkökulmat huomioon. Esimerkiksi IEA-ETSAP:in kehittämä TIMES-malli on

eräs tunnetuimmista kokonaisvaltaisista energiajärjestelmien mallintamis- ja optimointityökaluista, joka yhdistää teknisen (engl. *technical engineering approach*) ja taloudellisen lähestymistavan (engl. *economic approach*) toisiinsa (IEA-ETSAP 2019). Tämänkaltaiset työkalut soveltuvat usein parhaiten kansallisen tason strategiseen energiasuunnitteluun, ja esimerkiksi Tanskassa kehitetty IntERACT on TIMES-malliin pohjautuva (TIMES-DK) mutta erityisesti juuri Tanskalle räätälöity sosioteknistaloudellinen energiajärjestelmien mallin- ja optimointityökalu (Balyk ym. 2019; DEA 2019). Muita tunnettuja tekniset näkökulmat ylittäviä kokonaisvaltaisia energiajärjestelmien mallintamistyökaluja ovat esimerkiksi MESSAGE, OSeMOSYS, DICE, RICE, IGSM, WEM ja GCAM (Moresino & Fragnière 2018). Huomionarvoista on, että nämä sosioteknistaloudelliset energiajärjestelmien mallintamistyökalut soveltavat usein uusklassista (engl. *neoclassical*) talousmallia. Uusklassisen talousmallin alkuoletukset ovat kuitenkin epärealistisia tai vähintäänkin erittäin epävarmoja, mikä voi johtaa huonoon korrelaatioon mallin ja todellisuuden välillä eli vääristyneisiin simuloinnin tuloksiin. Tämä puolestaan johtaisi siihen, että kyseisten mallien simuloinnin tuloksia hyödyntävä päätöksenteko perustuisi virheelliseen informaatioon. (Keirstead & Shah 2013; Lund 2014; Moresino & Fragnière 2018; Nardelli ym. 2014.)

Alueellisen energiajärjestelmän mallintamiseen soveltuvia mallintamisrajapintoja on runsaammin saatavilla kuin kokonaisvaltaisia valmiita mallintamistyökaluja. Mallintamisrajapinnat voidaan luokitella erityisesti energiasuunnittelun tarpeisiin kehitettyihin mallintamisrajapintoihin sekä aiemmin mainittuihin yleispätevimpiin ohjelmointiympäristöihin, joita kuitenkin voidaan hyödyntää myös energiajärjestelmien mallintamisessa. Lisäksi mallintamisrajapinnat voidaan jaotella täysin muokattavien ja rajoitetusti tai ei ollenkaan muokattavien mallintamisrajapintojen kesken. Täysin muokattavissa mallintamisrajapinnoissa käyttäjä voi itse linkittää mallintamisrajapinnan avulla eri osamallit keskenään haluamallaan tavalla. Rajoitetusti tai ei ollenkaan muokattavissa mallintamisrajapinnoissa sen sijaan osamallit on valmiiksi linkitetty toisiinsa, eikä käyttäjällä ole välttämättä mahdollisuutta linkittää itse uusia osamalleja mallintamisrajapintaan. Esimerkiksi City Energy Analyst (CEA) (Fonseca ym. 2016), Urban Modeling Interface (umi) (Reinhart ym. 2013), OpenStudio (OpenStudio.net 2019), HUES (Bollinger & Evins 2015), CityBES (Hong ym. 2016), URBANopt (Polly ym. 2016), CITYOPT (Tuominen ym. 2017), SimStadt (Nouvel ym. 2015) ja Autodesk Insight (Autodesk 2019) ovat energiajärjestelmien mallintamiseen – ja osa myös optimointiin – soveltuvia mallintamisrajapintoja, joista toiset ovat rajoitetummin ja toiset vapaammin muokattavia. Edellä mainitut mallintamisrajapinnat ovat vielä kehityskaarensa alkupuolella ja osa edellyttää myös maksullisen lisenssin hankkimisen, mutta niitä voidaan pitää kuitenkin potentiaalisina vaihtoehtoina etsittäessä kokonaisvaltaisesti alueellista energiasuunnittelua tukevaa mallintamistyökalua. Osa edellä mainittujen mallintamisrajapintojen julkaisijoista tiedottaa aktiivisesti työkaluun suunnitelluista kehitystoimenpiteistä (esimerkiksi CEA), mitä voidaan hyödyntää pidemmän tähtäimen työkalun valintaa tehdessä. Yllä esitettyjä mallintamisrajapintoja on hyödynnetty lukuisissa alueellisissa energia-analyseissä, ja niistä tehdyt julkaisut löytyvät usein listattuna työkalujen kotisivuilta. Esimerkkinä voidaan mainita Bostonin rakennuksien energiamallin luominen ja analysoiminen hyödyntämällä GIS-pohjaista arkkityyppimallintamista ja umi-mallintamisrajapintaa (Davila ym. 2016; Reinhart ym. 2013). Grasshopper-ohjelmointiympäristö on yksi esimerkki alueellisissa energia-analyseissä yleisesti käytetyistä rajoittamattomista mallintamisrajapinnoista (ks. esim. Dogan 2015; Waibel ym. 2015). Grasshopperiin on vapaasti ladattavissa monia energiajärjestelmien mallintamiseen soveltuvia lisäosia eli osamalleja, joita ovat esimerkiksi Honeybee, Ladybug, Butterfly, Kangaroo, Goat, ArchSim, Clark’s Crow, Vitality, ArchSim, Swift, Beetle2, Sunflower, Solar Toolbox, Geco, DIVA (maksullinen) ja Pigeon (tarkemmat

kuvaukset lisäosista: McNeel Europe 2019). Rajoittamattomat mallintamisrajapinnat tarjoavat usein erittäin monipuoliset toiminnallisuudet, jotka yhdistettynä osamallien vapaaseen linkitettävyyteen mahdollistavat asiantunnevalle käyttäjälle lähes rajattoman mallintamisen joustavuuden ja räätälöitävyyden. Toisaalta rajoittamattomien mallintamisrajapintojen käyttäminen vaatii tyypillisesti enemmän tietotaitoa ja osaamista käyttäjältä esimerkiksi usean ohjelman vaatiman monipuolisen ohjelmisto-osaamisen ja näiden linkittämisen osilta, mikä lisää rajoittamattomien mallintamisrajapintojen käyttämisen kynnystä (Reinhart ym. 2013). Tätä kynnystä voidaan madaltaa, ja mallintamisrajapintojen hyödyntämisestä tehdä helpommin yleistettävää, linkittämällä osamallit keskenään erillisen yhteissimulointikehyksen (engl. *co-simulation framework*) avulla, jolloin ei tarvitse luoda erillisiä linkityksiä jokaisen osamallin välille. Lisäksi rajoittamattomien mallintamisrajapintojen helppokäyttöisyyttä ja yleistettävyyttä voidaan edesauttaa FMI-standardoitujen osamallien käyttämisellä. (Steinbrink ym. 2017.) Mallintamisrajapintojen hyödyntäminen on myös siinä mielessä suotuisaa, että ne mahdollistavat ennestään hyväksi koettujen ja uskottavasti validoitujen ohjelmistojen hyödyntämisen edellyttäen kuitenkin, että niiden linkittäminen muiden ohjelmistojen kanssa on mahdollista (Reinhart ym. 2013; Steinbrink ym. 2017).

Tiheään asutun alueen niin kutsutulle urbaanille katosvyöhykkeelle (engl. *urban canopy layer*) muodostuu paikallinen mikroilmasto (vaihtoehtoisesti: pienilmasto), jolla on merkittävä vaikutus alueen lämpötilaan, terveellisyyteen ja viihtyisyyteen, alueen rakennuksien energiantarpeeseen, hajautetun uusiutuvan energian tuotantopotentiaaliin sekä alueen sadantaan ja kasvillisuuden fenologisiin vaiheisiin. Kaupunkien paikallisen mikroilmaston syynä on ihmisen toiminnasta aiheutuva kaupunkisaarekeilmiö (engl. *urban heat/cool island*). Kaupunkisaarekeilmiö aiheuttaa kaupunkiin sitä ympäröivää seutua eriävän, yleensä korkeamman lämpötilan (ilman, pintojen, maaperän ja vesistöjen lämpötilojen osilta), jolloin voidaan puhua nimenomaisesti lämpösaarekeilmiöstä. Lämpösaarekeilmiö johtuu muun muassa alueen rakennuksien ja liikenteen tuottamasta lämmöstä, kaupunki-infrastruktuurin (varsinkin tummien pintojen) lämmönvarastointi- ja heijastusominaisuuksista sekä kaupunkirakenteen vaikutuksesta alueellisiin ilmavirtoihin eli alueen hengittävydestä (engl. *city breathability*). (Bernard ym. 2018; Chen ym. 2017; Rizwan ym. 2008.) Lämpösaarekeilmiö on siinä mielessä itseään ruokkiva ilmiö, että kohoava ulkolämpötila lisää rakennuksien jäähdytystehontarvetta eksponentiaalisesti (jäähdytyslaitteiden hyötysuhde pienenee ulkolämpötilan noustessa), mikä puolestaan voi lämmittää kaupungin mikroilmastoa entisestään (lämpöpumput). Esimerkiksi Pariisissa rakennuksien ilmastointilaitteiden mikroilmastoa lämmitävä vaikutus on simuloimalla todettu olleen vuonna 2003 noin  $+0,5\text{ °C}$  ja jopa  $+2\text{ °C}$  skenaariossa, jossa alueen jäähdytysteho kaksinkertaistetaan vuoden 2003 tasosta. (Munck ym. 2012.) Kaupunkisaarekeilmiön huomioiminen on tärkeää myös korkeammilla leveysasteilla. Esimerkiksi Oulussa lämpösaarekeilmiön maksimivoimakkuuden on tutkittu olevan jopa  $+8,4\text{ °C}$ . (Kekkonen 2015.)

Kaupungin morfologisella suunnittelulla, eli kaavoituksella ja arkkitehtuurisella suunnittelulla, voidaan vaikuttaa ratkaisevasti kaupungin mikroilmastoon. Kaupungista siirtyy lämpöä ilmakehään ja viereisille alueille säteilemällä, kulkeutumalla ja haihtumalla (vesihöyryyn sitoutuneena). Kaupungeissa on usein vain vähän kasvillisuutta ja hulevedet viemäroidään tehokkaasti, mikä vähentää haihtumalla tapahtuvaa lämmönsiirtymistä. (Bernard ym. 2018; Rizwan ym. 2008.) Kaupungeille tyypilliset korkeat ja tiheästi sijoitetut rakennukset estävät tuulen pääsyä sisäkaupunkiin, mikä puolestaan vähentää lämmön kulkeutumista pois kaupungista eli voimistaa lämpösaarekeilmiötä (Bernard ym. 2018); erittäin tihe-



ässä pilvenpiirtäjäkaupungissa (esimerkiksi Hong Kongissa) voi kuitenkin esiintyä myös pilvenpiirtäjien aikaansaama kylmäsaarekeilmiö (Yang ym. 2017). Kaupungista säteilemällä poistuvaan lämpöön, ja siten koko kaupungin mikroilmastoon, vaikuttaa olennaisesti niin kutsuttu näkymätekijä (engl. *sky view factor*). Näkymätekijä mainitaan usein yhdeksi tärkeimmistä kaupungin morfologisista indikaattoreista analysoidessa kaupunkirakenteen termodynaamista käyttäytymistä. Olemassa olevan kaupungin näkymätekijä voidaan määrittää kalansilmäkameroilla, 3D-mallintamisella (esimerkiksi GIS-pohjaisia menetelmiä hyödyntämällä), GPS-menetelmillä tai kvalitatiivisesti pohjautuen kaupunki/korttelityyppiin. Uudisalueen näkymätekijä voidaan puolestaan määrittää tarkasti pohjautuen 3D-mallintamiseen, varsinkin jos kaupungin rakennuksien lisäksi mallinnetaan sen (korkea) kasvillisuus. (Bernard ym. 2018; Rafieian ym. 2014; Zeng ym. 2018.) Edellä esitettyjä kaupungin lämmönsiirtomekanismeja voidaan tehostaa eli lämpösaarekeilmiötä voidaan lieventää kaupungin morfologisen suunnittelun lisäksi useilla erilaisilla passiivisilla ja aktiivisilla tavoilla. Tällaisia ympäri maailmaa varsin onnistuneesti toteutettuja toimenpiteitä ovat esimerkiksi katujen kosteuttaminen, kylmäkattojen ja -katujen asentaminen (vaaleita heijastavia pintoja), kaupungin kasvillisuuden ja vesialueiden lisääminen sekä suihkulähteiden ja haihdutustornien strateginen sijoittelu. (Santamouris ym. 2017.)

Kaupungin mikroilmastolla, joka siis kattaa lämpösaarekeilmiön lisäksi esimerkiksi ihmisten toiminnan aiheuttaman paikallisen tuuliprofilin tai pilvisyyden eriävyyden ympäristöstään, on olennainen vaikutus myös kaupunkirakenteeseen integroitavan uusiutuvan energian tuotantopotentiaaliin. Esimerkiksi lämpöpumppujen ja aurinkopaneelien hyötysuhteet ovat vahvasti riippuvaisia ympäristön lämpötilasta. Korkeat ja tiheään sijoitetut rakennukset heikentävät keskimääräisesti paikallisia tuulennopeuksia ja tekevät ilmavirtauksista turbulenttisia, mikä vähentää keskimääräisesti paikallista tuulivoimapotentiaalia (kaupunkiin saattaa silti syntyä myös paikallisia pientuulivoimalle erityisen otollisia tuuliprofileja). Korkeat rakennukset luovat paljon varjostuksia, mikä puolestaan vähentää paikallista aurinkovoimapotentiaalia. Kaupungin mikroilmasto vaikuttaa myös maaperän, vesistöjen ja ilman lämpötiloihin, jotka osaltaan määrittävät paikallisen ympäristölämpöpotentiaalin. On lisäksi hyvä huomioida, että kaupungin mikroilmastoon liittymättömät seikat, kuten maaperän ominaisuudet ja rakennetun ympäristön rajoitteet (esimerkiksi kaupunkiympäristön esteettisyys ja maanalainen infrastruktuuri), voivat vaikuttaa merkittävästi kaupunkirakenteeseen integroitavan uusiutuvan energian tuotantopotentiaaliin. (Bouyer ym. 2011; Kammen & Sunter 2016; Keirstead & Shah 2013.) Paikalliset rajoitteet ja kaupungin mikroilmasto tulisikin ottaa huomioon kaupungin energiajärjestelmän mallintamisessa (Sola ym. 2018). Voidaan siis todeta, että kaupungin morfologialla on suuri vaikutus kaupungin mikroilmastoon, joka puolestaan vaikuttaa merkittävästi kaupungin energia- ja ympäristötehokkuuteen sekä lämpöolosuhteisiin. Tämän takia jo kaupungin morfologisessa suunnittelussa (kaavoituksessa) mikroilmaston ja energia- sekä ympäristötehokkuusnäkökulmien huomioiminen olisi kestävään alueelliseen energiajärjestelmään pyrkiessä erittäin tärkeää. (Bouyer ym. 2011; Forström ym. 2011; Shi ym. 2017.) Kaupungin morfologinen suunnittelu, jossa huomioidaan alueen energia- ja ympäristötehokkuus sekä lämpöolosuhteet, on laaja ja monimutkainen tehtävä, joka voidaan myös sisällyttää osaksi kokonaisvaltaista alueellista energiaoptimointia (ks. luku 3.3.2). Kaupungin mikroilmaston mallintamiseen on kehitetty lukuisia työkaluja, joista osa perustuu kaupungin rakennuksien ja ilmakehän väliseen lämpösaateilyanalyysiin (esimerkiksi RayMan ja SkyHelios), mutta myös kaupungin kokonaisvaltaisempaan virtausmallinnukseen on saatavilla työkaluja (esimerkiksi ENVI-met). Radiance-ohjelma voidaan mainita esimerkkinä yleisesti käytetystä työkalusta kaupunkien auringonsäteilyanalyysissä eli uusiutuvan energian tuotantopotentiaalin mallintamisessa. Mikroilmastoa voidaan

mallintaa myös suuremmalla, niin kutsutulla mesomittakaavalla (engl. *mesoscale*), esimerkiksi MUKLIMO\_3-ohjelmalla. Ilmastonmuutoksen vaikutukset voidaan puolestaan ottaa mallintamisessa huomioon säänmuokkausgeneraattoreilla, kuten esimerkiksi CCWorld-WeatherGen tai WeatherShift™ -ohjelmilla. (Sola ym. 2018.) Ilmatieteen laitos (2019) on julkaissut vuosien 2030, 2050 ja 2100 Suomen ilmastoa vastaavat energialaskennan testivuodet (yhden vuoden tuntisarjat), joita voidaan hyödyntää Suomeen sijoittuvissa alueellisissa energia-analyyseissä ilmastonmuutoksen vaikutustenarviointiin.

Keirstead & Shah (2013) määrittelevät alueellisen energia(järjestelmä)mallin seuraavasti (vapaa suomennos): ”*muodollinen systeemi (tai muodolliset systeemit), joka jäljittelee tietyn alueen energiahuoltoon liittyvää energianhankinnan ja -käytön yhdistettyjä prosesseja*”. Alueellisella energiajärjestelmämallilla voidaan tukea alueellisen energiantarpeen ja energiatehokkuustoimenpiteiden sekä alueellisen energiantuotannon ja -jakelun arviointia ja analysointia, mahdollisesti myös useasta eri näkökulmasta. Alueellisen energiajärjestelmän mallintajan kokonaisvaltainen asiantuntijuus korostuu siinä, että hän osaa tehdä tarvittavat yksinkertaistukset kuitenkin säilyttäen mallin tarkkuuden ja luotettavuuden. (Keirstead & Shah 2013.) Alueellisten energiajärjestelmämallien painopiste on siirtymässä erillisistä energiankysynnän ja -tuotannon osamalleista kohti integroitua monitasoisia energiamalleja, joissa pyritään tunnistamaan ja myös hyödyntämään energiajärjestelmien piileviä synergia-vaikutuksia (Keirstead ym. 2012; Lund 2014; Mohammadi ym. 2013). Alueellisten energiajärjestelmien mallintamisessa on tärkeää ymmärtää, että rakennetut ympäristöt, etenkin kaupungit, ovat hyvin monimutkaisten teknisten ja sosiaalisten verkostojen muodostamia kokonaisuuksia. Tämän vuoksi niiden mallintaminen puhtaasti termodynaamisina entropiaa luovina järjestelminä on perusteltua vain tilanteissa, joissa sosiaaliset ja taloudelliset näkökulmat halutaan kokonaan poistaa tarkastelusta. Alueellisen energiajärjestelmämallin tuloksien tulkinnassa tulisi aina tiedostaa, mitä kokonaisuutta ja näkökulmia käytetty malli kykenee edustamaan. Sen tiedon avulla voidaan arvioida, kuinka pitkälle meneviä ja perusteltuja johdopäätöksiä mallin simuloinnin tuloksista voidaan tehdä. (Baynes & Wiedmann 2012; Keirstead & Shah 2013.) Ideaalisen alueellisen energiamallin voidaan sanoa olevan teknisesti tarkka ja yksityiskohtainen, mikrotaloustieteellisesti realistinen ja makrotaloustieteellisesti tyhjentävä (Moresino & Fragnière 2018). Koska alueellisten energiajärjestelmämallien avulla pyritään ensisijaisesti tukemaan paikallista päätöksentekoa, niin sitä varten tarvittavan tiedon tulisi aina ohjata käytettävän mallin valintaa eikä päinvastoin (DeCarolis ym. 2017; Pasanen ym. 2013). Kuten luvussa 2 tuotiin esille, parhaiden mahdollisten päätösten tekeminen perustuu kattavaan vaihtoehtojen analysointiin, joka voidaan suorittaa tehokkaasti hyödyntäen optimointimenetelmiä. Optimointimenetelmien hyödyntäminen alueellisten energiajärjestelmämallien kanssa yhdistetyllä tavalla (ks. luku 3.3.2) kuitenkin vaatii, että mallin simulointi ei ole liian raskas toimenpide (ajallisesti tai laskentatehollisesti). Optimointimenetelmien hyödyntäminen siis asettaa alueelliselle energiajärjestelmämallille oman lisävaatimuksensa. (Leobner ym. 2018.) Niin kutsutut meta- (engl. *metamodel*) ja surrogaattimallit (engl. *surrogate model*), jotka jäljittelevät fysiikkaan perustuvia valkoisen (tai harmaan) laatikon malleja korvaten ne hyvin nopeasti simuloitavilla mustan laatikon malleilla, ovat (tulevaisuuden) potentiaalisia vaihtoehtoja alueellisten energiajärjestelmämallien simuloinnin ja siten myös optimoinnin nopeuttamiseksi (Nault ym. 2017; Nguyen ym. 2014; Reynolds ym. 2017). Sen lisäksi, että alueelliset energiajärjestelmämallit tukevat alueellisia energia-analyysijä laajasti, niin ne myös mahdollistavat niiden tuloksien visualisoinnin selvällä ja vaikuttavalla tavalla. Tämä edesauttaa alueellisten energia-analyysien tuloksien viestintää varsinkin ei-asiantuntijoista koostuvalle yleisölle. (Hong ym. 2016; Reinhart ym. 2013.)

### **3.3 Optimointimenetelmät osana alueellista strategista energiasuunnittelua**

#### **3.3.1 Strateginen energiasuunnittelu**

Energiamurros on valtavan suuri yhteiskunnan kaikkia sektoreita koskeva prosessi, jonka onnistunut toimeenpano vaatii huolellista suunnittelua, läpikotaista analysointia ja laaja-alaista yhteistyötä julkisten toimielimien ja yksityisten yritysten välillä. Kaupungeilla on erityisen merkittävä rooli kestävän elinympäristön luomisessa, minkä vuoksi niiden tulisi huomioida energiamurros energia- ja ympäristöstrategiassaan. (Krog & Sperling 2019.) Monet kaupungit ympäri maailmaa, kuten New York City, Melbourne, Rio De Janeiro, Yokohama, Lontoo ja Toronto, ovatkin asettaneet tavoitteekseen päästä lähes tai täysin hiilineutraaliksi viimeistään vuoteen 2050 mennessä (CNCA 2019). Helsingin tavoite on vieläkin kunnianhimoisempi: kaupungin hiilineutraaliuteen pyritään jo ennen vuotta 2035 (Helsingin kaupunki 2018). Kaupunkien ilmastostrategioiden merkittävimpana yksittäisenä toimenpiteenä on usein energiasektorin (energian tuottaminen ja kulutus) vähä- tai nollahiilisyys (Helsingin kaupunki 2018; Krog & Sperling 2019).

Energiasektorin vähä- tai nollahiilisuuden saavuttaminen ei kuitenkaan ole yksinkertainen tehtävä. On olemassa lukuisia vaihtoehtoisia ratkaisuja ja strategioita, joiden avulla alueellisista energiajärjestelmistä voidaan saada kestävän kehityksen mukaisia. Ei ole olemassa yhtä oikeaa malliratkaisua, joka soveltuisi jokaiselle alueelle, tai joka olisi ainakaan kaikista optimaalisin ratkaisu kaikille alueille. Tämän takia valtioissa ja kaupungeissa on herännyt erityisesti viimeisen vuosikymmenen aikana yhä enemmän mielenkiintoa niin kutsuttua strategista energiasuunnittelua kohtaan. (Ahonen & Nuorkivi 2013; Krog & Sperling 2019.) Strategisen energiasuunnittelun alkujuuret voidaan tulkita sijoittuvan 1900-luvun loppupuolelle, jolloin erilaisten kompleksisten järjestelmien energia-analyysit alkoivat yleistyä kehityksen lopulta omaksi tieteenalaksi (Brown & Ulgiati 2004). Strategisella energiasuunnittelulla tarkoitetaan sellaista energiajärjestelmien etunojaista kokonaisvaltaista suunnittelufilosofiaa, jossa suunnittelua ohjaa kestävän kehityksen periaatteet ja tulevaisuuden tarpeet (Krog & Sperling 2019). Tulevaisuuden tarpeiden huomioimisessa voidaan hyödyntää esimerkiksi niin kutsuttua backcasting-menetelmää, jossa ei pyritä ennustamaan tulevaisuutta nykyisyyden perusteella, vaan päinvastaisesti luodaan toimenpiteiden polku, joka johtaa visioituun suotuisaan tulevaisuuteen (Geidl ym. 2007; Laakso 2016). Strateginen energiasuunnittelu voidaan nähdä myös eräänlaisena yhteisöjen (esimerkiksi kaupunkien tai valtioiden) energiasuunnittelun työkaluna, jolla voidaan suunnitella joustava ja kestävä energiajärjestelmä, joka on räätälöity juuri kyseiselle yhteisölle ottaen huomioon sen paikalliset ominaisuudet ja rajoitteet. Strategista energiasuunnittelua voidaan tehdä hierarkkisesti monella eri tasolla aina globaalista mittakaavasta alueelliseen mittakaavaan: jälkimmäisestä käytetään termiä alueellinen strateginen energiasuunnittelu. Suuremman mittakaavan yleistasoisempien energiastrategioiden tulisi toimia viitekehyksinä pienemmän mittakaavan yksityiskohtaisemmille energiastrategioille, jolloin voidaan välttää systeemitasolla haitallista osamintia. Hyvin laaditulla ylemmän tason energiastrategialla on mahdollista myös yksinkertaistaa ja johdonmukaistaa alemman tason strategisen energiasuunnittelun tavoitteenasettelua: esimerkiksi kansallisessa strategisessa energiasuunnittelussa voitaisiin energiaoptimointia hyödyntäen (ks. esim. Han & Kim 2019) tunnistaa alueellisilta energiajärjestelmiltä tavoiteltavia asioita, kuten joustavuutta, energiatehokkuutta, omavaraisuutta, uusiutuvan energian ja energiantarpeen yhteensopivuutta tai muuta kansallista energiastrategiaa (eli kansallisen strategisen energiasuunnittelun lopputulemaa) tukevaa ominaisuutta. (Ahonen &

Nuorkivi 2013; Drysdale ym. 2019; Krog & Sperling 2019.) Kuvassa 19 havainnollistetaan edellä kuvailtua hierarkkisen strategisen energiasuunnittelun konseptia.

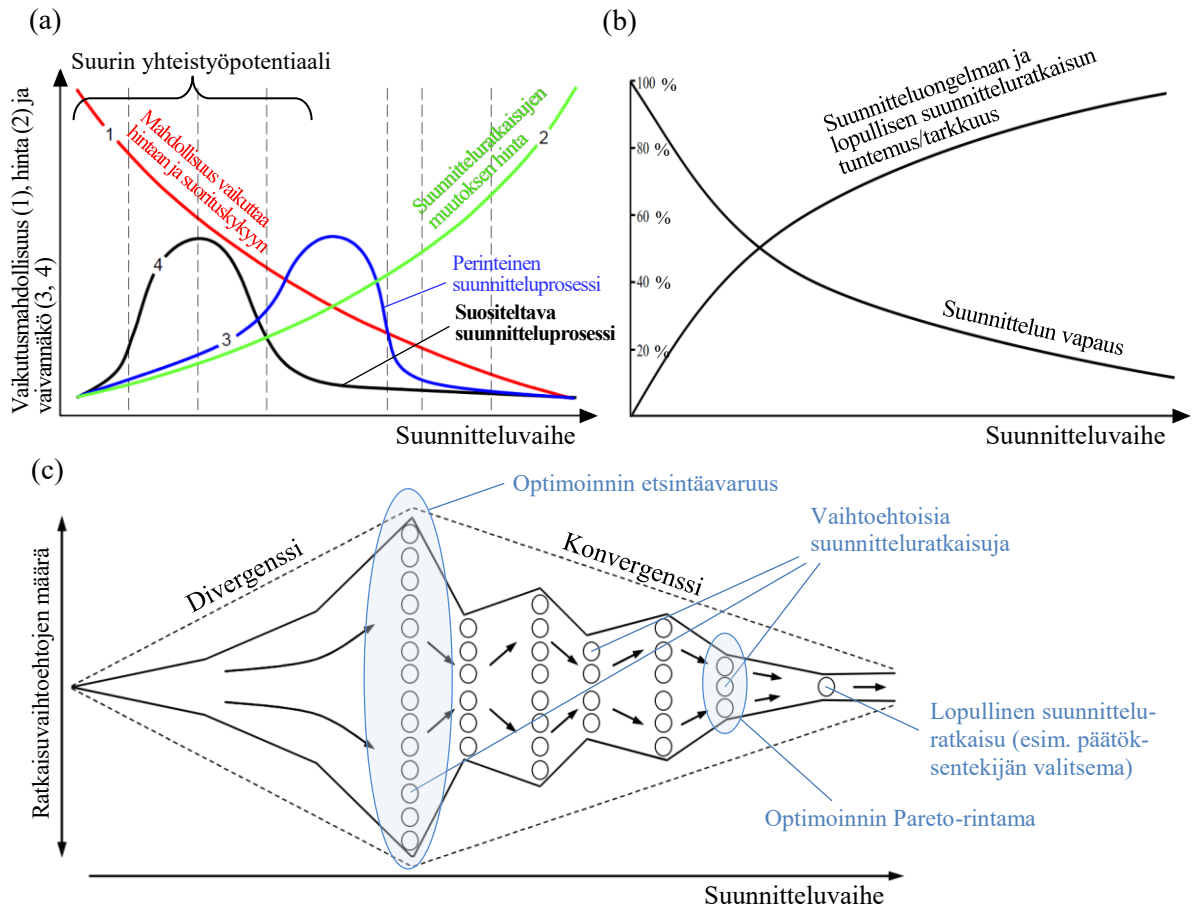


Kuva 19 Hierarkkinen strateginen energiasuunnittelu. Ylemmän tason strategisella energiasuunnittelulla on alempia tasoja ohjaava vaikutus. Alemman tason strategiat ovat yksityiskohtaisempia ja enemmän paikallisesti räätälöityjä. Visio globaalisti kestävästä energiajärjestelmästä toimii perustana strategiselle energiasuunnittelulle. (Mukaillen: Ahonen & Nuorkivi 2013; Drysdale ym. 2019; Krog & Sperling 2019.)

Ideaalisessa tilanteessa tietyn tason strategista energiasuunnittelua tehdessä ei tarvitsisi suoraan huomioida kuin yhtä tasoa ylempi energiastrategia, sillä tämän energiastrategian tulisi puolestaan huomioida sitä ylempi energiastrategia ja niin edelleen. Tämä tekisi esimerkiksi alueellisen strategisen energiasuunnittelun implementoinnista helposti lähestyttävämpää, johdonmukaisempaa ja suoraviivaisempaa. (Ahonen & Nuorkivi 2013; Drysdale ym. 2019.) Suomella ei ole virallista ja konkreettista täysin kestävään energiajärjestelmään enintään muutaman vuosikymmenen aikahorisontilla tähtäävää kansallista energiastrategiaa, mutta esimerkiksi Rinne ym. (2018) esittämää skenaariota voidaan käyttää lähtökohtana Suomeen sijoittuvaa alueellista strategista energiasuunnittelua tehdessä.

Strategiseen energiasuunnitteluun liittyy keskeisesti tiivis yhteistyö eri suunnittelualojen (esimerkiksi kaavoitus, arkkitehtisuunnittelu ja talotekninen suunnittelu) välillä heti suunnitteluprosessin alkuvaiheesta asti. Tämä poikkeaa selvästi perinteisestä toimintamallista, jossa eri suunnittelualat seuraavat toisiaan määrättyssä järjestyksessä, niin että järjestyksessä viimeisellä suunnittelualla on lähes kaikki suunnitteluratkaisut lukittuina jo etukäteen, jolloin niihin joudutaan sopeutumaan epäoptimaalisella tavalla. Kaikista tehokkaimmin välttääkin haitalliselta osaoptimoinnilta, kun heti suunnitteluprosessin alkuvaiheessa eri näkökulmat huomioidaan mahdollisimman tasavertaisesti. Erityisesti kaupunkien ja rakennuksien energiasuunnittelussa aikaisen vaiheen suunnitteluratkaisuilla on valtavan suuri merkitys niiden lopulliseen suorituskykyyn ja kustannuksiin. (Ahonen & Nuorkivi 2013; Dogan 2015; Hedman 2016; Li 2017; Morini ym. 2019; Shi ym. 2017; Tian ym. 2015; Waibel ym. 2019.) Kuvassa 20 havainnollistetaan, kuinka aikaisen vaiheen suunnittelussa on paras mahdollisuus vaikuttaa suunnitelman lopputulokseen minimaalisella kustannuksella (a); kuinka

suunnitteluvaiheen edetessä suunnitteluongelman ja -ratkaisun tuntemus ja lähtötiedot tarkentuvat, mutta samalla suunnittelun vapaus rajoittuu (b); sekä kuinka suunnitteluprosessi etenee suunnitteluongelman ymmärtämisestä ja kaikkien mahdollisten suunnitteluratkaisujen määrittämisestä (divergenssi) kohti lopullisen suunnitteluratkaisun valintaa (konvergenssi), ja kuinka se puolestaan linkittyy optimointimenetelmiin (c).



Kuva 20 Suunnitteluratkaisujen riippuvuus suunnitteluvaiheesta eri näkökulmista tarkasteltuna. Huomioi, että kuvaajat ovat skemaattisia (suuntaa antavia, havainnollistavia). (Muokattu: (a): Li 2017; (b) ja (c): Derelöv 2009.)

Yllä esitetystä skemaattisista kuvaajista voidaan havaita, että mitä aikaisemmassa vaiheessa suunnitteluprosessia eri suunnitteluvaihtoehdot ja -näkökulmat otetaan huomioon, sitä enemmän niiden huomioimisella voidaan vaikuttaa lopullisen suunnitteluratkaisun suorituskykyyn sekä koko suunnitteluprosessin kustannuksiin. Myöhäisessä vaiheessa tehtävät suunnitteluratkaisut ovat hyvin rajattuja ja/tai kalliita. Ongelmana aikaisen vaiheen suunnittelussa on usein suunnitteluongelmaa koskevan tietämyksen ja lähtötietojen vähyys, mutta niiden puutteellisuudesta huolimatta suunnitteluprosessin painopistettä olisi suositeltavaa siirtää enemmän aikaisen vaiheen suunnittelun alueelle (Derelöv 2009; Li 2017; Shi ym. 2017; Tian ym. 2015). Toinen aikaisen vaiheen kokonaisvaltaisen suunnittelun ongelmallisuus liittyy siihen, että eri näkökulmien huomioiminen heti suunnitteluprosessin alkuvaiheessa eli niin kutsuttu integroitu suunnitteluprosessi (engl. *integrated design process*) vaatii läheistä ja saumatonta yhteistyötä sekä erinomaista informaationkulkua eri suunnittelualojen välillä – tähän ongelmaan voidaan vastata paitsi toimintatapoja muuttamalla niin myös aikaisen vaiheen suunnitteluun soveltuvien kokonaisvaltaisten sekä helposti lähestyttävien

suunnittelumenetelmien ja -työkalujen kehittämällä. (Acha ym. 2018; Derelöv 2009; Dogan 2015.) Uusiutuvia alueellisia energiajärjestelmiä koskevassa päätöksenteossa on merkittävä tarve tällaisille menetelmille ja työkaluille (Acha ym. 2018; Hedman 2016; Keirstead & Shah 2013), mikä on eri työkalujen yhteensopivuusongelmien ohella yksi suurimmista syistä siihen, että kaupunkien ja muiden alueiden aikaisen vaiheen suunnittelussa hyödynnetään (kvantitatiivisia) alueellisia energia-analyysijä vain harvoin (Nault ym. 2017; Tian ym. 2015; Viholainen ym. 2016). Nämä harvoin tehtävät alueelliset energia-analyysit perustuvat tyypillisesti varsin rajattuun manuaalisesti suoritettavaan vaihtoehtojen tarkasteluun (ks. esim. Kekkonen 2017; Nissinen 2019; Viholainen ym. 2016) tai yrityksen ja erehdyksen kautta manuaalisesti iteroitavaan energiasimulointiin (engl. *manual trial and error simulation-aided energy design*), jotka ovat kummatkin suppeita, epätehokkaita ja suppeuteensa nähden hyvin aikaa vieviä menetelmiä alueelliseen energiasuunnitteluun. Näiden menetelmien objektiivisuus on lisäksi hyvin riippuvainen analyysin suorittajan omista subjektiivisista päätöksistä koskien esimerkiksi analysoitavien suunnitteluvaihtoehtojen valintaa. (Shi ym. 2017; Tian ym. 2015.)

Alueellisiin energiajärjestelmiin liittyvän päätöksenteon tulisi pohjautua perusteelliseen vaihtoehtojen objektiiviseen läpikäymiseen sekä kattaviin herkkyys- ja skenaarioanalyysiin, joilla voidaan hallita energiajärjestelmien suunnitteluun liittyvää epävarmuutta. Puute helposti lähestyttävistä ja tehokkaista menetelmistä (ja työkaluista) perusteelliseen suunnitteluvaihtoehtojen läpikäymiseen, tietyn parametrin systemaattisen muutoksen vaikutuksen tutkimiseen (herkkyysanalyysi) ja lukuisten eri skenaarioiden huomioimiseen ovatkin edellä mainittujen syiden eli lähtötietojen niukkuuden ja tiiviin yhteistyövaatimuksen lisäksi merkittäviä esteitä alueellisten energia-analyysien hyödyntämisen yleistymiselle (erityisesti aikaisen vaiheen suunnittelussa). (DeCarolis ym. 2017; Keirstead & Shah 2013; Lund 2014; Shi ym. 2017; Tian ym. 2015.) Kuten luvussa 3.2.4 tuotiin ilmi, alueellisessa energiasuunnittelussa eri näkökulmat ja suunnitteluvaihtoehdot sekä muuttuvat lähtötiedot voidaan huomioida eksplisiittisesti energiajärjestelmän kokonaisvaltaisen mallintamisen avulla. Näin ollen kokonaisvaltaista alueellisen energiajärjestelmän mallintamista voidaan itsessään pitää aikaisen vaiheen tiiviin yhteistyön (eli eri näkökulmien huomioimisen) mahdollistajana, tai ainakin tärkeänä osana sitä, ja osittain myös lähtötietojen epätarkkuuden huomioimisen mahdollistavana tekijänä. Eri suunnitteluvaihtoehtojen kattavaan, systemaattiseen ja objektiiviseen läpikäymiseen (vrt. yrityksen ja erehdyksen menetelmällä manuaalisesti suoritettava simulointiprosessi) tarvitaan kuitenkin eri näkökulmat yhdistävän kokonaisvaltaisen energiajärjestelmämallin lisäksi erillinen työkalu eli optimoinnin osamalli (ks. kuva 18), jolloin voidaan puhua *optimointimallintamisesta* (Shi ym. 2017). Optimointimallintaminen on keskeinen osa ohjelmistopainotteista alueellista energiaoptimointia. Optimointimenetelmien hyödyntäminen helpottaa ja tehostaa aikaisen vaiheen yhteistyötä eri suunnittelualojen välillä, sillä optimointimenetelmien avulla voidaan varsin suoraviivaisesti ja nopeasti tutkia, mikä vaikutus erilaisilla tavoitteenasetteluilla, lähtötiedoilla, oletamuksilla tai skenaarioilla on suotuisimpiin suunnitteluratkaisuihin (ks. luku 3.3.2). Ilman optimointimenetelmien hyödyntämistä tällainen toimintamalli ei juurikaan olisi mahdollista (DeCarolis ym. 2017; Shi ym. 2017).

Tärkeä näkökulma koskien strategista energiasuunnittelua on myös energia-analyysien informaation avoimuus, analyysimenetelmien jäljitettävyyys ja läpinäkyvyys sekä työkalujen saatavuus. Informaation avoimuudella tarkoitetaan, että energia-analyysieihin tarvittavat ja niissä käytetyt lähtötiedot sekä analyysien tulokset ovat mahdollisimman avoimesti ja hel-

posti saatavilla. Analyysimenetelmien jäljitettävyydellä ja läpinäkyvyydellä puolestaan tarkoitetaan, että analyyseissä tehdyt alkuoletukset ja rajaukset sekä hyödynnetyt metodit ja työkalut tulisivat kaikki olla selvästi, yksikäsitteisesti ja jäljitettävästi raportoitu. Työkalujen saatavuudella tarkoitetaan, että analyyseihin tarvittavat työkalut tulisivat olla kaikkien käytettävissä tai vähintäänkin niiden yksityiskohtaiset raportoinnit tulisivat olla kaikille avoimesti saatavilla. (DeCarolus ym. 2017; Kriechbaum ym. 2018; Pfenninger ym. 2018.) On kuitenkin hyvin tyypillistä, että jopa suoralla tavalla päätöksentekoon ja sääntelyyn vaikuttavat energia-analyysit perustuvat yksityisiin (usein kaupallisiin) malleihin ja menetelmiin, joissa informaation, menetelmän ja tulosten avoimuudet ja läpinäkyvyydet eivät toteudu (Pfenninger ym. 2018). Kuvassa 21 havainnollistetaan avoimeen informaatioon ja menetelmien sekä tulosten läpinäkyvyyteen perustuvaa strategista energiasuunnittelua.

### ANALYYSIN SUORITTAJA



Kuva 21 Strategiseen energiasuunnitteluun liittyvä energia-analyysien avoimuus, jäljitettävyys ja läpinäkyvyys analyysin suorittajan (yllä) ja kohdeyleisön (alla) näkökulmista (muokattu: Pfenninger ym. 2018).

Strategiseen energiasuunnitteluun liittyvien analyysien avoimuudella ja läpinäkyvyydellä on monia hyötyjä. Avoimet analyysit ovat tieteellisempiä (mm. perustellumpia, julkisempia, korjautuvampia ja objektiivisempia) sekä toistettavampia ja yleistettävämpiä, mikä vähentää turhan ja toistavan työn sekä tutkimuksen määrää. Käytetyn datan ja menetelmien avoimuus tekee analyyseistä ja niihin pohjautuvasta päätöksenteosta ylipäätään uskottavampaa ja legitimeettisempää tarjoten myös mahdollisuuden menetelmien ja tulosten laajaan kriittiseen arviointiin, niistä oppimiseen ja niiden kehittämiseen. Analyysin suorittajan näkökulmasta avoin pääsy korkealaatuiseen informaatioon ja (vapaasti muokattaviin) työkaluihin ilman erillistä rahoitustarvetta edesauttaa tehokasta ja laadukasta analysointia, parhaiden menetelmien ja työkalujen laajaa ja nopeaa yleistymistä sekä niiden kehittymistä. (Pfenninger ym. 2018.) On huomioitava, että esimerkiksi alueellisen tason energiasuunnittelulla on kokonaisvaltaisuudestaan riippuen vähintäänkin tärkeä tai jopa äärimmäisen ratkaiseva suora vaikutus koko alueen suorituskykyyn eli satojen tai jopa satojen tuhansien ihmisten elämään,

minkä lisäksi alueelliset energiaratkaisut ovat epäsuorasti kytköksissä myös niitä ympäröivien energiajärjestelmien suorituskykyyn. Alueelliset energiaratkaisut voivat lisäksi aiheuttaa muille alueille merkittäviä taloudellisia ja ympäristöllisiä ulkoishaittoja ja -hyötyjä. Alueellisia energiajärjestelmiä koskevalla päätöksenteolla on siis yhteiskunnallisesti merkittäviä sosiaalisia ja taloudellisia vaikutuksia, mikä on myös painava syy sille, että kyseisen päätöksenteon perusteet eli alueelliset energia-analyysit tulisivat olla avoimesti, läpinäkyvästi ja laajasti arvioitavissa, toistettavissa ja kehitettävissä. (Keirstead & Shah 2013; Kriechbaum ym. 2018.)

Alueellisiin energia-analyyseihin tarvittava informaatio eli lähtötiedot ovat kuitenkin käytännössä usein jonkin tietyn instanssin hallinnassa (esimerkiksi hallinnolliset virastot ja verkko-operaattorit) ja siten rajoitetusti saatavilla. Myös analyysien menetelmät ovat tyypillisesti ainakin osittain piilotettuja kuten aiemmin mainittiin. Tarvittavia lähtötietoja hallussa pitävien instanssien tulisi pyrkiä varmistamaan lähtötietojen saatavuus, avoimuus ja käytettävyys parhaan kykynsä mukaan. Alueellisten energia-analyysien tilaajilla (esimerkiksi kaupungeilla) puolestaan on mahdollisuus ja myös valta edellyttää analyysien avoimuutta ja läpinäkyvyyttä. Informaation ja menetelmien täydellistä avoimuutta ja läpinäkyvyyttä kuitenkin estävät tai rajoittavat esimerkiksi tietosuojavaatimukset, kaupalliset intressit menetelmien piilottamiseen, lukkiutuminen (engl. *lock-in*) yksityisiin työkaluihin, institutionaalinen ja henkilökohtainen muutosinertia sekä yleinen tietämättömyys informaation ja menetelmien avoimuuden ja läpinäkyvyyden eduista strategisessa energiasuunnittelussa. Itse luotuja työkaluja (menetelmiä) ja lähtötietokirjastoja voidaan tehdä julkiseksi ja laajasti hyödynnettäväksi oikeanlaisella lisensoinnilla sekä avointen tiedonjako- ja sovelluskehitysalustojen (engl. *sharing platform, software development platform*) hyödyntämisellä. Esimerkiksi GitHub-verkkosivusto on eräs yleisesti käytetty sovelluskehitysalusta avointen työkalujen ja datakirjastojen jakamiseen sekä kehittämiseen. (Pfenninger ym. 2018.) Avoimia alueellisen energiasuunnittelun työkaluja luodessa on hyvä tiedostaa, että varsinkin aikaisen vaiheen työkaluissa yksityiskohtaisuutta ja tarkkuutta olennaisempaa on, että ne kykenevät kokonaisvaltaiseen, kattavaan ja objektiiviseen suunnitteluvaihtoehtojen läpikäyntiin – itse asiassa erittäin yksityiskohtaiset ja tarkat työkalut tarvitsevat paljon lähtötietoja, mikä voi toimia jopa esteenä niiden hyödyntämiselle aikaisen vaiheen alueellisessa energiasuunnittelussa (Li 2017; Lund 2014).

Strateginen energiasuunnittelu on avainasemassa edistyksellisten uusiutuvien energiajärjestelmien yleistymisessä. Nykyisiin teknologioihin linkittyvät organisaatiot ja instituutiot eivät todennäköisesti itse kannata, edistä tai ole aloitteellisia radikaaleja teknologisia muutoksia, kuten energiajärjestelmien muutosta, kohtaan vaan pikemminkin päinvastoin: on jopa varsin todennäköistä, että nämä organisaatiot ja instituutiot aktiivisesti ja strategisesti vastustavat radikaaleja teknologisia muutoksia ja ylipäätään kaikkia muutoksia, jotka voisivat heikentää niiden asemaa. Tämän takia ei ole itsestään selvää, että perinteisestä poikkeavat energiajärjestelmäratkaisut olisivat päätöksenteossa samanarvoisessa asemassa perinteisten energiajärjestelmäratkaisujen kanssa. (Lund 2014.) Lund (2014) tunnistaa ja tuo ilmi esimerkkejä uusien vaihtoehtojen (edistyksellisten) suunnitteluratkaisujen eliminointistrategioista (engl. *choice-eliminating mechanisms*), joita on käytetty Tanskan energiasektoria koskevassa päätöksenteossa viime vuosikymmeninä. Tällaisia strategioita ovat esimerkiksi erilaisen puolittouksien tarkoituksenmukainen mainostaminen ja puolueellisten suorituskykyanalyysien suorittaminen. Lundin esittämä vaihtoehtotietoisuuden teoria (engl. *Choice Awareness theory*) olettaa, että yllä esitetyssä yhteiskunnallisessa tilanteessa – johon periaatteessa päädytään aina ilman aktiivisia muutosta edesauttavia toimenpiteitä ja tahoja – on



yhteiskunnan kannalta suotuisaa kiinnittää erityistä huomioita eri vaihtoehtojen olemassaoloon. Tämä voidaan tehdä esittämällä monia konkreettisia uusia (edistyksellisiä) suunnitteluvaihtoehtoja perinteisten suunnitteluvaihtoehtojen rinnalle, edistämällä ja vaatimalla tasapuolisia sosioekonomisia suorituskykyanalyysijä (engl. *feasibility study methodologies*) perinteisille ja uusille suunnitteluvaihtoehdoille; tunnistamalla uusia suunnitteluvaihtoehtoja syrjivät tai rajoittavat säännöstelyt, päätöksentekoprosessit ja -elimet sekä ehdottamalla tarvittavia toimenpiteitä niiden muuttamiseksi demokraattisemmaksi. (Lund 2014.) Vaihtoehtotietoisuuden teoriaan ja sen merkitykseen sekä huomioimiseen alueellisia energiajärjestelmiä koskevassa suunnittelussa ja päätöksenteossa voi tutustua tarkemmin Lundin (2014) uusiutuvia energiajärjestelmiä käsittelevästä kirjasta. Myös Keirstead & Shah (2013) esittävät vastaavaa pohdintaa urbaaneja energiajärjestelmiä koskevassa kirjassaan. Kummankin teoksen energiajärjestelmien kehitystä koskevat pohdinnat linkittyvät osittain aiemmin esitettyyn polkuriippuvuuden teoriaan sekä sisältävät myös piirteitä niin kutsutusta *ryhmäajattelusta*: molemmat näistä ilmiöistä vääristävät demokraattista päätöksentekoprosessia vaihtoehtotietoisuuden teorian osoittamalla tavalla.

Tanskan Aalborgin yliopiston energiasuunnittelun tutkimusryhmä on luonut strategisen energiasuunnittelun tueksi nelivaiheisen energiajärjestelmien analysointiviitekehyksen, joka alkaa uusien konkreettisten suunnitteluvaihtoehtojen luomisella (1. vaihe). Tämän jälkeen uusille ja perinteisille suunnitteluvaihtoehdoille suoritetaan sosioekonomiset suorituskykyanalyysit (2. vaihe), joiden pohjalta tunnistetaan uusia vaihtoehtoja rajoittavia markkinoihin ja säännöstelyyn liittyviä tekijöitä sekä esitetään selkeästi mahdolliset markkinoita tai säännöstelyä koskevat muutosehdotukset (3. vaihe). Lopuksi viitekehyksessä tunnistetaan mahdolliset ulkoiset yleisemmän tason uusia suunnitteluvaihtoehtoja rajoittavat tekijät, kuten tarvittavien organisaatioiden tai instituutioiden puute (4. vaihe). Yllä esitetyssä nelivaiheisessa analysointiviitekehyksessä on erityisen tärkeää huomata, että energiajärjestelmien suunnittelussa tulisi ennen kaupallista suorituskykyanalyysiä (esimerkiksi perinteinen kustannus-hyöty-analyysi) suorittaa sosioekonominen suorituskykyanalyysi, jonka suorituskykyindikaattorit liittyvät esimerkiksi kestäväen kehityksen mukaisen kansallisen tason energiastrategian toteutumiseen (jonka tavoitteina voivat toimia esimerkiksi energiaomavaraisuus, energianjakelun luotettavuus ja koko energiajärjestelmän ympäristöystävällisyys) ja mahdollisesti myös muihin parlamentaarisiiin tavoitteisiin (esimerkiksi talouden kasvuun ja työpaikkojen lisääntymiseen). Myös uusien tavoitteiden esittäminen ja mukaan tuominen yleiseen keskusteluun on mahdollista. (Lund 2014.) Myös Drysdale ym. (2019) esittävät nelivaiheisen strategisen energiasuunnittelun viitekehyksen, jossa keskitytään erityisesti siihen, että aluetason strateginen energiasuunnittelu olisi yhdenmukaista kansallisen tason energiastrategian kanssa. Viholaisen ym. (2016) esittämä alueellisen energiasuunnittelun toimintamalli (ks. liite 3), jota demonstroidaan tutkimuksessa Lohjaan sijoittuvalla alueellisella energia-analyysillä, noudattaa myös peruseräiteeltään yllä esitettyjä alueellisten energiajärjestelmien analysointiviitekehyksiä, kuitenkin erityisesti painottaen paikallisten energiasektorilla toimivien toimijoiden intressien ja suunnitelmien huomioimista sekä lähtötietojen keruuprosessia: esimerkiksi paikallisella kaukolämpöyhtiöllä saattaa olla suunnitelmia tuotantonsa kehittämistä vähäpäästöisempään suuntaan, minkä vaikutustenarviointi ei ole mahdollista ilman paikallisen yhtiön suunnitelmien tuntemusta. Alueellisessa energiasuunnittelussa onkin syytä selvittää paikallisilta toimijoilta ajantasaiset tiedot tulevista energiaratkaisuista koskevista suunnitelmista (Pasanen ym. 2013). Myös Hedmanin (2016) väitöskirjassa tuodaan esille toimintamalli alueellisten energia-analyysien suorittamiseen, joka fokusoituu erityisesti alueellisen energia-analyysin laskennalliseen suorittamiseen. Liitteessä 4 esitetään kyseinen toimintamalli sekä Hedmanin väitöskirjassa esitetty yhteenveto koskien

energiatehokasta aluesuunnittelua. On tärkeää ymmärtää, että alueellisten energiaratkaisujen kaupalliset ja sosioekonomiset suorituskykyanalyysit voivat johtaa hyvin erilaisiin optimaalisiin suunnitteluratkaisuihin, mutta näiden kahden suorituskykyanalyysin välistä eroa voidaan ja tarpeen vaatiessa tulisikin yhtenäistää sopivalla sääntelyllä siten, että kaupalliset suorituskykyanalyysit johtaisivat myös sosioekonomisesti parhaaseen mahdolliseen lopputulokseen (Hedman 2016; Lund 2014). Esimerkiksi Hedman (2016) esittää konkreettisia muutosehdotuksia Suomen kaupunkisuunnittelun sääntelyyn, joilla rakennetun ympäristön energiatehokkuutta koskevien kaupallisten suorituskykyanalyysien lopputulos johtaisi myös sosioekonomisesta näkökulmasta pitkällä aikavälillä suotuisaan lopputulokseen. Sääntely ei kuitenkaan saa olla liiallista estäen uusien innovaatioiden syntyä (Hedman 2016).

Kaikissa yllä mainituissa energiajärjestelmien analysointiviitekehyksissä perustavanlaatuisen piirre on uusien innovatiivisten ja ylipäättään mahdollisimman monien eri suunnitteluvaihtoehtojen objektiivinen ja kattava analysoiminen. Esimerkiksi Lundin (2014) esittämissä, laajasti Tanskan energiasuunnittelussa hyödynnetyssä, viitekehyksessä tämä on ensimmäinen ja erittäin olennainen vaihe, joka luo perustan koko alueelliselle strategiselle energiasuunnittelulle. Kuten aiemmin mainittiinkin, kestävien alueellisten energiajärjestelmien yleistymiseen liittyvän inertian ylitsepääsemisessä yksi tehokkaimmista keinoista on mahdollisimman monien konkreettisten vaihtoehtojen esittäminen ja analysoiminen kestävyytteen tähtäävillä tavoitteenasetteluilla. Tähän tarpeeseen voidaan vastata hyödyntämällä alueellisia energiaoptimointimenetelmiä (ks. luku 3.3.2) alueellisen strategisen energiasuunnittelun kontekstissa (ks. luku 3.3.3). Tämä tosin edellyttää laaja-alaista tietämystä ja asiantuntemusta alueellisesta energiaoptimoinnista kokonaisuutena (ks. luku 3). Alueellisessa energiasuunnittelussa tulee myös huomioida, että aluetason suunnittelussa ja toimeenpanossa on useiden vuosien tai jopa vuosikymmenien aikahorisontti toisin kuin esimerkiksi yksittäisten rakennuksien suunnittelussa ja toimeenpanossa (Drysdale ym. 2019; Shi ym. 2017). Tämä johtaa siihen, että alueellisen rakennusprojektin edetessä sen alkuvaiheessa tehtyjen suorituskykyanalyysien olennaiset lähtötiedot, kuten hintatiedot ja saatavilla olevat teknologiat, saattavat odottamattomasti muuttua. Alueellisen energiasuunnittelun viitekehyselle tämä puolestaan asettaa vaatimuksen, että sen tulisi olla ainakin lähtötietojen, reunaehtojen ja tavoitteiden osalta mahdollisimman helposti ja suoraviivaisesti päivitettävissä: koko viitekehysten tulisi olla mahdollisimman vaivattomasti ja dynaamisesti päivitettävissä, siten että suunnitteluprojektin alkuvaiheessa tehdyllä työllä sitä voidaan hyödyntää yhä uudestaan minimaalisella manuaalisen lisätyön tarpeella (ideaalinen tilanne). Optimointimenetelmät omaavat aiemmin esille tuodusti merkittävän potentiaalin tämän ideaalisen tilanteen saavuttamiseksi. Selvästi siis, huomattavia etuja voidaan saavuttaa hyödyntämällä alueellisessa strategisessa energiasuunnittelussa alueellisia energiaoptimointimenetelmiä.

### **3.3.2 Alueelliset energiaoptimointimenetelmät**

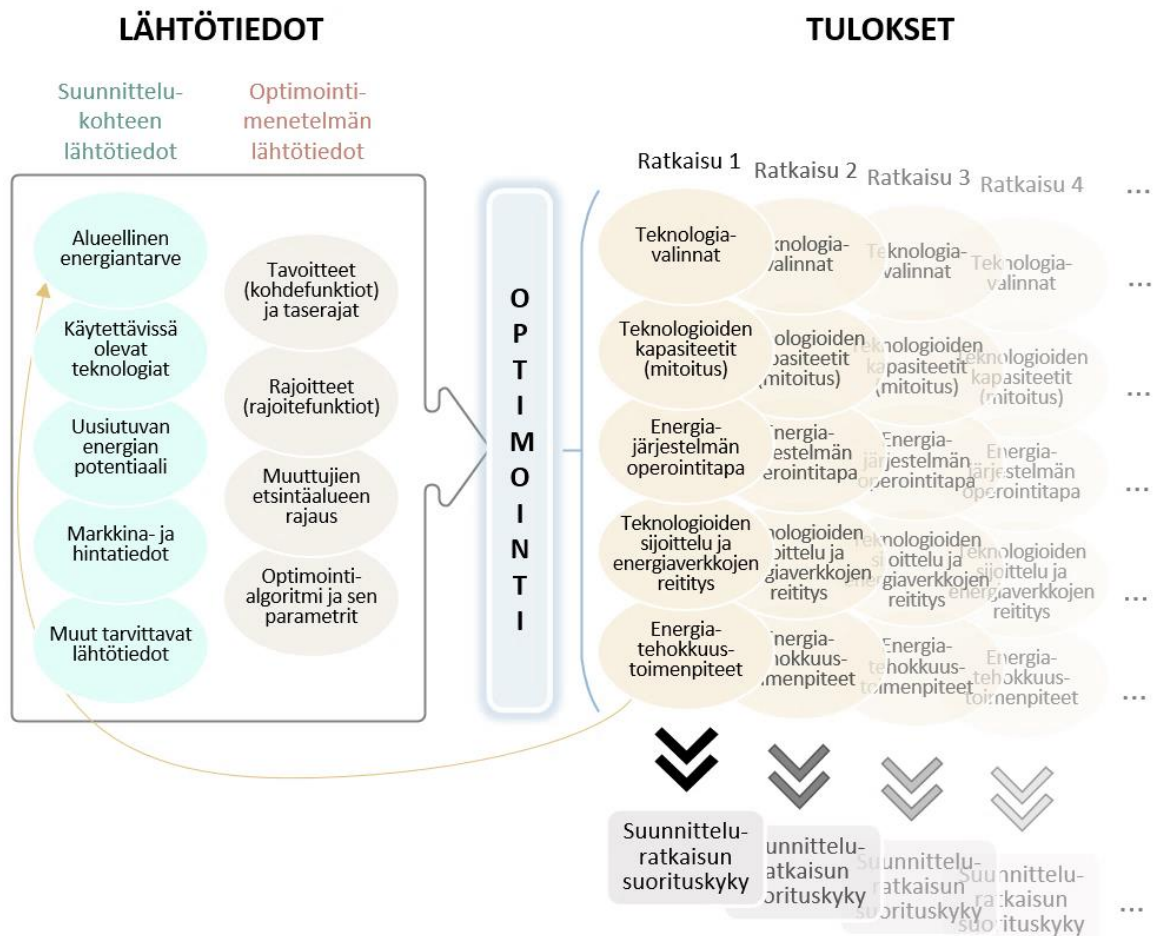
Kestävien alueellisten energiajärjestelmien realisoituminen edellyttää optimaalista uusiutuvien ja hajautettujen energiavarojen hyödyntämistä. Optimaalinen uusiutuvien ja hajautettujen energiavarojen hyödyntäminen puolestaan vaatii edistyksellisiä alueellisia energiajärjestelmiä, kokonaisvaltaista systeemitason suunnittelua sekä menetelmiä ja työkaluja optimaalisten ratkaisujen etsimiseen. Kuluvalla vuosituhanella onkin tehty huomattava määrä tutkimustyötä menetelmien luomiseen, joilla voitaisiin optimoida edistyksellisten alueellisten energiajärjestelmien rakennetta ja käyttötapaa koskien esimerkiksi paikallista uusiutuvaa energiaa, rakennuksien energiantarvetta ja energian varastointia alueellisella tasolla. Suuren haasteen näille menetelmille kuitenkin luovat energiajärjestelmien tekninen monimutkai-

suus, sosioekonominen merkittävyys ja kompleksiset vuorovaikutukset ihmisten sekä ympäristönsä kanssa. Helposti lähestyttävien ja kokonaisvaltaisten edistyksellisten energijärjestelmien optimointimenetelmien tarve on ilmeinen. (Bollinger & Evins 2015.)

Energiaoptimoinnin historian voidaan tulkita ulottuvan vuoden 1973 ensimmäiseen öljykriisiin, jonka johdosta energiapolitiikka alkoi yhä selvemmin muodostua omaksi itsenäiseksi tieteenalaksi, ja samalla vuosikymmenellä luotiin myös ensimmäiset nykyaikaiset energijärjestelmämallit. Tuolloin toisessa maailmansodassa kehitettyjä matemaattisia optimointimenetelmiä, kuten lineaarista optimointia, alettiin hyödyntää monimutkaistuvien energijärjestelmien strategisen suunnittelun apuna. (Kriechbaum ym. 2018.) Alueellisen ja kansallisen tason energiaoptimoinnit ovat yleistyneet etenkin 2000-luvun aikana nopeasti. Aikaisista tutkimuksista voidaan mainita esimerkiksi Lehtilän & Pirilän (1996) tutkimus, jossa esitetään lineaarinen optimointimenetelmä kansallisen tason kustannusoptimaalisen energiantuotantoratkaisun määrittämiseen. Cormio ym. (2003) esittävät yksityiskohtaisemman menetelmän alueellisten energijärjestelmien päästö- ja kustannusoptimointiin huomioiden laajemmin myös uusiutuvan energian. Lehtilän & Pirilän sekä Cormion ym. esittämät energijärjestelmien optimointitavat perustuvat staattisen energiamallin lineaariseen optimointiin, missä energiantarve mallinnetaan pysyvyyssäyränä, energiantuotanto erittäin aggregoidusti erilaisia energiantuotantopotentiaalin parametreja hyödyntäen ja energijärjestelmä eräänlaisena staattisena energiaketjujen verkkona eri operaatioiden välillä (primäärienergiälähteet, energiamuuntajat ja loppukäyttäjät), jonka toimintaa pohjimmiltaan säätelee energia- ja massatasapainon toteutumiset. Vaikka yllä esitetyt hyvin yksinkertaistetut ja useiden päivien, viikkojen tai jopa vuositasoenergiatasapainoon perustuvat lähestymistavat alueellisten energijärjestelmien optimointiin omaavat samoja piirteitä ja periaatteita modernien optimointimenetelmien kanssa, niin ne eivät ole tarpeeksi dynaamisia ja tarkkoja edistyksellisten alueellisten energijärjestelmien optimointiin – eikä niitä tai vastaavia menetelmiä ole siihen tyypillisesti alun perin tarkoitettukaan (Kriechbaum ym. 2018).

Alueellisen energiaoptimoinnin muuttujat voidaan jakaa neljään pääryhmään, jotka ovat tuotanto- ja varastointiteknologiat (valitseminen), niiden kapasiteetit (mitoittaminen), energijärjestelmän operointitapa (määrittäminen) (engl. *dispatch*) sekä teknologioiden sijoittelu (määrittäminen), joka sisältää myös mahdollisten energiaverkkojen reitityksen. Näille muuttujille etsitään kohdefunktion tai -funktioiden ja mahdollisten rajoitteiden mukaisesti parasta mahdollista yhdistelmää perustuen erilaisiin lähtötietoihin, joista tärkeimpiä ovat esimerkiksi alueellinen energiantarve, alueen uusiutuvan energian tuotantopotentiaali sekä teknologia-, markkina-, ja hintatiedot. (Keirstead & Shah 2013; Lund 2014; Morvaj ym. 2016; Stadler ym. 2014.) Alueellista energiantarvetta on tosin mahdollista käsitellä myös viidentenä muuttujien pääryhmänä sen sijaan, että sitä käsiteltäisiin optimointiongelman vakiona tai stokastisena syöttötietona (Prina ym. 2018), mutta tyypillisesti alueellista energiantarvetta ei kuitenkaan käsitellä muuttujana alueellisissa energiaoptimoinneissa (Reynolds ym. 2017). Alueen energiantarpeen käsitteleminen alueellisen energiaoptimoinnin muuttujana tarkoittaa käytännössä sitä, että alueen rakennuksien energiatehokkuustoimenpiteet eli uudisrakentamisessa rakennuksien energiatehokkuuteen vaikuttavat suunnitteluratkaisut sisällytetään alueen energiaoptimointiin yhdeksi tai useammaksi muuttujaksi (esimerkiksi rakennuksien eristepaksuudet, auringonsuoja- ja lasitusratkaisut sekä talotekniset laitteistovalinnat) joko eksplisiittisesti bottom-up-mallintamalla tai erilaisten top-down energiatehokkuusfunktioiden avulla (ks. esim. Prina ym. 2018; Stadler ym. 2014). Sekä alueen energijärjestelmäkonsepti (perinteinen–edistyksellinen) että alueen energiaverkkojen määrä (mille ener-

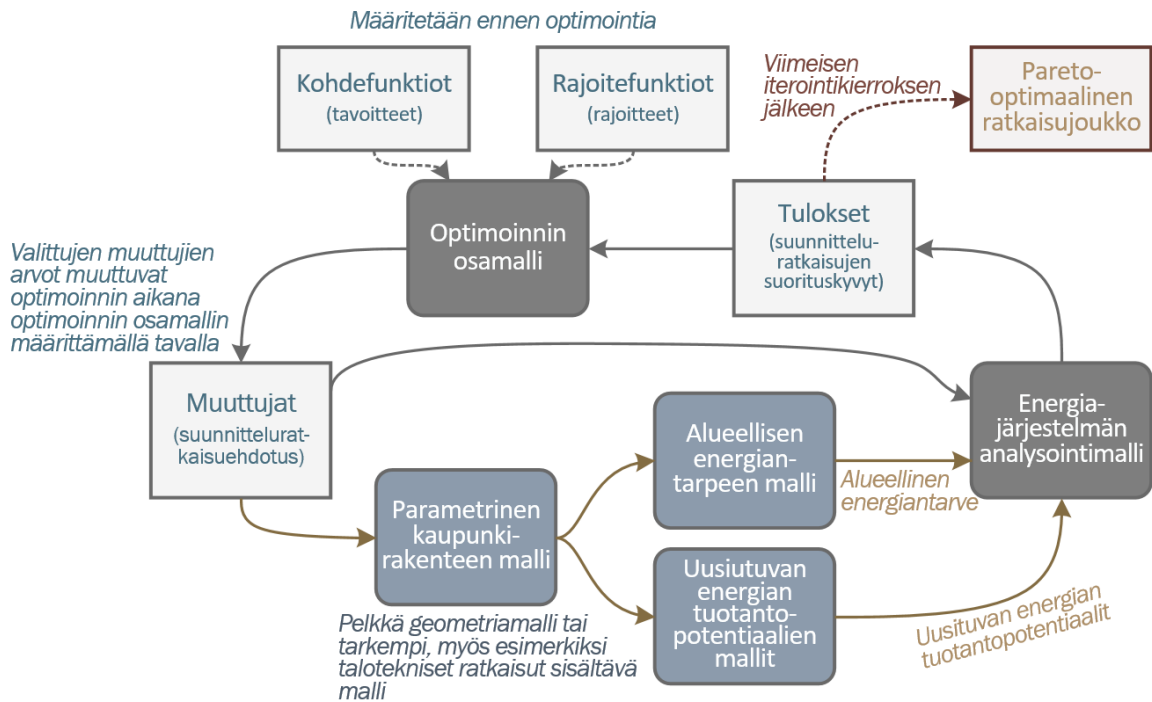
giavektoreille rakennetaan energiaverkot) eivät kovin hyvin sovellu alueellisen energiaoptimoinnin muuttujiksi, ja kirjallisuustutkimuksen perusteella ne ovatkin alueellisissa energiaoptimoinneissa lähes aina ennen optimointia lukittavia suunnitteluratkaisuja eli optimoinnin lähtötietoja (ne kuitenkin periaatteessa voidaan myös sisällyttää alueellisen energiaoptimoinnin muuttujiin). Kuvassa 22 esitetään alueellisen energiaoptimoinnin yleisimmät, ja myös tärkeimmät, lähtötiedot ja muuttujat sekä havainnollistetaan alueellisen energiaoptimoinnin tyypillistä optimointiprosessia, joka vastaa hyvin pitkälti esimerkiksi Yhdysvaltain Lawrence Berkeley National Laboratoryn kehittämän DER-CAM-mallin (LBNL 2019) lähestymistapaa alueellisten energiajärjestelmien optimointiin (ks. esim. DeForest ym. 2014; Stadler ym. 2014).



Kuva 22 Alueellisen energiaoptimoinnin tärkeimmät lähtötiedot ja tulokset. Alueellinen energiaoptimointi voi sisältää myös enemmän tai vain osan esitetyistä lähtötiedoista ja tuloksista (ts. muuttujista). Huomaa, että erityisesti alueellinen energiantarve voi toimia sekä lähtötietona että muuttujana optimoinnissa (energiatehokkuustoimenpiteet).

Kokonaisvaltainen alueellinen energiaoptimointi voi sisältää myös lähtötietoja ja muuttujia, joita ei olla esitetty yllä olevassa kuvassa. Jos alueelliseen energiaoptimointiin halutaan esimerkiksi sisällyttää ihmisten käyttäytymisen huomioiminen, tarvitaan lähtötiedoksi ihmisten käyttäytymistä kuvaava malli. Samalla tavoin uusien teknologioiden leviämisen huomioimisen lähtötietovaatimuksena on teknologioiden leviämistä kuvaava malli (ks. esim. Moresino & Fragnière 2018), mikroilmaston huomioimisen lähtötietovaatimuksena on alueen mikroilmastoa kuvaava malli ja lämpöverkon lämpötilan vaikutuksen huomioimisen lähtötietovaa-

timuksena on malli, joka kuvaa lämpöverkkoon kytköksissä olevien teknologioiden suorituskykyä lämpöverkon lämpötilan funktiona. Yllä olevassa kuvassa mainitsemattomia kokonaisvaltaisen energiaoptimoinnin muuttujia voisivat puolestaan olla esimerkiksi alueen kulkuyhteydet ja kaupunkirakenteen morfologia (ks. esim. Reinhart ym. 2013; Waibel ym. 2019). Kuten aiemmin on tässä työssä tuotu ilmi, kokonaisvaltainen alueellinen energiaoptimointi linkittyykin hyvin vahvasti moninäkökulmaiseen alueellisen energiajärjestelmän mallintamiseen, johon optimointi siis sisältyy yhtenä osamallina. Tällöin voidaan aiemmin mainitusti puhua optimointimallintamisesta. Periaatteessa alueellinen energiaoptimointi on aina optimointimallintamista, sillä siihen liittyy aina sekä malli, eli kuvaus todellisuudesta, että mallin optimointiin kykenevä toiminto. Mallintamisrajoituksen hyödyntämiseen perustuvassa alueellisessa energiaoptimoinnissa mallintaminen ja optimointi ovat erityisen selvästi toisistaan irrallisia kokonaisuuksia, jotka vaihtavat syklisellä tavalla toistensa kanssa informaatiota (ks. kuva 23). On hyvä myös huomioida, että alueellisessa energiaoptimoinnissa voi olla kuvassa 22 esitettyä vähemmänkin lähtötietoja ja muuttujia, jos esimerkiksi ei ole tarvetta sisällyttää taloudellista arviointia (lähtötietoja vähemmän) tai teknologioiden sijoittelua (muuttujia vähemmän) alueelliseen energiaoptimointiin. Uusiutuvien energiajärjestelmien optimointi on usein erittäin laskentaintensiivistä vaatien tuntikohtaista energiajärjestelmien simulointia (Lund 2014), minkä takia siinä onkin syytä välttää sellaisten muuttujien sisällyttämistä optimointiin, joille voidaan määrittää ilman optimointimenetelmiä yksiselitteisesti tai muuten analyysin tavoitteiden kannalta hyväksyttävällä tavalla paras mahdollinen suunnitteluratkaisu. On myös tärkeää, että analyysin tavoitteiden kannalta merkityksettä tai vähämerkityksisiä muuttujia ei sisällytetä alueelliseen energiaoptimointiin. Tällä tavoin optimoinnin etsintäavaruutta ei turhaan laajenneta, jolloin sen tehokkuus ja tarkkuus pysyvät mahdollisimman hyvällä tasolla. Optimoinnin tehokkuutta voidaan lisäksi parantaa huomattavasti yksittäisten muuttujien etsintäalueen harkitulla rajaamisella eli asettamalla niille etsinnän ala- ja/tai ylärajat sekä mahdollisesti myös porrastamalla niiden etsintäalueet. Muuttujien valinnassa ja niiden etsintäalueen rajaamisessa voidaan hyödyntää muuttujien (tarkemmin: muuttujaehdokkaiden) parametrissa analyysiä, joka esiteltiin aiemmin luvussa 2. (DeCarolis ym. 2017; Shi ym. 2017.) On kuitenkin huomioitava, että etukäteen lukittavien suunnitteluratkaisujen päätös eli tiettyjen muuttujaehdokkaiden poissulkeminen optimoinnista tulee aina tehdä erityisen suurta harkintaa käyttäen sekä huomioiden, että yksittäisillä muuttujilla saattaa olla lineaarisia tai epälineaarisia yhteisvaikutuksia muiden muuttujien kanssa. Epäselvässä tilanteessa muuttujaehdokas tulee aina sisällyttää optimointiin mukaan analyysin luotettavuuden ja objektiivisuuden säilyttämiseksi.



Kuva 23 Alueellisen energiaoptimoinnin optimointimallintamisen prosessi. Vaaleapohjaiset laatikot kuvastavat informaatiota ja tummapohjaiset laatikot malleja. Kuvan alareunan kautta kulkevassa optimointisyklissä (siniset ja harmaat laatikot) alueellinen energiantarve on muuttujana ja ylemmässä syklissä (vain harmaat laatikot) lähtötietona. (Mukaiillen: Tian ym. 2015; Waibel ym. 2019.)

Yllä olevassa kuvassa esiintyvä optimoinnin osamalli voi periaatteessa olla mikä tahansa ohjelma tai koodi, joka kykenee suorittamaan matemaattisen heuristisen optimoinnin vastaanottamiinsa tietoihin perustuen (suunnitteluratkaisut suorituskykyineen) sekä vaihtamaan tarvittavalla tavalla tietoa toisten osamallien kanssa, kuten aiemmin mallintamisrajapintoihin perustuvan mallintamisen yhteydessä esitettiin (ks. luku 3.2.4). Optimoinnin osamalleissa on syytä erottaa matemaattiset ohjelmointikielet (AML) ja ratkaisimet toisistaan. Optimointiongelma (ja mahdollisesti myös alueen energiamalli) voidaan muotoilla matemaattisilla ohjelmointikielillä, mutta optimointiongelman ratkaisuun vaaditaan erillisen ratkaisimen kutsumista, joka sisältää optimointialgoritmeja. Kirjallisuustutkimuksen perusteella seuraavat matemaattiset ohjelmointikielet ovat erityisen tyypillisiä alueellisissa energiaoptimoinneissa: GAMS, AIMMS ja AMPL, joiden ratkaisimeksi soveltuu esimerkiksi CPLEX. Näiden lisäksi tyypillisiä alueellisen energiaoptimoinnin osamalleja ovat MATLAB ja erilaiset Python-ohjelmat, mitkä perustuvat omiin ohjelmointikieliinsä ja omiin tai vaihtoehtoisesti ulkopuolisiin ratkaisimiin (esimerkiksi CPLEX).

Optimoinnin osamalli siis sisältää aina siihen integroidun optimointialgoritmin tai monia optimointialgoritmeja. Tyypillisimpiä rakennuksien energiaoptimoinnin optimointialgoritmeja ovat geneettiset algoritmit ja parviälyalgoritmit (engl. *particle swarm optimization*), mutta monia muitakin algoritmeja, muun muassa erilaisia hybridialgoritmeja, on käytetty yksittäisissä tutkimuksissa (Nguyen ym. 2014). Optimoinnin saralla varsin tunnettu ”no free lunch” -teoria väittääkin, että ei ole olemassa sellaista optimointialgoritmia, joka olisi ylivoimainen jokaisen optimointiongelman ratkaisemiseen, mutta sen sijaan tietynlaisiin optimointiongelmiin soveltuvat tietynlaiset optimointialgoritmit paremmin kuin toiset (Nguyen ym. 2014; Shi ym. 2017). Oikeanlaisen optimointialgoritmin ja sen parametrien (esimerkiksi

geneettisissä algoritmeissa mutaatiotodennäköisyyden) määrittäminen ei siis ole suoraviivainen tehtävä, vaan se vaatii (syvällistä) ymmärrystä optimoinnista ja kyseessä olevan optimointiongelman luonteesta. Lisäksi vankka kokemus optimoinnista auttaa paljon. (Alanne 2018; Nguyen ym. 2014; Sirén 2016.) Helposti lähestyttävissä optimointityökaluissa tulisi tämän helpottamiseksi olla valmiiksi asetettuna niiden suunnittelutarkoitukseen todennäköisesti hyvin soveltuvia optimointialgoritmeja parametreineen. On syytä huomata, että kuvan 23 tyyllisessä alueellisessa energiaoptimoinnissa optimoinnin osamallin täytyy sisältää nimenomaan heuristinen optimointialgoritmi, koska kohdefunktion täydellinen matemaattinen muotoilu ei ole esillä<sup>10</sup>, jolloin myöskään etsinnän gradientti-informaatio ei ole saatavilla eli analyttisiä algoritmeja ei voida hyödyntää (Nguyen ym. 2014). Esimerkiksi Palonen ym. (2013) erittelevät tarkemmin rakennuksien energiasuunnitteluun soveltuvia optimointialgoritmeja ja -työkaluja. Palonen ym. myös esittävät varsinkin yksittäisten rakennuksien energiaoptimoinnissa viime vuosina jo kaupallisestikin hyödynnetyn MOBO-optimointityökalun (Multi-Objective Building Optimization). MOBO on avoimesti saatavilla oleva optimoinnin osamalli, joka tulee itse linkittää muiden tarvittavien mallintamisrajapinnan osamallien kanssa tiedonvaihdon tapahtuessa tekstitiedostojen avulla (Palonen ym. 2013). Tämä ei kuitenkaan ole erityisen yksinkertainen tehtävä riippuen muun muassa linkitettävän ohjelman lähtö- ja tulostietojen formaatista sekä niiden saatavuudesta ja selkeydestä, ja esimerkiksi Mohammadi ym. (2013) tunnistavatkin laajaan kirjallisuustutkimukseen perustuen selvän puutteen alueelliseen energiasuunnitteluun soveltuvista helposti lähestyttävistä optimointimallintamisen menetelmistä ja työkaluista.

Kuvassa 23 esiintyvä energiajärjestelmien analysointimalli voi periaatteessa olla mikä tahansa ohjelma tai työkalu, jolla voidaan määrittää tarkasteltavan energiajärjestelmän tavoitteiden mukainen suorituskyky vaadittavalla spatiotemporaalisella tasolla sekä tarvittavalla analyysin kokonaisvaltaisuuudella, tarkkuudella ja laskennan ajallisella tehokkuudella. Edellä mainittuja energiajärjestelmän analysointimallin vaatimuksia, varsinkin kestävien edistyksekkäiden energiajärjestelmien osalta, on pohdittu työn aiemmissa luvuissa laajasti ja moninäkökulmaisesti. Lyhyesti ja yleistäen voidaan kuitenkin todeta, että kestävään kehitykseen tähtäävän tai edes huomioon ottavan alueellisen energiajärjestelmän analysointimallin tulisi kyetä analysoimaan integroitua älykkäitä alueellisia energiajärjestelmiä (ts. energiasektorit eivät ole itsenäisiä ja vuorovaikuttavat älykkäällä tavalla toistensa kanssa) maksimissaan noin tunnin aika-asteleella (uusiutuvan energiajärjestelmän vaatimus) mahdollistaen myös radikaalien teknologisten muutosten analysoimisen tasavertaisesti perinteisten suunnitteluratkaisujen kanssa (Lund 2014). Lisäksi on eduksi, jos malli kykenee erottamaan toisistaan suunnitteluratkaisun teknisen suorituskyvyn, sosioekonomisen suorituskyvyn ja kaupallisen suorituskyvyn sekä mahdollisesti myös ideaalisen suorituskyvyn, jossa ei huomioida teknisiä, taloudellisia tai sosiaalisia rajoitteita vaan ainoastaan fysikaaliset rajoitteet. Suunnitteluratkaisujen suorituskyvyn tarkasteleminen useammasta näkökulmasta mahdollistaa energiajärjestelmien optimaalisen kehityksen esteenä olevien pullonkaulojen tunnistamisen, minkä perusteella voidaan strategisen energiasuunnittelun periaatteiden mukaisesti esittää muutosehdotuksia liittyen esimerkiksi säännöstelyyn, päätöksentekoprosesseihin, hinnoittelumekanismeihin, veroihin ja tukiin. (Forsström ym. 2011; Lund 2014.) Connolly ym. (2010) esittävät laajan katsauksen energiajärjestelmien analysoimiseen soveltuvista työkaluista tehden havainnon, että yksikään työkalu ei ole siinä mielessä ideaalinen, että se sopsi täydellisesti

<sup>10</sup> Simulointiohjelmaa hyödyntävässä alueellisessa energiaoptimoinnissa kohdefunktion täysi matemaattinen muotoilu on ”piilossa” monen simulointiohjelman tuhansien tai jopa miljoonien laskutoimituksien takana: simulaattorit voidaan tulkita käyttäjän näkökulmasta olevan mustan laatikon mallin tapaisia funktiogeneraattoreita. (Nguyen ym. 2014.)

jokaiseen uusiutuvia energiajärjestelmiä koskevaan päätöksentekotilanteeseen: tärkeää onkin osata valita analyysin kannalta sopiva energiajärjestelmien analysointimalli (Connolly ym. 2010; Lund 2014). Luvussa 3.2.4 esitettiin erilaisia mallintamistyökaluja ja -rajapintoja, joita voidaan hyödyntää alueellisessa energiaoptimoinnissa energiajärjestelmien analysointityökaluina (esimerkiksi EnergyPLAN ja City Energy Analyst) ja parametrusten kaupunkimallien luomisessa sekä alueellisen energiatuotantopotentiaalin ja energiantarpeen määrittämisessä (esimerkiksi Grasshopper). Onkin hyvä huomioida, että kuvassa 23 esitetty yksinkertaistettu optimointiprosessi ei välttämättä täydellisesti vastaa jokaista alueellisen energiaoptimoinnin prosessia. Esimerkiksi osaan energiajärjestelmien analysointityökaluista on valmiiksi integroitu optimoinnin osamalli (esimerkiksi DER-CAM), ja toisaalta alueellisen energiaoptimoinnin prosessi saattaa sisältää useita toisiinsa linkitettyjä energiajärjestelmien analysointimalleja ja energiantarpeeseen sekä uusiutuvan energian tuotantopotentiaaliin liittyviä malleja sekä muita erillisiä osamalleja esimerkiksi paikallisen mikroilmaston huomiointiseksi (Waibel ym. 2019). Hassan ym. (2018) linkittävät esimerkiksi energianjakeluverkkomallin (NEPLAN) energiajärjestelmien analysointi- ja optimointityökaluun (DER-CAM) huomioidakseen hajautetun energiajärjestelmän optimoinnissa mahdolliset energiaverkkojen asettamat toiminalliset rajoitukset. Liitteessä 5 esitetään Hassanin ym. tutkimuksessa esitetty optimointiongelman metakuvaus (kohdefunktiot ja rajoitteet sanallisesti kuvailtuna), jota voidaan pitää kirjallisuustutkimuksen perusteella tyypillisenä alueellisen energiaoptimoinnin optimointiongelman muotoiluna, vaikkakin eri tutkimuksien välillä on myös huomattavasti vaihtelua liittyen tavoitteenasetteluihin, muuttujiin ja rajoitteisiin.

Tämän luvun alussa esitettiin alueellisen energiaoptimoinnin viisi muuttujien pääryhmää (ks. kuva 22). Näiden muuttujien optimointi (optimoinnin osamallin avulla) noudattaa pitkälti luvussa 2 esitettyjä matemaattisen optimoinnin periaatteita: ensin muodostetaan suunnitteluvaihtoehtojen etsintävaraus (muuttujat, niiden arvovälit ja rajoitefunktiot) ja määritetään tavoitteenasettelu (kohdefunktio tai kohdefunktiot), minkä jälkeen optimointialgoritmin avulla selvitetään kohdefunktion minimikohta tai kohdefunktioiden Pareto-rintama. Poikkeuksen tähän usein tekevät kuitenkin energiaverkkojen optimaalisen reitityksen (suoritetaan teknologioiden sijoittelun yhteydessä) ja energiajärjestelmän optimaalisen operointitavan määrittämiset: niiden optimointiongelmaa ei tyypillisesti muotoilla yhtälöissä (1) ja (2) esitetyllä formaalilla optimointiongelman muotoilutavalla. Tämä puolestaan johtaa siihen, että silloin niiden optimointiin ei myöskään voida soveltaa matemaattisia optimointialgoritmeja, jotka perustuvat kohdefunktion minimoimiseen. Energiaverkkojen reitityksen optimointi perustuu usein erilaisiin reititysalgoritmeihin (engl. *routing algorithm*) (ks. esim. Niemi ym. 2012; Weber ym. 2007) ja energiajärjestelmien operointitavan optimointi puolestaan voi perustua erilaisiin tuntikohtaisiin kronologisiin tai ei-kronologisiin prioriteettilistauksiin (ennalta määrätyt säännöt ja hierarkiat), jotka määrittävät esimerkiksi tuntikohtaisten marginaalikustannusten tai -päästöjen perusteella analyttisesti parhaan mahdollisen tuntikohtaisen energiajärjestelmän operointitavan (Bloess ym. 2018; Mikkola 2017; Østergaard & Andersen 2016). Esimerkiksi EnergyPLAN- ja energyPRO-ohjelmat optimoivat<sup>11</sup>

<sup>11</sup> Optimoinnilla tarkoitetaan tässä yhteydessä, kuten koko työssä, parhaan mahdollisen ratkaisun systemaattista etsimistä. Optimoinnin voidaan tulkita myös tarkoittavan pelkästään matemaattista optimointia, jonka optimointiongelma on määritelty kanonisessa muodossa. Optimoinnin määrittely laajemmin, matemaattisen optimoinnin yläkäsitteenä, vastaa esimerkiksi Steuerin (1986), Lundin (2014) ja tietosanakirja Merriam-Websterin optimoinnin määrittelyä. Kirjallisuudessa esiintyy kuitenkin kumpakin tulkintaa asiasta, ja myös käsite ”puhdas matemaattinen optimointi” (engl. *pure mathematical optimization*) on esitetty. Optimoinnin määrittely on siis ainakin osittain tulkinnanvaraista, mutta toisaalta sitä ei tulisi käyttää myöskään harhaanjohtavasti.



energiajärjestelmien operointitapaa tuntikohtaisiin (tai pienemmän aikavälin) prioriteettilistauksiin perustuvilla lähestymistavoilla (Østergaard ym. 2019). Energiajärjestelmän operointitapa on periaatteessa mahdollista optimoida myös hyödyntäen dynaamista optimointia, mutta kirjallisuustutkimuksen perusteella tämä vaikuttaisi olevan harvinaista. On syytä myöskin mainita, että teknologioiden sijoittelun optimointiin sovelletaan yleisesti matemaattista optimointia (Heleno ym. 2017).

Geidlin & Anderssonin (2007) esittämä Energy Hub -konsepti on muodostunut 2000-luvun aikana varsinkin akatemiassa yleiseksi työkaluksi monienergiajärjestelmiä koskevissa energiaoptimoinneissa (Mohammadi ym. 2017). Energy Hub on staattinen matemaattinen panos-tuotos (engl. *input/output*) energiavirtausmalli, jonka avulla mallinnetaan monienergiajärjestelmien energiavektorien energiamuunnoksia ja laadun muokkaamisia (engl. *conditioning*) sekä energian varastointia (Geidl & Andersson 2007; Ni ym. 2016). Energy Hubin panoksena voivat toimia kaasumaiset, nestemäiset ja kiinteät polttoaineet sekä muut primäärienergiälähteet ja energiavektorit, kuten vierasverkosta saatava sähkö. Energy Hubin tulospuolen puolestaan muodostaa ennalta määritetyn energiantarpeen täyttävät energiavektorit (huomioiden energian muodon, laadun ja määrän). Myös erilaiset kemialliset reagenssit ja lopputuotteet voidaan periaatteessa sisällyttää Energy Hub -konseptiin. Matemaattisemmin ilmaistuna Energy Hub koostuu panosvektorista  $\mathbf{P}$ , tulosvektorista  $\mathbf{L}$  ja näiden välisestä muunnosmatriisista  $\mathbf{C}$  (engl. *coupling matrix*) yhtälön (6) osoittamalla tavalla. (Geidl & Andersson 2007.)

$$\mathbf{L} = \mathbf{C}\mathbf{P} \quad (6)$$

Yhtälö (6) voidaan muotoilla myös seuraavasti: (Geidl & Andersson 2007; Mohammadi ym. 2017)

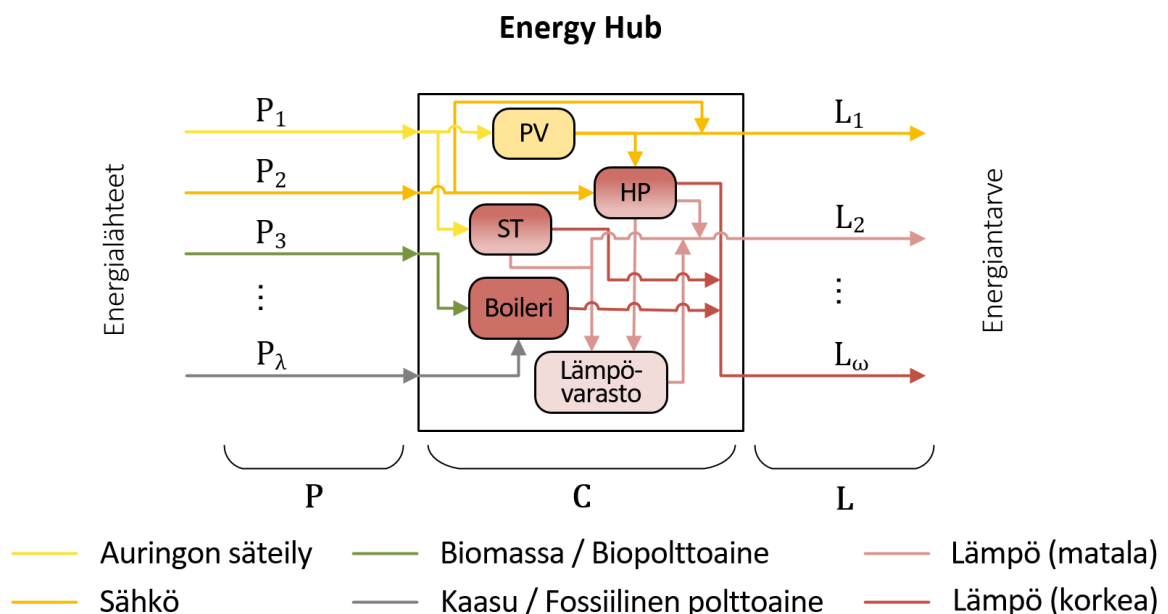
$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1\lambda} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2\lambda} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{\omega 1} & c_{\omega 2} & \cdots & c_{\omega \lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_\lambda \end{bmatrix} \quad (7)$$

missä  $L_{1\dots\omega}$  ovat tulosvektorin alkioita (energiantarpeet energiamuodoittain ja -laaduittain, joita on yhteensä  $\omega$  kpl)  
 $c_{11\dots c_{\omega\lambda}}$  ovat muunnosmatriisin alkioita (mahdollisten energiamuunnosten ja energiavirtojen laadun muokkauksien parametrit) ja  
 $P_{1\dots\lambda}$  ovat panosvektorin alkioita (käytettävissä olevat primäärienergiälähteet ja energiavektorit, joita on yhteensä  $\lambda$  kpl).

Enegy Hub -konseptin avulla optimoidaan tietyn monienergiajärjestelmän käytettävissä olevien energiavarojen ja -vektorien hyödyntämistapaa määritetyn tavoitteen mukaisesti. Tavoitteena voi olla esimerkiksi primäärienergiakulutuksen, siitä aiheutuvien päästöjen tai kustannuksien minimoiminen. Toisin sanoen yritetään löytää optimaalinen panosvektori  $\mathbf{P}$ , joka toteuttaa yhtälön (6) mahdollisimman pienellä kohdefunktion arvolla. Erityisesti Energy Hub -konseptin avulla pyritään vastaamaan seuraaviin monienergiajärjestelmän optimaaliseen operointiin liittyviin kysymyksiin: mitä, kuinka paljon ja millä tavalla energiavaroja ja -vektoreita kannattaa tietyn monienergiajärjestelmässä hyödyntää? Energy Hub -konseptia

soveltaen nämä kysymykset voidaan muotoilla matemaattiseksi optimointiongelmaiksi yhtälössä (1) esitetyn formaalin optimointiongelman mukaisella tavalla. Tärkeää on huomata, että yhtälö (7) voi olla – ja monienergiajärjestelmissä käytännössä usein onkin – alimääritetty (ts. muuttujia enemmän kuin yhtälöitä), mikä tarkoittaa, että sille on olemassa joko äärettömästi tai ei lainkaan ratkaisuja. Tämä puolestaan indikoi vahvasti optimoinnin mahdollisuudesta johtuen ongelmanasettelun vapaista muuttujista (engl. *degrees of freedom*). Energy Hub -konseptiin perustuvan optimointiongelman täydellinen matemaattinen muotoileminen ei kuitenkaan ole kovinkaan suoraviivainen tehtävä sisältäen esimerkiksi toimituskertoimien  $v$  (engl. *dispatch factor*) huomioimisen (määrittävät, kuinka suuri osa sisään syötetystä energiasta ohjautuu mihinkin prosessiin; jokaisen sisään syötetyn energiavirran toimituskertoimien summa on yksi) ja mahdollisten epälineaaristen muunnoshyötysuhteiden määrittämisen (muunnosmatriisiin alkioit vakioparametrien sijasta sisään syötetyn energian funktioita). Matemaattista muotoilua voidaan huomattavasti yksinkertaistaa lineaaristen Energy Hubien soveltamisella. Energy Hub -optimoinnin tuloksena saadaan käytännössä valitulle ajanhetkelle, esimerkiksi huipputehontarpeen hetkelle tai toisaalta esimerkiksi koko vuoden aggregoidulle ajanjaksolle, tietyn monienergiajärjestelmän optimaalinen operointitapa (engl. *optimal dispatch*) ja suorituskyky. Energy Hub -konseptia voidaan soveltaa myös osana monienergiajärjestelmien dynaamista simulointia, joka perustuu tuntikohtaisiin energiantarpeisiin ja tuotantopotentiaaleihin. (Geidl & Andersson 2007; Orehounig ym. 2014.)

Kuvassa 24 havainnollistetaan yhtälöissä (6) ja (7) esitettyjen matriisinotaatioiden linkittymistä Energy Hub -konseptiin teknisemmästä näkökulmasta. Kuvassa 24 esitetään yksi mahdollinen Energy Hubin konfiguraatio vain havainnollistavassa tarkoituksessa; Energy Hub voi periaatteessa sisältää lukemattomasti eri energialähteitä, energiantarpeita sekä näiden välillä tapahtuvia muunnoksia ja prosesseja (Geidl & Andersson 2007). Liitteessä 6 esitetään luonteeltaan tyhjentävämpi havainnollistus Energy Hub -konseptin teknisestä näkökulmasta.



Kuva 24 Energy Hub -konseptin tekninen näkökulma. Huomaa, että kuva ei ole tyhjentävä esitys Energy Hub -konseptista. (Mukaiillen: Mohammadi ym. 2017; Wu ym. 2017.)

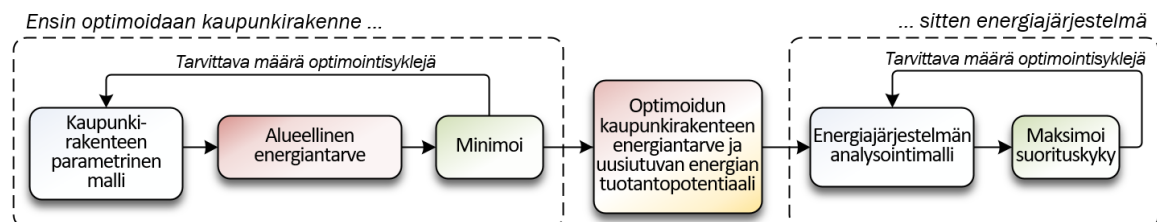
Energy Hub -konsepti ei ole erityisesti sitoutunut tai linkittynyt mihinkään tiettyyn monienergiajärjestelmän mittakaavaan: sen avulla voidaan mallintaa esimerkiksi yksittäisen rakennuksen, energiantuotantolaitoksen tai kokonaisen alueellisen energijärjestelmän energiavirtoja (Geidl & Andersson 2007). Oikeastaan onkin mahdollista tehdä tulkinta, että aiemmin kuvassa 23 esitetty energijärjestelmien analysointimalli on samalla myös Energy Hub -malli (ks. esim. Ghorab 2019; Waibel ym. 2019; Wu ym. 2017): kummassakin sisään syötettävät primäärienergiat ja energiavektorit muuntuvat erilaisten (optimaalisten) prosessien kautta energiantarpeen täyttäväiksi loppuenergioiksi. Energy Hub -konseptia on mahdollista laajentaa siten, että sen avulla voidaan mallintaa ja optimoida myös usean toistensa kanssa vuorovaikutteisen monienergiajärjestelmän operointitapaa (engl. *optimal power flow*) (Geidl & Andersson 2007; Prasanna ym. 2017). Lisäksi Energy Hubin topologiaa eli sen muunnosmatriisiin rakennetta on mahdollista optimoida (engl. *topological/structural optimization*) panosvektorin optimoimisen sijasta (Geidl & Andersson 2005). Voll ym. (2012) esittävät Energy Hub -konseptin kaltaisen geneettiseen algoritmiin ja hierarkkiseen teknologiakirjastoon (engl. *energy conversion hierarchy*) perustuvan rakennevapaan<sup>12</sup> (engl. *superstructure-free*) optimointimenetelmän hajautetuille energijärjestelmille. Onkin syytä huomata, että energijärjestelmien optimointiin voidaan joko ennalta määrätä tietty rakenne (tai topologia), jonka operointia optimoidaan, tai toisaalta optimointiin voidaan sisällyttää myös energijärjestelmän parhaan mahdollisen rakenteen etsintä. Edeltävässä tapauksessa voidaan puhua energijärjestelmän operointitavan optimoinnista tai vaihtoehtoisesti operationaalisesta optimoinnista (engl. *operational optimization*), ja jälkimmäisessä tapauksessa siihen lisätään energijärjestelmän investointioptimointi (engl. *investment optimization*) (Lund 2014). Mohammadi ym. (2017) esittävät varsin ajantasaisen ja kattavan katsauksen Energy Hub -konseptin kehityksestä ja sovelluksista, joka sisältää esimerkiksi kronologisen listauksen Energy Hub -konseptiin liittyvistä keskeisimmistä tutkimuksista. Vaikka kaikki energijärjestelmien analysointimallit eivät suoraan perustukaan Energy Hub -konseptiin (osa perustuu myös suoraan, esimerkiksi HUES), niin Energy Hub -konseptin periaatteiden ymmärtäminen antaa hyvät valmiudet monienergiajärjestelmien analysointimallien ja -optimointimenetelmien ymmärtämiselle, soveltamiselle ja kehittämiseksi, sillä Energy Hub -konsepti on hyvin perustavanlaatuinen ja yleispätevä periaatteellisen tason kuvaus monienergiajärjestelmistä ja niiden lainalaisuuksista.

Karmellos & Mavrotas (2019), Morvaj ym. (2016) ja Waibel ym. (2019) painottavat niin kutsutun yhdistetyn optimoinnin (engl. *nested/simultaneous optimization*) tärkeyttä alueellisessa energiaoptimoinnissa. Yhdistettyä optimointia voidaan pitää vastakohtana hierarkkiselle optimoinnille (ks. luku 2), joka on varsin yleinen lähestymistapa alueelliseen energiaoptimointiin (ks. esim. Hirvonen 2017; Mikkola 2017; Weber ym. 2007). Kuten luvussa 2 mainittiin, hierarkkisessa optimoinnissa on osaoptimoinnin vaara, jos toisiaan seuraavien osaoptimointiongelmien muuttujat eivät ole täysin toisistaan riippumattomia. Aiemmin kuvassa 22 esitetyt alueellisen energiaoptimoinnin muuttujat eivät ole täysin toisistaan riippumattomia, joten ne tulisi pyrkiä optimoimaan samanaikaisesti. Alueellisessa energiaoptimoinnissa muuttujien keskinäistä riippuvuutta ilmenee esimerkiksi energiantarpeen (energiatehokkuustoimenpiteiden) ja energiantuotannon välillä (Waibel ym. 2019), energiantuotannon ja -jakelun välillä (Morvaj ym. 2016) sekä teknologiavalintojen ja niiden mitoituksen välillä (Karmellos & Mavrotas 2019). Oikeastaan energijärjestelmissä on hyvin monenlai-

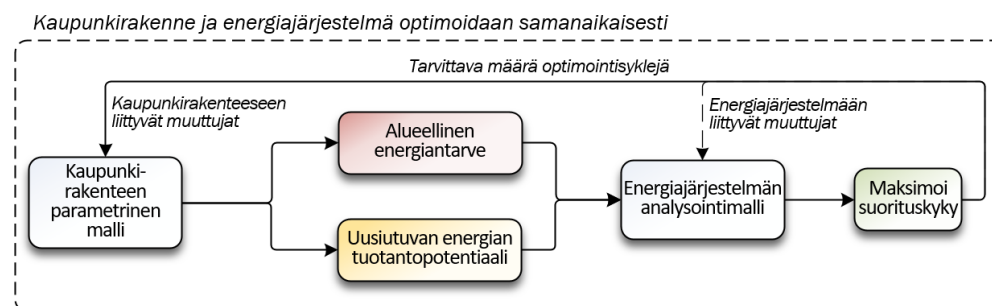
<sup>12</sup> Alueellisen energiaoptimoinnin ja varsinkin Energy Hub -konseptin yhteydessä rakennevapaalla optimoinnilla tarkoitetaan, että optimointiin ei ole etukäteen lukittu yhtä tiettyä muunnosmatriisiin rakennetta (ts. käytävissä olevat energiamuunnosprosessit, varastointimenetelmät ja niiden mahdolliset vuorovaikutustavat).

sia eri tavalla ilmeneviä synergiailmiöitä (engl. *synergies*), joita hyödyntämällä voidaan saavuttaa merkittäviä parannuksia energiajärjestelmien systeemitason suorituskykyyn (Bollinger & Evins 2015; Geidl ym. 2007; Hansen ym. 2016; Hirvonen 2007; Keirstead & Shah 2013; Lund 2014; Mikkola 2017). Luvussa 3.1.1 esitetty energiavektorien integroiminen mahdollistaa eri energiavektorien kysyntää ja tuotantoa koskevan spatiotemporaalisen vaihtelun sekä kunkin energiavektorin ominaispiirteiden hyödyntämisen systeemin kannalta parhaalla mahdollisella tavalla: tämä on yksi esimerkki energiajärjestelmien synergiailmiöistä. Toisenlaisena esimerkkinä voidaan mainita kaupunkirakenteen morfologisen suunnittelun (rakennuksien sijoittelun ja geometrioiden määrittelyn) linkittyminen myös alueelliseen energiajärjestelmään muun muassa vaikuttamalla rakennuksien energiantarpeeseen, kaupunkirakenteeseen integroitavan uusiutuvan energian potentiaaliin sekä alueen mikroilmastoon (Chen ym. 2017; Hargreaves ym. 2017; Shi ym. 2017). Voidaankin siis todeta, että alueellinen energiaoptimointi ei ole ikinä täydellisen hierarkkista (kaikki mahdolliset muuttujat optimoitaisiin erikseen<sup>13</sup>) tai täydellisen yhdistettyä (kaikki mahdolliset muuttujat optimoitaisiin samanaikaisesti), vaan jonkin asteinen asiantuntemuksella valittu välimuoto näistä kahdesta. Täydellisen yhdistetyn alueellisen energiaoptimoinnin etsintävaruuden valtavuuden hahmottamiseksi voidaan esimerkkinä mainita Morvaj ym. (2016) tutkimus, jossa optimoidaan samanaikaisesti alueellisen energiajärjestelmän mitoitus, operointitapa ja lämmitysverkon reititys. Kyseiseen optimointiongelmaan muodostuu kymmeniä tuhansia muuttujia ja rajoitteita, ja sen ratkaisemiseen normaalilla tietokoneella kuluu useita päiviä. Kuvassa 25 havainnollistetaan yhdistetyn ja hierarkkisen alueellisen energiaoptimoinnin periaatteellista eroa, mutta on hyvä huomioida, että vastaavia esimerkkejä voitaisiin muotoilla lähes rajattomasti (kaikki erilaiset kompromissit täydellisen hierarkkisen ja täydellisen yhdistetyn optimoinnin väliltä).

#### (a) Hierarkkinen optimointi



#### (b) Yhdistetty optimointi

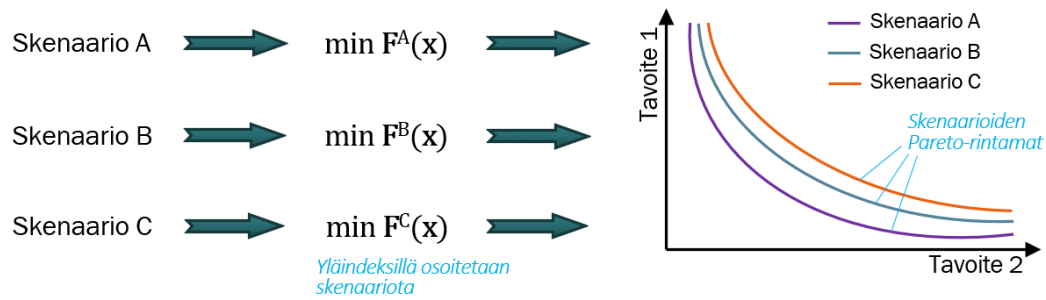


Kuva 25 Esimerkit hierarkkisesta (a) ja yhdistetystä (b) alueellisesta energiaoptimoinnista (mukaillen: Waibel ym. 2019).

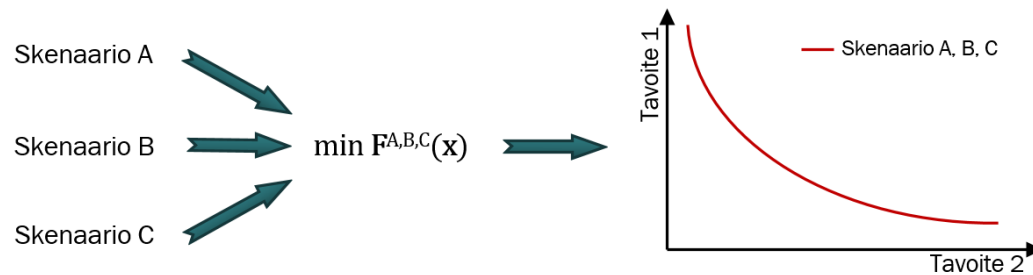
<sup>13</sup> Tällöin kyseessä on itse asiassa niin kutsuttu yksimuuttujainen etsintämenetelmä (engl. *univariate search method*), jota voidaan käyttää usean muuttujan optimointiongelman ratkaisemiseen (ei suositeltavaa).

Pickering & Choudhary (2019) painottavat energiantarpeen epävarmuuden huomioimisen tärkeyttä sellaisissa alueellisissa energiaoptimoinneissa, joissa energiantarve toimii lähtötietona eikä muuttujana. He tuovat ilmi, että esimerkiksi Iso-Britanniassa kaupallisten rakennuksien suunnitteluvaiheessa simuloitujen ja jälkikäteen mitattujen energiantarpeiden prosentuaalinen virhe on jopa 16–500 %. Niin kutsuttu skenaario-optimointi (engl. *scenario optimization*) on potentiaalinen menetelmä epävarman energiantarpeen – tai minkä tahansa muun epävarmuuden lähteen – luotettavaan huomioimiseen. (Pickering & Choudhary 2019.) Optimoinnin skenaario muodostuu optimoinnin lähtötiedoista eli parametreista, tai vaihtoehtoisesti optimoinnin skenaariolla voidaan tarkoittaa myös erilaisia käytettävissä olevia muuttujajoukkoja (tulevaisuuden teknologioiden epävarmuus). Koska osa optimoinnin parametreista ei ole täysin varmasti ennustettavissa (esimerkiksi tulevaisuuden energiantarve, poliittiset päätökset ja hintakehitys), voidaan tällaisia parametreja säätämällä luoda optimoinnille erilaisia skenaarioita. Onkin syytä huomata, että energia-analyyseissä tulisi välttää skenaario-termin käyttämistä harhaanjohtavasti, kun tarkoitetaan itse asiassa tietylle määrälle ennalta valittuja suunnitteluvaihtoehtoja suoritettavaa suorituskykyjen määrittämistä: nämä eivät ole eri skenaarioita vaan eri suunnitteluvaihtoehtoja, mutta sen sijaan eri skenaariot voivat johtaa erilaisiin suotuisiin suunnitteluvaihtoehtoihin. Skenaariot kuvastavat siis erilaisia mahdollisia tulevaisuuden kehityskulkuja. On myös hyvä huomata ero skenaario- ja herkkyysanalyysin välillä. Kuten aiemmin luvussa 2 tuotiin ilmi, herkkyysanalyysi suoritetaan valituille epävarmuutta sisältäville optimoinnin parametreille vasta optimoinnin jälkeen (lukituilla optimoiduilla muuttujilla), mutta skenaarioanalyysissä tulevaisuuden kehityskulkua koskevaa epävarmuutta sisältävät parametrit säädetään jo ennen optimointia. Epäselvyyttä saattaa lisäksi aiheuttaa stokastisia lähtötietoja sisältävän stokastisen optimoinnin ja skenaario-optimoinnin välinen yhteys. Skenaario-optimoinnissa suoritetaan yhdistetysti monia stokastisia optimointeja, minkä lopputuloksena saadaan eräänlainen paras mahdollinen kompromissiratkaisu, joka pärjää keskimääräisesti parhaiten eri skenaarioissa ottaen huomioon kunkin skenaarion todennäköisyyden (Pickering & Choudhary 2019). Näin ollen eri skenaarioiden optimointi toisistaan erillään ei siis varsinaisesti ole skenaario-optimointia, vaikkakin myös sillä tavalla on mahdollista tukea alueellisia energiajärjestelmiä koskevaa päätöksentekoa (ks. esim. Morvaj ym. 2016; Orehounig ym. 2014). Kuvassa 26 havainnollistetaan skenaario-optimointia ja sen eroa eri skenaarioiden optimointiin.

## (a) Eri skenaarioiden optimointi



## (b) Skenaario-optimointi



Kuva 26 Eri skenaarioiden optimointi (a) ja skenaario-optimointi (b).

Monia erilaisia lähestymistapoja on esitetty alueellisen energiaoptimoinnin epävarmuuden lähteiden hallitsemiseksi. Esimerkiksi Ehsan & Yang (2019) sekä Saffari ym. (2019) esittävät skenaario-optimointia vastaavat lähestymistavat alueellisen energiaoptimoinnin epävarmuuden parametrien luotettavaan huomioimiseen. Ehsan & Yang (2019) hyödyntävät skenaarioiden luomisessa kolmivaiheista menetelmää, joka pohjautuu mitattuun dataan ja siitä niin kutsutulla *heuristic moment matching* -metodilla luotavaan epävarmuusmatriisiin (engl. *uncertainty matrix*), jonka avulla voidaan huomioida parametrien stokastisuus. Saffari ym. (2019) puolestaan luovat ensin matemaattisilla otantamenetelmillä (engl. *sampling methods*) suuren määrän skenaarioita (engl. *scenario generation*), sen jälkeen rajaavat niitä (engl. *scenario reduction*) ja lopuksi hyödyntävät robustia stokastista optimointia (engl. *stochastic/robust optimization*) alueellisen energiajärjestelmän optimoimiseksi. Tämä vastaa pitkälti yllä esitettyä skenaario-optimoinnin prosessia. Fysikaalisissa bottom-up-malleissa erilaisia skenaarioita voidaan luoda esimerkiksi Monte Carlo -simuloinnilla, jossa stokastisia lähtötietoja sisältävää mallia simuloidaan useita kertoja saaden vastaava tulosten todennäköisyysjakauma (Pickering & Choudhary 2019). Yhtälössä (8) johdetaan vielä skenaario-optimoinnin kohdefunktion muotoilu.

$$F(\mathbf{x}) = h_1 F(\mathbf{x}) + h_2 F(\mathbf{x}) + \dots + h_s F(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^s h_i F(\mathbf{x}) \quad (8)$$

missä  $F(\mathbf{x})$  on kohdefunktio (sama kaikissa skenaarioissa)  
 $h_i$  on  $i$ :nnen skenaarion todennäköisyys (tai muu painokerroin) ja  
 $s$  on skenaarioiden lukumäärä.

Vaikka tässä luvussa on annettu suuri painoarvo simulointia, erityisesti mallintamisrajapinnan avulla monia erillisiä osamalleja (käyttäjän näkökulmasta tyypillisesti mustan laatikon malleja), hyödyntäviin alueellisen energiaoptimoinnin menetelmiin, niin on syytä mainita, että alueellinen energiaoptimointi on mahdollista suorittaa myös hyvin matemaattisella lähestymistavalla. Hyvin matemaattisella lähestymistavalla tarkoitetaan, että analysoitavan

alueellisen energiajärjestelmän matemaattinen malli luodaan yhtälötasolla alusta alkaen itse esimerkiksi matemaattisia ohjelmointikieliä hyödyntäen, jonka jälkeen mallin valitut muututtajat optimoidaan valmiilla tai mahdollisesti itse kirjoitetulla optimointialgoritmeilla (ks. esim. Bischi ym. 2014; Gabrielli ym. 2018; Karmellos & Mavrotas 2019; Keirstead & Shah 2013; Ledesma ym. 2017; Mehleri ym. 2012; Omu ym. 2013; Pickering & Choudhary 2019; Prasanna ym. 2017; Weber ym. 2007). Tällaisissa hyvin matemaattisissa energiajärjestelmien optimointimalleissa rajoitefunktiot muotoillaan siten, että ne edustavat energiajärjestelmän energiatasapainon ja mahdollisesti myös massatasapainon toteutumista sekä teknologioiden suorituskykyjen rajoitteita (esimerkiksi maksimikapasiteetit ja tehonmuutosherkkyydet), mutta usein muotoillaan myös muita energiajärjestelmän toimintaan liittyviä rajoitteita. Lisäksi kyseisissä optimointimalleissa tehdään normaalisti joukko yksinkertaistavia oletuksia liittyen esimerkiksi teknologioiden hyötysuhteisiin (usein vakiohyötysuhteet) ja ihmisten toiminnan sekä tulevaisuuden täydelliseen ennustettavuuteen. Nämä hyvin matemaattiset mallit ovat tyypillisesti joko täysin staattisia (esimerkiksi Energy Hub) tai astetta dynaamisempia hyödyntäen erilaisia aikahorisontin pelkistystekniikoita (engl. *horizon / time dimension reduction techniques*), kuten tyyppipäiviä (engl. *typical days*) tai tyyppiviikkoja (engl. *typical weeks*). On kuitenkin huomioitava, että aikahorisontin pelkistystekniikoiden hyödyntäminen uusiutuvien energiajärjestelmien kohdalla ei ole suotavaa (Lund 2014), vaikkakin toisaalta erinäisillä matemaattisilla toimenpiteillä on mahdollista lieventää aikahorisontin pelkistystekniikoista aiheutuvaa energiajärjestelmämallin dynaamisuuden heikentymistä (ks. esim. Pickering & Choudhary 2019; Waibel ym. 2019). Sekä yhden että usean solmukohdan (engl. *node*) matemaattisia alueellisia energiaoptimointimalleja on esitetty kirjallisuudessa runsaasti esimerkiksi yllä viitatuissa tutkimuksissa. Selvästi tyypillisin optimointimenetelmä matemaattisissa lähestymistavoissa on kokonaislukuja sisältävä lineaarinen optimointi (MILP) sen tehokkuuden, yksinkertaisuuden ja globaalien optimiratkaisujen löytämisen varmuuden takia, mutta myös kokonaislukuja sisältävää epälineaarista optimointia (MINLP) ja heuristisia menetelmiä (esimerkiksi GA ja PSO) on käytetty laajasti (Heleno ym. 2017; Keirstead & Shah 2013; Pickering & Choudhary 2019). Useita kattavia, vaikkakin tyypillisesti varsin akateemisen näkökulman omaavia, matemaattista alueellista energiaoptimointia käsitteleviä kirjallisuuskatsauksia on myös esitetty (ks. esim. Bhandari ym. 2015; Kriechbaum ym. 2018; Scheller & Bruckner 2019; Talebi ym. 2016; Theo ym. 2017). Yleensä nämä kirjallisuuskatsaukset käsittelevät alueellista energiaoptimointia tietystä näkökulmasta erittäinkin tarkasti, mutta kokonaisvaltainen linkittäminen muuhun alueellisen energiasuunnittelun kontekstiin jää vähäiseksi, ja varsinkin käytännönläheisen suunnittelun huomioiminen on usein lähes olematonta. Tällaisista kirjallisuuskatsauksista saa kuitenkin hyvän teoreettisen ymmärryksen alueellisen energiaoptimoinnin menetelmistä ja konsepteista sekä laajan käsityksen sitä koskevan tutkimuksen tilasta.

On selvää, että edellä kuvatun kaltaisten hyvin matemaattisten alueellisten energiaoptimointimenetelmien perusteiden ymmärtäminen edesauttaa luotettavan ja asiantuntevan alueellisen energiaoptimoinnin suorittamista. Käytännöllisen ja helposti lähestyttävän alueellisen energiaoptimoinnin kannalta tällaiset hyvin matemaattiset lähestymistavat ovat kuitenkin enemmänkin rakennusosia käytännössä hyödynnettäville työkaluille. Edistyksellisten energiajärjestelmien täysimittainen matemaattinen muotoileminen vaatii erinomaisen syvällistä ja kokonaisvaltaista energiajärjestelmiin ja optimointiin liittyvää asiantuntijuutta sekä valtavasti aikaa, työtä ja resursseja, jos yritetään saavuttaa edes osa uusiutuvan alueellisen energiajärjestelmämallin vaatimuksista. Monet nykyisin käytössä olevat energiajärjestelmien analysointimallit sekä optimointityökalut ovatkin vuosia tai jopa vuosikymmeniä kestäneen

jatkuvan kehitystyön tuloksia (Lund 2014), minkä takia käytännön suunnittelussa tulisi ensisijaisesti pyrkiä hyödyntämään valmiita ja mahdollisimman luotettavasti validoituja malleja ja työkaluja (yksittäin tai soveltavasti yhdistelemällä) edellyttäen kuitenkin, että siten kyetään vastaamaan perustellusti ja kokonaisvaltaisesti päätöksenteon tarpeisiin – muussa tapauksessa on järkevää ja jopa tarpeellista aloittaa täysin uuden alueellisen energiaoptimointityökalun kehitystyö.

### 3.3.3 Alueellisen strategisen energiasuunnittelun viitekehys

Edellisessä luvussa esitettiin alueelliseen energiaoptimointiin soveltuvien optimointimenetelmien lähestymistapoja ja konsepteja. Tärkeää on ymmärtää, että pelkästään kyky ratkaista annettu alueellinen energiaoptimointiongelma ei ole sama asia kuin kyky tehdä kokonaisvaltaista alueellista energiaoptimointia. Tämän lisäksi kokonaisvaltaiseen alueelliseen energiaoptimointiin ei kykene huomioimaan kaikkia aluesuunnittelun näkökulmia – ainakaan vielä nykyisillä alueellisilla energiaoptimointimenetelmillä. Näin ollen voidaan todeta, että alueellinen energiaoptimointi menettää pitkälti merkityksensä, jos sitä ei hyödynnetä alueellisia energiajärjestelmiä koskevan päätöksenteon tarpeen kannalta tarkoituksenmukaisella tavalla. Tämän takia tarvitaan selkeitä viitekehyksiä ja ohjeistuksia, joiden avulla jatkuvasti monimutkaistuvia alueellisen energiaoptimoinnin menetelmiä ja työkaluja kyetään perustellusti hyödyntämään analyysin tavoitteiden kannalta johdonmukaisella tavalla (DeCarolis ym. 2017; Lund 2014).

Tässä luvussa esitetään kirjallisuustutkimukseen pohjautuva alueellisen strategisen energiasuunnittelun viitekehys, johon on sisällytetty uudella tavalla alueelliset energiaoptimointimenetelmät. Viitekehysten avulla pyritään luomaan mahdollisimman suoraviivainen ja helposti lähestyttävä mutta samalla tarvittavan kokonaisvaltaisen ja moninäkökulmian toimintamalli alueelliseen strategiseen energiasuunnitteluun. Työn rajaukset koskevat myös esitettyä viitekehystä, joten siihen ei suoraan sisällytetä esimerkiksi kaavoitusta ja liikennesuunnittelua. Viitekehys on tarkoitettu etenkin uudisalueiden energiasuunnitteluun soveltuvaksi, mutta soveltaen sitä voidaan hyödyntää myös korjausrakentamisessa. On hyvä huomata, että viitekehys ei pyri esittämään absoluuttisesti parasta tai luonteeltaan ehdotonta toimintamallia alueelliseen energiasuunnitteluun, koska sellaista ei ole olemassa: alueellinen energiasuunnittelu on hyvin tapausriippuvaista, ja luonteeltaan sitä voisikin kuvailla eräänlaiseksi tekniikan, tieteiden ja taiteiden yhdistelmäksi (DeCarolis ym. 2017; Omu ym. 2013). Toisaalta on kuitenkin myös tiedostettava, että on olemassa tiettyjä periaatteita, näkökulmia ja muita tärkeitä asioita (ks. luku 3), joita huomioimalla – sopivia menetelmiä ja työkaluja hyödyntäen – alueellisesta energiasuunnittelusta voidaan saada huomattavasti luotettavampaa, läpinäkyvämpää ja tehokkaampaa eli päätöksentekoa sekä yhteiskuntaa paremmin palvelevaa. Oikeastaan alueellisessa energiasuunnittelussa tulisi siis pyrkiä tunnistamaan ja huomioimaan olennaisimmat näkökulmat ja samalla maksimoimaan analyysin relevanttius kyseistä päätöksentekotilannetta varten (DeCarolis ym. 2017). Tämä ei kuitenkaan ole missään määrin triviaali tehtävä, joten kuten koko työssä, myös esitetyssä viitekehyksessä ensisijainen tavoite onkin luoda mahdollisimman hyvät edellytykset asiantuntevan ja kokonaisvaltaisen optimointimenetelmiä hyödyntävän alueellisen energiasuunnittelun toteuttamiselle, eikä niinkään yrittää tarjota jokseenkin kuvitteellista valmista mallia jokaisen alueellisen energiaoptimointiongelman ratkaisemiseen.

Kuten edellä mainittiin, kuvassa 27 esitettävä alueellisen strategisen energiasuunnittelun viitekehys pohjautuu kirjallisuustutkimukseen. Seuraavat teokset ja tutkimukset ovat vaikuttaneet erityisen paljon esitettävään viitekehysten rakenteeseen ja sisältöön (suuntaa antavassa



tärkeysjärjestyksessä): Lund (2014), DeCarolis ym. (2017), Keirstead & Shah (2013), Drysdale ym. (2019), Krog & Sperling (2019), Shi ym. (2017), Viholainen ym. (2016), Hedman (2016) ja Forsström ym. (2011). Viitekehysten pääperiaatteena on luvussa 3.3.1 esitetty strategisen energiasuunnittelun konsepti. Ennen alueellisen strategisen energiasuunnittelun viitekehystä taulukossa 5 esitetään vielä DeCarolis ym. (2017) esittämät seitsemän tärkeää asiaa, joihin alueellisessa energiaoptimoinnissa tulisi kiinnittää huomiota. Nämä seitsemän asiaa pohjautuvat tutkimuksen kirjoittajien (13 kirjoittajaa eri maiden tutkimuslaitoksista ja virastoista) laajaan alueellista energiaoptimointia koskevaan asiantuntemukseen ja kokeemukseen.

*Taulukko 5 Alueellisen energiaoptimoinnin seitsemän tärkeää asiaa (DeCarolis ym. 2017).*

| Asia  | Selostus / Tarkennus   |
|---|--|
| 1. Suunnitteluongelman tulisi ohjata analyysissä käytettävää menetelmää eikä päinvastoin.                         | Analyysin suorittaja on oletettavasti erityisen perehtynyt tiettyihin menetelmiin ja työkaluihin, mikä helposti johtaa päinvastaiseen toimintatapaan.  |
| 2. Analyysin tulisi olla niin yksinkertainen kuin mahdollista, mutta niin monimutkainen kuin tarpeellista.        | Yksinkertaiset analyysit ovat helpommin ymmärrettäviä ja nopeammin suoritettavia. Tulosten kokonaisvaltaisuus ja luotettavuus eivät kuitenkaan saa heikentyä olennaisesti.   |
| 3. Lähtötietojen hankintaan ja ylläpitämiseen tulisi kehittää systemaattisia laadunvarmistustoimenpiteitä.        | Systemaattiset ja jatkuvat toimenpiteet analyysin lähtötietojen validoimiseksi tulisi olla rutiininomaista toimintaa. Erilaisia vertaisarvioitavissa olevia tietokantoja tulisi hyödyntää.                                 |
| 4. Analyysissä käytettävän mallin tarpeellista yksityiskohtaisuuden tasoa tulisi harkita tarkasti.                | Useasti käytettävän työkalun tai menetelmän ominaispiirteenä on usein vähitellen tapahtuva monimutkaistuminen. Työkaluilla tulisi säilyä kyky suorittaa myös yksinkertaisia analyysejä.                                    |
| 5. Analyysin tavoitteenasettelua ja menetelmää tulisi uudelleenarvioida analyysin edetessä.                       | Analyysin edetessä aiheen ymmärrys lisääntyy, jolloin saattaa hyvinkin muodostua tarpeelliseksi muokata alkuperäisiä tutkimuskysymyksiä, hypoteeseja ja/tai tavoitteita.   |
| 6. Sekä mallin sisäiset että ulkoiset epävarmuustekijät tulisi tiedostaa ja arvioida niiden vaikutusta tuloksiin. | Analyysin suorittajan tulisi parhaan kykynsä mukaan määrittää sekä kvalitatiivisesti että kvantitatiivisesti analyysin tärkeimmät epävarmuustekijät, vaikka tämä on hyvin haastavaa.                                       |
| 7. Analyysin tulisi olla mahdollisimman avoin ja läpinäkyvä.  | On äärimmäisen tärkeää, että analyysi on avoimesti vertaisarvioitavissa ja toistettavissa. Avoimuuden tärkeys korostuu analyysin laajuuden kasvaessa. Analyysin raportointi tulisi olla tarkkaa, selvää ja perinpohjaista. |

## ALUEELLISEN STRATEGISEN ENERGIASUUNNITTELUN VIITEKEHYS



Kuva 27 Alueellisen strategisen energiasuunnittelun viitekehys.

On tärkeää huomioida, että yllä esitetyn viitekehityksen vaiheet eivät välttämättä ole täysin toisistaan erillisiä kokonaisuuksia. Lisäksi on huomioitava, että viitekehityksen vaiheiden suorittamisjärjestys ei ole täysin yksiselitteinen, vaan kuten taulukossa 5 mainittiin, esimerkiksi analyysin tavoitteenasettelua ja menetelmää tulisi uudelleenarvioida analyysin edessä. Viitekehitys tarjoaa kuitenkin oivallisen lähtökohdan kokonaisvaltaisen, luotettavan, objektiivisen ja tehokkaan alueellisen strategisen energiasuunnittelun suorittamiselle, ja ilman erityisiä perusteita ei yllä esitetyn viitekehityksen osoittamasta toimintatavasta tulisi ainakaan merkittävästi poiketa alueellista strategista energiasuunnittelua tehdessä. Alla esitetään vielä lyhyet selostukset kuvassa 27 eritellyistä alueellisen strategisen energiasuunnittelun viitekehityksen vaihteista.

## 1. Ylemmän energiastrategian reflektointi aluetasolle

Ideaalisessa tilanteessa alueellisen strategisen energiasuunnittelun yhteydessä tarvitsee tutustua tarkasti vain yhtä tasoa ylempään energiastrategiaan (ks. luku 3.3.1) ja reflektoida, kuinka kyseinen energiastrategia pyrkii ohjaamaan aluetason suunnittelua. Naapurustojen, kaupunginosien tai kokonaisten kaupunkien suunnittelussa tämä tarkoittaa kaupungin tai kansallisen tason energiastrategiaa. Kansallisessa energiastrategiassa voidaan esimerkiksi määrittää luonnonresurssien näkökulmasta optimaalinen energiantuotantoportfolio koko maalle (tätä voidaan hyödyntää alueellisen energiajärjestelmän suorituskyvyn arvioinnissa), määrittää kestävä biomassan käytön aluekohtainen ohjeistus/rajoitus ja esittää aluetason energiajärjestelmiltä edellytettäviä suorituskykytavoitteita (esimerkiksi joustavuusindikaattoreita raja-arvoineen). Kansallisen energiastrategian tulisi siis tarjota edellytykset johdonmukaisten alueellisten energiastrategioiden luomiselle, jotta kansallisella tasolla vältetään haitalliselta osaoptimoinnilta. Jos aluetason energiastrategioita tehdään ilman yhtenäistä näkemystä kansallisesta energiastrategiasta, lopputulos voi olla hyvin kaukana optimaalisesta. Käytännössä ajankohtaista ylempää energiastrategiaa ei välttämättä ole edes olemassa, tai se on olemassa, mutta sen visiona ei ole strategisen energiasuunnittelun mukaisesti kestävä energiajärjestelmän saavuttaminen lyhyellä aikavälillä. Tällöin joudutaan ensin itse luomaan ylempi energiastrategia (esimerkiksi arvioimalla kansallisen ja kaupungin energiajärjestelmien suotuisaa kehitystä) ja perustamaan alueellinen strateginen energiasuunnittelu sen varaan. Kiistattomasti parempaan lopputulokseen kuitenkin päästään, jos saatavilla on strategisen energiasuunnittelun periaatteita noudattaen perusteellisesti, kokonaisvaltaisesti ja huolellisesti luotu virallinen kansallinen energiastrategia. Esimerkiksi Lund (2014) käsittelee alueellista strategista energiasuunnittelua perusteellisesti ja tuo ilmi useita käytännön esimerkkejä, kuinka kansallista energiastrategiaa voidaan reflektoida ja hyödyntää aluetason energiasuunnittelussa.

## 2. Tavoitteenasettelu

Alueellisen strategisen energiasuunnittelun tavoitteenasettelun tulisi pohjautua reflektoituun ylempään energiastrategiaan. Tavoitteenasettelulla tarkoitetaan alueellisen energiajärjestelmän keskeisimmän tai keskeisimpien suorituskykyindikaattorien valitsemista (ks. luku 3.1.3) sekä optimointiin sisällytettävien muuttujien pääryhmien alustavaa valitsemista (ks. luku 3.3.2). Alueellista energiaoptimointia hyödyntävän alueellisen strategisen energiasuunnittelun tavoitteenasettelu on suoraan kytköksissä optimoinnin kohdefunktioihin, eli optimointialgoritmi etsii parasta mahdollista ratkaisua tavoitteenasettelun mukaisesti (esimerkiksi minimoit CO<sub>2</sub>-päästöt). Myös alueellisen energiajärjestelmän suorituskykyyn liittyvät rajoitteet (esimerkiksi maksimi investointikustannus) määritetään tavoitteenasettelun yhteydessä. On syytä huomata, että optimointialgoritmi ei pyri minimoimaan rajoitteita, vaan tyytyy pitämään ne määritettyjen raja-arvojen sisällä varsinaisten tavoitteiden ohjatessa optimointiprosessia (ks. luku 2). Valinta varsinaisten tavoitteiden ja rajoitteiden välillä on luonteeltaan hienovarainen, eikä siihen ole yksikäsitteisen oikeaa tapaa. Tavoitteenasettelun yhteydessä on hyvä myös tiedostaa, että jos varsinaisia (toisistaan risteäviä) tavoitteita asetetaan useampia, muodostuu alueellisesta energiaoptimoinnista monitavoiteoptimointi. Toisaalta osa optimointialgoritmeista käsittelee monitavoitteisia optimointiongelmia yksitavoitteisina ongelmina esimerkiksi muuntamalla varsinaisia tavoitteita rajoitteiksi systemaattisella tavalla. Hyvä lähtökohta muuttujien valitsemiselle on sisällyttää kaikki kuvassa 22 esitetyt alueellisen energiaoptimoinnin muuttujien pääryhmät analyysiin.

Tavoitteenasettelun yhteydessä määritetään myös alueellisen energiajärjestelmän suorituskyvyn mittaamisen lähtökohta: etsitäänkö parhaita mahdollisia ratkaisuja puhtaasti liiketoiminnallisesta näkökulmasta vai laajasta sosioekonomisesta näkökulmasta? Tämä muodostuu erityisen olennaiseksi kysymykseksi silloin, kun ylempää energiastrategiaa ei ole saatavilla (strategisen energiasuunnittelun vision mukaan ylemmän energiastrategian tulisi automaattisesti ohjata alemman tason energiastrategioiden tavoitteenasetteluja kohti kestäväntä eli systeemitasolla sosioekonomisesti parasta mahdollista lopputulosta). Analyysin suorittaminen kummastakin lähtökohdasta olisi toivottavaa, sillä siten voidaan tunnistaa esimerkiksi markkinoihin ja säännöstelyyn liittyvät muutostarpeet, jotta sosioekonomisesti paras mahdollinen ratkaisu olisi myös liiketoiminnallisesti paras mahdollinen ratkaisu (sitä että liiketoiminnallisesti paras mahdollinen ratkaisu siirtyy kohti sosioekonomisesti parasta mahdollista ratkaisua) (ks. luku 3.3.1).

Lisäksi tavoitteenasetteluun kuuluu varsinaisten tavoitteiden muodostamisen lisäksi niin kutsuttujen *avainsuorituskykyindikaattorien (ASI)* määrittäminen tai hahmotteleminen. Avainsuorituskykyindikaattorien tulisi edustaa kaikista olennaisimpia energiajärjestelmän suorituskyvyllisiä piirteitä, jotka eivät suoraan sisälly tavoitteenasetteluun. Avainsuorituskykyindikaattorit eivät vaikuta optimoinnin lopputulokseen, mutta edesauttavat merkittävästi suunnitteluvaihtoehtoja koskevien suositusten ja lopullisen valinnan tekemistä (ks. vaihe 10 ja 11).

### 3. Rajaus ja räätälöinti

Analyysin rajauksella tarkoitetaan analyysin spatiotemporaalisten taserajojen määrittelyä, näkökulmien valitsemista ja tärkeimpien oletuksien tekemistä. Toisin sanoen tässä vaiheessa määritetään mahdollisimman tarkasti, miltä maantieteelliseltä kokonaisuudelta, mitä näkökulmia huomioiden (esimerkiksi huomioidaanko mikroilmastoa, liikennettä, viihtyvyyttä, yms.) ja millä aikahorisontilla sekä -resoluutiolla aiemmin määritellyn tavoitteenasettelun mukaista alueellisen energiajärjestelmän suorituskykyä mitataan. Lisäksi esitetään keskeisimmät analyysin oletukset: voidaan esimerkiksi olettaa eli asettaa analyysin lähtökohdaksi, että (urbaanit) alueelliset energiajärjestelmät kannattaa aina rakentaa edistyksellisten energiajärjestelmien periaatteiden mukaisesti (ks. luku 3.2.1). Analyysin rajaus on vahvasti kytköksissä analyysin tavoitteenasetteluun, mutta rajaus pitäisi periaatteessa tehdä vasta tavoitteenasettelun jälkeen, jotta analyysin kokonaisvaltaisuus ei vaarannu. Varsinkin urbaaneja energiajärjestelmiä koskevien analyysien rajaus on erittäin haastavaa (Keirstead & Shah 2013), mutta kirjallisuustutkimuksen perusteella voidaan mainita seuraavia lähtökohtia alueellisia energiajärjestelmiä koskevien analyysien rajaukselle: alueen spatiaalinen rajaus voi perustua alueen viralliseen maantieteelliseen rajaan, mutta alueen ulkopuoliset vuoro-vaikutukset tulisi silti ottaa huomioon vähintäänkin implisiittisellä tavalla; kestävien energiajärjestelmien suorituskyvyn mittaamisen tarkastelujakson tulisi olla pitkä (kymmeniä vuosia) ja aikaresoluution lyhyt (tunti tai vähemmän); periaatteessa mitä enemmän näkökulmia voidaan huomioida, sitä parempi, mutta käytännössä analyysin tehokkuuden ja helposti lähestyttävyyden takaamiseksi joudutaan näkökulmia tyypillisesti rajaamaan tavoitteiden kannalta olennaisimpiin; analyysissä tulisi pyrkiä huomioimaan käytetyn energian koko energiaketju. Analyysin rajaus on yksi haastavimpia vaiheita alueellisessa strategisessa energiasuunnittelussa, minkä takia tarkoituksenmukaisen rajauksen tekeminen edellyttää vahvaa kokonaisvaltaista tutkimusongelman ymmärrystä, ja siltikin analyysin rajausta tulisi uudelleenarvioida analyysin edetessä. Keirstead & Shah (2013) ja Lund (2014) voidaan mainita

esimerkkeinä kattavista teoksista alueellista energiasuunnittelua koskevan kokonaisvaltaisen ymmärtämisen tueksi. Lisäksi huolellisesti luotu ylempi energiastrategia voi auttaa merkittävästi aluetason analyysin rajauksen tekemistä.

Analyysin räätälöinnillä tarkoitetaan paikallisten reunaehtojen kvalitatiivista tunnistamista koskien esimerkiksi paikallisesti hyödynnettävissä olevia luonnonvaroja sekä energiasektoriin liittyvien paikallisten toimijoiden ja infrastruktuurin määrittämistä. Myös alueen sosiaalinen ja historiallinen konteksti tulisi tässä yhteydessä määrittää. Räätälöinnillä tehdään siis analyysi relevantiksi juuri kyseisen alueen kannalta, ja samalla vältetään myös toteuttamattomissa olevien suunnitteluvaihtoehtojen turha analysoiminen. On kuitenkin huomioitava, että suunnitteluvaihtoehtojen poissulkeminen analyysistä tulee tehdä erityisen suurta harkintaa käyttäen – radikaalin teknologisen tai regulatiivisen muutoksen tarve ei ole peruste pois-sulkea suunnitteluvaihtoehtoa analyysistä. Esimerkiksi seuraavanlaisiin kysymyksiin voidaan vastata analyysin räätälöinnissä: onko alueella valmiina tai lähettyvillä kaukolämpöverkkoa/kaukojäähdytysverkkoa, minkälainen on alueen maaperän rakenne, kuinka suuri pinta-ala ja syvyys on käytettävänä maalämpöratkaisuille, kuinka suuri etäisyys on rakennuksien ja mahdollisen vesistön välillä ja minkälainen on mahdollisen vesistön syvyyskäyrä (Kekkonen 2017). Lisäksi ylempään energiastrategiaan pohjautuen voidaan määrittää mitä energiaverkkoja alueelle kannattaa rakentaa tai vaihtoehtoisesti tämä päätös voidaan sisällyttää optimoinnin muuttujaksi, mutta se tuo merkittävän lisähaasteen käytettävälle mallille (ks. vaihe 7). Tässä vaiheessa voidaan myös rajata, lisätä, muokata tai tarkentaa optimoinnin muuttujia, jos tämä voidaan perustellusti tehdä analyysin rajaukseen ja räätälöintiin pohjautuen.

#### 4. Skenaarioiden luominen

Ennen menetelmän valintaa voidaan luoda tulevaisuuden kehityskulun epävarmuuden huomioivia skenaarioita tai vaihtoehtoisesti valita vain yksi, kaikista todennäköisin, skenaario tarkasteltavaksi. Jos valitaan vain yksi skenaario tarkasteltavaksi, tulee kuitenkin kiinnittää erityistä huomiota sen perusteella tehtyjen johtopäätösten yleispätevyyteen. Eri skenaariot voivat liittyä esimerkiksi uusiutuvan energian tuotantopotentiaalın ja ilmastonmuutoksen enustamiseen (sään lyhyen ja pitkän aikavälin epävarmuus), hintojen ja teknologioiden kehitykseen (markkinoiden ja innovaatioiden epävarmuus), ihmisten toiminnan satunnaisuuteen (yksittäisten ihmisten toiminnan epävarmuus) tai tulevaisuuden poliittisten päätösten ja kansallisen energiainfrastruktuurin kehitykseen (merkittävien toimijoiden linjausten, strategioiden ja visioiden epävarmuus). Poliittisten päätösten ja kansallisen energiainfrastruktuurin kehityksen epävarmuus voidaan kuitenkin periaatteessa poistaa strategisen energiasuunnittelun skenaariotarkastelusta korvaten ne ylemmän tason energiastrategialla, sillä strateginen energiasuunnittelu pohjautuu visioon kestävän energiajärjestelmän saavuttamisesta hyödyntäen backcasting-menetelmää (ks. luku 3.3.1). Jos useita eri skenaarioita valitaan tarkasteltavaksi, tulee tässä vaiheessa tehdä myös päätös, sovelletaanko analyysissä varsinaista skenaario-optimointia vai eri skenaarioiden optimointia (ks. luku 3.3.2). Analyysissä voidaan toki suorittaa kummatkin, mikä mahdollisesti parantaa analyysin tuottamaa päätöksenteollista lisäarvoa mutta lisää sen data- ja laskentaintensiivisyyttä. Vaihtoehtoisesti on myös mahdollista soveltaa kumpaakin tapaa rinnakkain, siten että osaa skenaarioista tarkastellaan skenaario-optimoinnin tavoin (esimerkiksi tulevaisuuden energiantarve) ja osaa puhtaasti eri skenaarioina (esimerkiksi hintojen kehitys) – tämä voidaan mieltää eräänlaiseksi skenaario-optimoinnin ja eri skenaarioiden optimoinnin hybridiratkaisuksi. Skenaario-optimoinnissa on välttämätöntä arvioida kunkin skenaarion todennäköisyyttä, mutta myös eri skenaarioiden optimoinnissa se olisi suotavaa. Skenaarioiden todennäköisyyden arviointiin voidaan

hyödyntää esimerkiksi Monte Carlo -simulointia (vaatii bottom-up-mallin) tai kvalitatiivisia menetelmiä.

## 5. Menetelmän valinta

Menetelmän valinnalla tarkoitetaan tässä viitekehyksessä analyysin laskennallisen osuuden periaatteellisen rungon luomista ja sen tärkeimpien edellytyksien määrittämistä. Periaatteellisen rungon määrittely on hahmotelma siitä, millä tavalla alueellisen energiajärjestelmän mallintamista ja optimointia lähestytään. Kummatkin itsessään sisältävät lukuisia vaihtoehtoisia lähestymistapoja, minkä lisäksi niiden yhdistäminen voidaan toteuttaa monella eri tavalla (esimerkiksi matemaattinen lähestymistapa/mallintamispainotteinen lähestymistapa, bottom-up/top-down-mallintaminen, mallintamisrajapinta/yksittäinen malli, valkoisen laatikon malli/mustan laatikon malli, staattinen/dynaaminen malli, stokastinen/deterministinen lähestymistapa, hierarkkinen/yhdistetty optimointi, lineaarinen/epälineaarinen optimointi, heuristinen/analyttinen optimointialgoritmi, jne., ks. luvut 2, 3.2.4 ja 3.3.2). Analyysin laskennallisen osuuden periaatteellisen rungon luominen voidaan siis mieltää analyysin laskennallisen osuuden metodin määrittelyksi. Analyysin laskennallisen osuuden tärkeimpien edellytyksien määrittämisellä puolestaan tarkoitetaan viitekehyksen aiempiin vaiheisiin perustuen laskennalta vaadittavan yksityiskohtaisuuden ja tarkkuustason, helposti suoritettavuuden ja päivitettävyyden sekä sallitun data- ja laskentaintensiivisyyden määrittelemistä (nämä tulee ottaa huomioon menetelmän valinnassa). Analyysin laskennallisen osuuden tärkeimmät edellytykset ovat hyvin tapauskohtaisia, eikä niille siksi voida esittää yksiselitteisen tyhjentävää listausta, vaan niiden tunnistaminen vaatii kokonaisvaltaista asiantuntijuutta alueellisesta energiaoptimoinnista. Menetelmän valintaan kuuluu myös analyysin epävarmuuden hallinnan toimenpiteiden hahmotteleminen (ks. vaihe 10). Tärkeimpänä yksittäisenä huomiona menetelmän valinnassa on, että sen tulisi aina perustua viitekehyksen aiempiin vaiheisiin, siten että valittu menetelmä olisi niiden valossa mahdollisimman tarkoituksenmukainen.

## 6. Lähtötietojen keruu

Lähtötietojen keruu voi viedä merkittävän osan analyysiin varatusta ajasta, sillä alueellinen energiaoptimointi on tyypillisesti hyvin dataintensiivistä (edistyksellisten energiajärjestelmien laaja etsintäavaruus ja useat skenaariot vaativat paljon lähtötietoja). Lähtötietojen keruu on usein myös varsin hankalaa johtuen siitä, että alueellinen energiaoptimointi tulisi suorittaa aikaisessa vaiheessa suunnitteluprosessia, jolloin moniin lähtötietoihin liittyy vielä huomattavaa epävarmuutta (ks. luku 3.3.1), ja toisaalta eri skenaarioiden vaatimien lähtötietojen määrittäminen vaatii usein oman prosessinsa. Kaikki tarvittavat lähtötiedot eivät myöskään ole aina avoimesti saatavissa (tai ovat hyvin hankalasti saatavissa). Tämän johdosta kattavat, avoimet ja helposti saatavat, ideaalisessa tilanteessa virallisesti ylläpidetyt, lähtötietokirjastot tehostaisivat alueellisia energia-analyysyjä ja lisääisivät niiden luotettavuutta sekä vertailukelpoisuutta.

Sen sijaan, että lähtötietojen keruussa liitettäisiin pelkästään yksittäisiä lukuarvoja lähtötietoparametreihin, tulisi pyrkiä tunnistamaan stokastisen luonteen omaavat lähtötiedot ja määrittää niille esimerkiksi todennäköisyysjakaumien mukaiset arvovälit. Osa lähtötiedoista saattaa vaatia mallintamisen hyödyntämistä (esimerkiksi alueellinen energiantarve ja alueen uusiutuvan energian tuotantopotentiaali), jolloin tässä vaiheessa vain tunnistetaan kyseiset lähtötietotarpeet. Periaatteessa viitekehyksen aiempien vaiheiden perusteella tulisi kyetä tunnistamaan analyysissä tarvittavat lähtötiedot, mutta käytännössä lähtötietojen keruussa

on usein kannattavaa huomioida jo myös analyysissä hyödynnettävän mallin tarpeet (ks. vaihe 7), kuitenkin painottaen, että suunnitteluongelman tulisi ohjata analyysissä käytettävää menetelmää eikä päinvastoin (ks. taulukko 5).

## 7. Mallintaminen

Mallintamisella tarkoitetaan tässä viitekehyksessä kaikkea täysin itse suoritettavan mallintamisen ja täysin valmiin mallin hyödyntämisen väliltä. Mahdollisia mallintamisratkaisuja ovat esimerkiksi täysin matemaattisen mallin luominen/hyödyntäminen, yksittäisen ohjelman hyödyntäminen, usean ohjelman hyödyntäminen toisistaan erillään, usean toistensa kanssa vuorovaikutteisien ohjelman hyödyntäminen mallintamisrajapintojen tai suorien ohjelmalinkityksien avulla ja kaikki näiden erilaiset yhdistelmäratkaisut. Vaiheessa 5 hahmotellun menetelmän tulisi toimia mallintamisen ensisijaisena lähtökohtana, ja siinä pitäisi olla myös määritelty mallintamisen periaatteellinen lähestymistapa (ts. yllä esitetyistä tavoista analyysin kannalta tarkoituksenmukaisin vaihtoehto). On huomioitava, että alueellisessa energiasuunnittelussa ei voida osoittaa yksiselitteisen oikeaa ratkaisua mallintamismenetelmän tai valmiin mallin valinnalle. Varsinkin käytännönläheisessä suunnittelussa on kuitenkin perusteltua ja suotuisaakin pyrkiä lähtökohtaisesti hyödyntämään uskottavasti validoituja valmiita malleja, kuitenkin vain sillä ehdolla, että ne kykenevät täyttämään edellisten vaiheiden vaatimukset. Kirjallisuustutkimuksen perusteella voidaan todeta, että täysin valmiita, kokonaisvaltaisia ja helposti lähestyttäviä alueelliseen energiaoptimointiin soveltuvia malleja ei vielä ole, mutta oletettavasti ne tulevat yleistymään merkittävästi tämän vuosikymmenen aikana.

Alueellinen bottom-up energiamalli voidaan luoda arkkityyppimenetelmällä (esimerkiksi IDA ICE + Excel) tai edistyneemmällä tyhjentyvällä mallintamisella (esimerkiksi Rhinoceros 3D + Grasshopper). Rhinoceros 3D -ohjelmalla tai vastaavalla voidaan periaatteessa myös luoda alusta asti itse alueen rakennuksien massoitusmalli, mutta tyypillisesti ja suositellustikin alueellisessa energiasuunnittelussa ja -optimoinnissa lähtökohtana on kaupunkisuunnittelijan tai kaavoittajan luoma alueen rakennuksien alustava massoitusmalli. Rhinoceros 3D + Grasshopper yhdistelmällä – tai vastaavalla – voidaan suorittaa myös hyvin edistyneitä ja tarkkoja uusiutuvan energian tuotantopotentiaalien simulointeja, tai vaihtoehtoisesti esimerkiksi Excel-tilukkolaskentaohjelman avulla voidaan suorittaa yksinkertaistettuja alueen uusiutuvan energian tuotantopotentiaalisimulointeja. Sekä alueellista energiantarvetta että alueellista energiantuotantopotentiaalia voidaan lähestyä myös top-down-mallintamisella (ts. mitatun/historiallisen datan hyödyntämisellä) ja toisaalta bottom-up-mallintamista voidaan myös tukea top-down-analyysillä (ks. luku 3.2.4). EnergyPLAN on hyvä esimerkki edistyneen energiasuunnittelun suorituskyvyn määrittämiseen soveltuvasta sekä myös radikaalin teknologisen muutoksen analysoimiseen kykenevästä avoimesta ja ilmaisesta ohjelmasta, mutta siihen ei ole valmiiksi yhdistettynä kattavaa optimointiominaisuutta. EnergyPLAN ei myöskään sovellu kovin hyvin erittäin yksityiskohtaisiin teknisiin analyyseihin vaan enemmänkin laajempien alueiden tai kansallisen tason kokonaisvaltaiseen energiasuunnitteluun. Vain harvoja yhtä kokonaisvaltaisia ja alueelliseen strategiseen energiasuunnitteluun soveltuvia ohjelmia on saatavissa. On syytä mainita, että kattava optimointiominaisuus voidaan toki linkittää lähes mihin tahansa ohjelmaan (mukaan lukien EnergyPLAN) mallintamisrajapintojen tai suoran linkityksen avulla (ks. luvut 3.2.4 ja 3.3.2), mutta tämä vaatii tyypillisesti erittäin vahvaa ohjelmointiosaamista ja huomattavasti resursointia linkityksen suorittamiseen (jos linkityksiä ole valmiiksi tehty), mitä voidaankin pitää suurimpana yksittäisenä mallintamisrajapintojen helposti lähestyttävyyttä estävänä tekijänä – eli hyvin vahvasti myös alueellisen energiaoptimoinnin helposti lähestyttävyyttä estävänä

tekijänä. DER-CAM on puolestaan hyvä esimerkki alueelliseen energiasuunnitteluun soveltuvasta ohjelmasta, johon on valmiiksi integroitu kattava optimointiominaisuus, mutta DER-CAM ei ole teknologiakirjastoltaan kovin kattava malli (ainakaan vielä) eikä kykene juurikaan huomioimaan radikaaleja teknologisia tai regulatiivisia muutoksia. DER-CAM on myös räätälöity erityisesti Yhdysvaltoihin sopivaksi, mikä hankaloittaa olennaisesti sen hyödyntämistä Eurooppaan sijoituvissa analyyseissä. City Energy Analyst voidaan mainita hyvänä esimerkkinä edistyksellistä bottom-up-mallintamista ja optimointia hyödyntävästä työkalusta, mutta se on vielä varsin varhaisessa kehitysvaiheessa. Muita vastaavia työkaluja on myös kehitteillä. Lisäksi täysin matemaattisen mallin luominen ja sen optimointi esimerkiksi GAMSia hyödyntäen on yksi mahdollisuus alueellisen energiaoptimoinnin suorittamiseen, mutta sitä ei voida pitää helposti lähestyttävänä ratkaisuna eikä välttämättä muutenkaan erityisen suositeltavana käytännönläheisen suunnittelun yhteydessä, mutta toisaalta valmiiden matemaattisten mallien hyödyntäminen esimerkiksi GAMSia hyödyntäen on jo huomattavasti helpommin lähestyttävissä oleva ratkaisu.

## 8. BAU-referenssiratkaisun määrittäminen

Kun mallintaminen on suoritettu ja vaadittavat lähtötiedot on kerätty/simuloitu, voidaan alueellisen energiajärjestelmän referenssiratkaisun suorituskyky (ts. tavoitteena toimivat indikaattorit ja avainsuorituskykyindikaattorit) selvittää simuloimalla edellisessä vaiheessa luotua alueellisen energiajärjestelmän mallia (joka voi sisältää useita osamalleja). Tämän tuloksena saadaan referenssiratkaisun optimaalista operointitapaa vastaava suorituskyky (mahdollisesti usealla eri skenaariolla), koska energiajärjestelmien analysointimallit yleensä suorittavat automaattisesti (ilman erillistä optimoinnin osamallia) energiajärjestelmän operationaalisen optimoinnin (ks. luku 3.3.2). Jos näin ei kuitenkaan ole, niin referenssiratkaisun operointitapa voidaan joko määrittää manuaalisesti (jos sellainen on selvästi osoitettavissa) tai vaihtoehtoisesti se voidaan optimoida erillisellä optimoinnin osamallilla esimerkiksi dynaamista optimointia tai prioriteettilistauksia hyödyntäen. Referenssiratkaisun ja vaihtoehtoisten ratkaisujen (ks. vaihe 9) vertailtavuuden takaamiseksi tulisi kuitenkin pyrkiä selvittämään referenssiratkaisun optimaalisen operointitavan mukainen suorituskyky. BAU-referenssiratkaisulla (engl. *Business as Usual solution*) tarkoitetaan mahdollisimman tavanomaista ja historian perusteella kaikista todennäköisimmin valittavaa suunnitteluratkaisua, joka yleensä samalla edustaa minimaalista teknologista, markkinallista ja institutionaalista muutosta eli toisin sanoen niiden maksimaalista pysyvyyttä. BAU-referenssiratkaisut ovat usein vahvasti linkittyneitä polkuriippuvuuteen, ja niiden tyypillisiä perusteita ovatkin esimerkiksi puhtaasti liiketoiminnallinen (suppea) tarkastelu, lyhyen aikavälin suuret tuottovaatimukset ja lyhyen aikavälin riskien minimaalisuus – näillä lähtökohdilla on hyvin epätodennäköistä, että BAU-referenssiratkaisu edistäisi kestävien energiajärjestelmien muodostumista (ks. luku 3.1). BAU-referenssiratkaisun suorituskyvyn määrittäminen on kuitenkin tärkeää, koska se mahdollistaa vaihtoehtoisilla ratkaisuilla saavutettavien suhteellisten hyötyjen/haittojen määrittämisen, mikä puolestaan mahdollistaa vaihtoehtoisten ratkaisujen suoran vertailun BAU-referenssiratkaisuun. Tämä lisää analyysin vaikuttavuutta ja selkeyttä sekä edesauttaa vaihtoehtoisilla ratkaisuilla saavutettavien hyötyjen kommunikoinnista, mikä puolestaan edesauttaa kestävien energiajärjestelmien realisoitumista. Jos vaiheessa 2 on päätetty, että alueellisen energiajärjestelmän suorituskykyä tarkastellaan useammasta eri lähtökohdasta (esimerkiksi liiketoiminnallisesta ja teknisestä lähtökohdista) niin myös BAU-referenssiratkaisun suorituskyky tulee määrittää kummastakin lähtökohdasta. Esimerkiksi EnergyPLAN kykenee määrittämään energiajärjestelmän suorituskyvyn eri näkökulmilla ja ohjausstrategioilla. Strategisessa energiasuunnittelussa sosioekonomisen ja teknisen suorituskyvyn (liittyvät vahvasti yhteen, ks. luku 3.1) maksimoinnin tulisi kuitenkin ensisijaisesti



ohjata alueellisen energiajärjestelmän suunnittelua (ks. luku 3.3.1), ja tämä puolestaan pitäisi olla mainittuna myös reflektoidussa ylemmässä energiastrategiassa (ks. vaihe 1).

## 9. Optimaalisten vaihtoehtojen luominen

Optimaaliset vaihtoehdot (sosioekonomisesta tai teknisestä lähtökohdasta) luodaan hyödyn­ tämällä alueellisia energiaoptimointimenetelmiä (ks. luku 3.3.2). Jos optimoinnin osamallia ei ole vielä mallintamisvaiheessa (ks. vaihe 7) linkitetty energiajärjestelmän suorituskyvyn analysointimalliin, niin se suoritetaan tässä vaiheessa, ellei käytetä työkalua, johon kattava optimointiominaisuus on jo valmiiksi integroituna. On syytä huomata, että eri osamallien toisiinsa linkittäminen voi osoittautua erittäin haastavaksi tehtäväksi, joka saattaa vaatia hyvin vahvaa ohjelmointiosaamista (esimerkiksi Python tai Java). JSON voidaan mainita esimerkiksi mahdollisesta tiedonvaihtoformaateista optimoinnin osamallin ja alueellisen energiajärjestelmän analysointimallin välillä. Tässä vaiheessa määritetään myös tarkasti optimointiin sisältyvien muuttujien pääryhmien (ks. vaihe 2) yksittäiset muuttujat (esimerkiksi teknologiavalinnan pääryhmän yksittäiset teknologiat) sekä määritetään niiden etsintäalueet (ks. luku 2). Muuttujien valinnassa tulee erityisesti huomioida vaiheessa 3 tehty analyysin rajaus ja räätälöinti. Parametrissa analyysiä (ks. luku 2) voidaan hyödyntää sekä muuttujien lopullisessa tarkassa valinnassa, että niiden etsintäalueiden määrittämisessä. Tämän vaiheen tuloksena saadaan lukuisia optimaalisia ja lähes optimaalisia suunnitteluratkaisuja suorituskykyineen. Jos kyseessä on monitavoiteoptimointi, muodostuu optimaalisista vaihtoehtoisista suunnitteluratkaisuista Pareto-rintama, jonka pohjalta voidaan esittää asiantuntijasuositus (ks. vaihe 11), ja joka voidaan esittää päätöksentekijälle lopullista valintaa varten (ks. luku 2). Jos analyysi sisältää useita tavoitteita ja useita skenaarioita, niin tämän vaiheen tuloksena muodostuu useita skenaariokohtaisia suunnitteluratkaisujen Pareto-rintamia (varsinainen skenaario-optimointi tosin tuottaa vain yhden Pareto-rintaman). On syytä huomata, että tarkkojen muuttujien valitseminen saattaa aiheuttaa tarpeen lähtötietojen täydentämiselle koskien esimerkiksi yksittäisten teknologioiden suorituskykyparametreja. Ei kuitenkaan ole erityisen tehokasta, järkevää tai ideaalista, jos alueellisessa energiaoptimoinnissa joudutaan aina keräämään samoja (yleispäteviä) lähtötietoja, kun ne voisivat olla helposti saatavissa ja keskitetysti ylläpidettynä esimerkiksi erilaisten lähtötietokirjastojen muodossa (ks. vaihe 6). Tässä vaiheessa voidaan myös tutkia erilaisten tavoitteenasettelujen (ks. vaihe 2) vaikutusta suunnitteluratkaisujen Pareto-rintamaan.

## 10. Tuloksiin liittyvän herkkyuden, epävarmuuden ja toteutettavuuden arvioiminen

Yksitavoitteisessa optimoinnissa voidaan varsin suoraviivaisesti valita esimerkiksi kymmenen optimaalisinta (toisistaan eriyvää) suunnitteluratkaisua jatkotarkasteluun. Monitavoitteisessa tapauksessa asia on huomattavasti monimutkaisempi, sillä periaatteessa kaikki Pareto-rintamaan kuuluvat suunnitteluratkaisut ovat suorituskyvyltään optimaalisia eli niitä ei voida ainakaan matemaattisessa mielessä asettaa paremmuusjärjestykseen (ks. luku 2). Pareto-rintamaan saattaa sisältyä useita kymmeniä tai jopa satoja suunnitteluratkaisuja, minkä vuoksi kaikkia niistä ei voida myöskään tehokkaasti tarkastella erikseen. Tästä juontuvaa ongelmallisuutta voidaan lieventää monipuolisten avainsuorituskykyindikaattorien ja päätöksentekijän kanssa tehtävän yhteistyön avulla. Avainsuorituskykyindikaattorien perusteella Pareto-rintamasta voidaan tunnistaa kaikista suotuisimmat suunnitteluratkaisut, sillä ne tarjoavat mahdollisuuden asettaa Pareto-ratkaisut paremmuusjärjestykseen tai ainakin mahdollisuuden sulkea joitakin ratkaisuja pois tarkastelusta. Tämä voidaan toteuttaa hyvin yksinkertaisesti esimerkiksi Excelin toiminallisuuksia hyödyntäen (olettaen, että kaikille Pa-

reto-rintaman ratkaisuille on optimoinnin yhteydessä automaattisesti määritetty avainsuorituskykyindikaattorien arvot). Lisäksi yhdessä päätöksentekijän kanssa Pareto-rintamaa voidaan rajata manuaalisesti esimerkiksi sen ääripäistä.

Kun jatkotarkasteltavat suunnitteluratkaisut on rajattu esimerkiksi kymmeneen kappaleeseen, niiden herkkyyttä ja epävarmuutta voidaan analysoida tarkemmin. Tämä kannattaa aloittaa valittujen optimaalisten (tai lähes optimaalisten) suunnitteluratkaisujen herkkyyksianalyysillä (ks. luku 2). Herkkyyksianalyysin perusteella voidaan tunnistaa suurimmat epävarmuutta aiheuttavat parametrit ja niiden suhteelliset vaikutukset lopputulokseen. Erityisesti tulisi pyrkiä tunnistamaan sellaiset merkittävää epävarmuutta aiheuttavat parametrit, joihin on mahdollista vaikuttaa esimerkiksi poliittisilla päätöksillä ja parhaan mahdollisuuden mukaan yhteistyössä vaikutusvaltaa omaavien toimijoiden kanssa (esimerkiksi kaupungin päättäjät) lukita nämä suunnitteluratkaisut tai tehdä niitä koskevat suositukset (ks. vaihe 11). Näin voidaan parantaa analyysin luotettavuutta huomattavasti ja tällainen toimintamalli vastaa myös strategisen energiasuunnittelun periaatteita. Tämän jälkeen tulee tehdä perusteellinen analyysin epävarmuuden yleisemmän tason arviointi, jossa huomioidaan erityisesti analyysin sisäiset epävarmuustekijät (ulkoiset epävarmuustekijät otetaan huomioon mahdollisella skenaariotarkastelulla ja herkkyyksianalyysillä). Analyysin sisäisiä epävarmuustekijöitä ovat esimerkiksi käytetyn menetelmän rajoitteet, mallin ja lähtötietojen tarkkuus sekä tehdyt alkuoletukset. Sisäiset epävarmuustekijät olisi suotavaa kvantifioida eli esittää numeerisessa muodossa. Tässä voidaan hyödyntää esimerkiksi sopivia tilastollisen virheen tunnuslukuja (ks. luku 3.2.4). Lisäksi valituille suunnitteluratkaisuille voidaan tehdä laajemmat kvalitatiiviset arvioinnit, esimerkiksi SWOT-analyysit. Lopuksi tulisi vielä arvioida valittujen suunnitteluratkaisujen toteutettavuutta (ainakin kvalitatiivisesti), mutta lähtökohtaisesti vaiheessa 3 suoritettujen analyysin rajauksen ja räätälöinnin tulisi varmistaa kaikkien optimaalisten ratkaisujen toteutettavuus. Analyysin herkkyyden, epävarmuuden ja toteutettavuuden arvioinnin yksityiskohtaisuus ja laajuus kannattaa mitoittaa niin, että ne ovat tarpeeseen nähden mahdollisimman tarkoituksenmukaisella tasolla. Valituille suunnitteluratkaisuille voidaan määrittää lopuksi myös liiketoiminnalliset suorituskyvyt ja siten tunnistaa tarvittavat systeemitason muutokset, jotta teknisesti ja sosioekonomisesti paras mahdollinen suorituskyky vastaisi myös liiketoiminnallisesti parasta mahdollista suorituskykyä.

On huomioitava, että alueellisen energiaoptimoinnin epävarmuuden ja herkkyyden arviointi on itsessään varsin laaja ja monimutkainen tehtävä, johon ei ole olemassa yksiselitteisin oikeaa tapaa. Vaiheessa 4 luodut skenaariot ja niiden valittu käsittelytapa ovat esimerkiksi suoraan kytköksissä analyysin herkkyyden arviointiin ja johdonmukaisesti toteutettuna tukevat sitä merkittävästi. Skenaarioiden valinta ja herkkyyksianalyysiin sisällytettävien parametrien määrittäminen sekä mahdolliset muut analyysin epävarmuuden hallitsemisen toimenpiteet tuleekin aina arvioida tapauskohtaisesti kokonaisvaltaista asiantuntijuutta hyödyntäen. Esimerkiksi Keirstead & Shah (2013) esittävät kattavaa pohdintaa alueellisen energiaoptimoinnin epävarmuuden ja herkkyyden analysoimisesta sekä analyysin sisäisten ja ulkoisten epävarmuustekijöiden huomioimisesta.

## **11. Raportointi, visualisointi ja suositusten esittäminen**

Tämä vaihe sisältää menetelmän, lähtötietojen ja tulosten raportoinnin, tulosten visualisoinnin ja analyysiin perustuvien suositusten esittämisen. Raportoinnissa tulee noudattaa avoimuuden, läpinäkyvyyden ja jäljitettävyyden periaatteita (ks. luku 3.3.1) ja tyyliään raportin tulisi olla tieteellinen (ei kaupallinen). Koska edellä mainitut kriteerit johtavat perusteelliseen, laajaan ja yksityiskohtaiseen raportointiin (vaikka tieteellinen raportointityyli onkin

itse asiassa hyvin kompaktia asiapitoisuuteensa nähden), niin tässä viitekehyksessä suositellaan tehtäväksi kaksi erillistä raporttia: tieteellinen raportti ja tiivistelmäraportti. Tiivistelmäraportin ei tarvitse olla tyyliltään tieteellinen, ja se tulisi kohdistaa erityisesti päätöksentekijöille sekä muille ei-asiantuntijasidosryhmille (ja julkiselle yleisölle), niin että se tarjoaa kompaktissa muodossa analyysin olennaisimman sisällön ja erityisesti päätöksentekijän kannalta relevantteimmat asiat (pituus esimerkiksi noin kymmenen sivua). Tiivistelmäraportti lisää analyysin helposti ymmärrettävyyttä ja vaikuttavuutta eli osaltaan edistää kestävien energiajärjestelmien realisoitumista. Tieteellisen raportin rooli puolestaan on taata analyysin läpinäkyvyys ja avoimuus: tieteellisen raportin avulla osoitetaan, että analyysi on suoritettu perusteellisesti sekä mahdollistetaan sen tarkka vertaisarvioitavuus ja toistettavuus. On huomioitava, että tiivistelmäraportissa on tuotava selvästi ilmi, että analyysistä on olemassa myös kattava tieteellinen raportti ja osoittaa lukijalle, mistä se on avoimesti saatavissa – kummankin raportin tulisi olla yhtä helposti ja samasta paikasta avoimesti saatavissa. Toinen vaihtoehto on sisällyttää tiivistelmäraportti kiinteäksi osaksi tieteellistä raporttia, mutta tämä ei välttämättä ole suositeltavaa, sillä tällä tavoin raportin pituus kasvaa entisestään, mikä voi vähentää sen helposti lähestyttävyyttä eli analyysin vaikuttavuus voi heikentyä. Toisaalta tällöin myös ero tieteellisen raportin ja tiivistelmäraportin välillä hämärtyy, mikä saattaa vaarantaa analyysin läpinäkyvyyttä.

Analyysin visualisointi on olennainen osa analyysin raportointia. Raportin kuvitukset ja kuvaajat tulisivat olla tarkoituksenmukaisia ja huoliteltuja, niin että ne parhaalla mahdollisella tavalla edesauttavat analyysin helposti ymmärrettävyyttä ja vaikuttavuutta. Visualisoinnissa on kiinnitettävä erityistä huomiota siihen, että raportin muun sisällön tavoin myös visualisoinnin, etenkin kuvaajien, tulee olla yksiselitteisiä ja objektiivisia sekä sisällöltään että valinnoiltaan. Tämä johtuu siitä, että raporttiin valittavat kuvaajat ja niiden sisällöllinen esitystapa ovat raportin luojaan subjektiivisten vääristymien alaisia – tätä voitaisiin tosin vähentää raportoinnin osittaisella standardoimisella koskien esimerkiksi tiettyjen kuvaajien raporttiin sisällyttämisen pakollisuutta ja niiden standardiesitystapaa. Esimerkiksi Sankey-diagrammit ovat alueellisessa energiasuunnittelussa erittäin havainnollistavia esityksiä, joiden luomisessa voidaan hyödyntää muun muassa ilmaista SankeyMATIC-ohjelmaa. Avainsuorituskykyindikaattorit voidaan esittää esimerkiksi matriisimuodossa tai niin kutsutun hämähäkki-kaavion avulla (kutsutaan myös säteittäiseksi kaavioksi). Ylimääräsähkön visualisoinnissa voidaan hyödyntää esimerkiksi pylväsdigrammeja tai ylimääräsähkökuvaajia (engl. *excess electricity diagrams*) (ks. Lund 2014). Optimoinnin konvergenssi voidaan visualisoida kuvaajalla, jossa tavoitefunktion minimaalinen arvo esitetään optimointisykliä funktiona ja optimoinnin Pareto-rintama(t) voidaan esittää tulosavaruuden pistejoukkona (ks. luku 2). Herkkyysanalyysi voidaan visualisoida esimerkiksi tornodidiagrammien (engl. *tornado diagram*) avulla ennalta määritetyllä luottamusvälillä (95 %:n luottamusväli on tyypillinen valinta). Parametrinen analyysi voidaan visualisoida esimerkiksi kuvaajalla, jossa tavoitefunktion arvo esitetään parametrin arvona funktiona. Edellä mainitut visualisoinnit ovat alueellisissa energiaoptimoinneissa hyvin tyypillisiä, mutta myös muut analyysin kannalta relevantit tulokset kannattaa visualisoida mahdollisimman tarkoituksenmukaisella ja selvällä tavalla. Perinteisten x-y-kuvaajien ja pylväsdigrammien lisäksi on olemassa runsaasti erilaisia tulosten visualisointi- ja analysointimahdollisuuksia, joista voidaan mainita esimerkkinä ilmainen Design Explorer -työkalu. Raportissa voidaan esimerkiksi tarjota linkki Design Explorer -projektiin tai vastaavaan, jossa eri suunnitteluvaihtoehtoja voi myös ei-asiantuntija varsin suoraviivaisesti ja interaktiivisesti itse tutkia (optimointimenetelmät mahdollistavat tämänkaltaisen toimintamallin).

Raportissa olisi hyvä esittää optimaalisten ratkaisujoukkojen lisäksi selviä asiantuntijasuosituksia koskien lopullista suunnitteluratkaisua, sillä analyysin suorittaja on oletettavasti perehtynyt kyseiseen tutkimusongelmaan selvästi päätöksentekijöitä perusteellisemmin ja hänellä on myöskin oletettavasti vahvempi osaaminen alueellisesta strategisesta energiasuunnittelusta. Päätöksentekijän näkökulmasta nämä suositukset antavat erinomaisen lähtökohdan ja valmiuden lopullisen päätöksen tekemiselle. Suosituksia tulee esittää myös muista analyysissä mahdollisesti selvinneistä asioista, kuten toimenpiteistä, joilla sosioekonomisesti parhaista mahdollisista ratkaisuista saadaan myös liiketoiminnallisesti parhaita mahdollisia ratkaisuja.

## **12. Analyysin päivittäminen lähtötietojen muuttuessa**

Alueellinen energiasuunnittelu tulisi sisällyttää osaksi aluesuunnittelua mahdollisimman aikaisessa vaiheessa suunnitteluprosessia (ks. luku 3.3.1). Suunnitteluprosessin edetessä lähtötiedot ja reunaehdot tarkentuvat ja voivat myös muuttua merkittävästi, mikä saattaa edellyttää suunnitteluprosessin alkuvaiheessa suoritettua alueellisen energia-analyysin päivittämistä. Tätä korostaa se, että aluetason rakentamisprojekti vie tyypillisesti useita vuosia. Alueellisen energia-analyysin päivittämisessä voidaankin tunnistaa kaksi erillistä päivitystarvetta: lyhyen aikavälin ja pitkän aikavälin päivitystarve. Lyhyen aikavälin päivitystarpeella tarkoitetaan suunnittelun alkuvaiheen ja loppuvaiheen välistä päivitystarvetta – tällä aikavälillä erityisesti suunnittelukohdetta koskevat reunaehdot saattavat muuttua (ks. vaihe 3). Pitkän aikavälin päivitystarpeella tarkoitetaan puolestaan erityisesti vuosien kuluessa tapahtuvaa yhteiskunnan yleistä kehitystä, jonka myötä esimerkiksi teknologioiden suorituskyvyt ja hinnat todennäköisesti muuttuvat ja myös uusia innovatiivisia teknologioita saattaa ilmestyä markkinoille. Alueet suunnitellaan usein modulaarisella tavalla, jolloin edellä tehty jaottelu hämärtyy, mutta periaatteen tulisi säilyä samana: ensimmäiseen moduuliin luotua energia-analyysiä ei tulisi päivittämättä monistaa useaa vuotta myöhemmin rakennettavalle moduulille. Analyysin päivittämisellä voidaan tarkoittaa myös erilaisten tavoitteenasettelujen vaikutuksen tutkimista, mutta alkuvaiheessa suoritettavan analyysin yhteydessä eri tavoitteenasettelujen vaikutuksen tutkiminen on suositeltavaa suorittaa jo vaiheessa 9. Optimointimenetelmien hyödyntämisen ansiosta analyysin päivittäminen voidaan suorittaa minimaalisella lisätyöllä.

## 4 Johtopäätökset

Strateginen energiasuunnittelu on muodostunut omaksi tieteenalaksi viimeisen 50 vuoden aikana energiaomavaraisuuden ja energiajärjestelmien suorituskyvyn maksimoinnin merkityksen korostumisen myötä. Perinteisesti strategista energiasuunnittelua tehdään kansallisella tasolla, mutta varsinkin 2000-luvulla myös alueellinen strateginen energiasuunnittelu on yleistynyt. Alueellinen taso onkin varsin intuitiivinen valinta hierarkkisen strategisen energiasuunnittelun suppeimmaksi resoluutioksi, sillä energiajärjestelmiin liittyvien suunnitteluratkaisujen toimeenpano tapahtuu aluetasolla esimerkiksi yksittäisissä kaupungeissa. Tämän lisäksi energiajärjestelmien näkökulmasta aluetasoa voidaan pitää pienimpänä samojen reunaehtojen omaavana kokonaisuutena, jossa voidaan vielä saavuttaa merkittäviä systeemitason suorituskykyparannuksia edistyksellisten energiajärjestelmien synergiavaikutuksien kattavalla hyödyntämisellä. Alueellinen strateginen energiasuunnittelu kykenee räätälöitymään juuri kyseiselle alueelle ottaen huomioon sen paikallisen kontekstin, luonnonvarat ja muut ominaispiirteet. On kuitenkin huomioitava, että ideaalisessa tilanteessa alueellisen strategisen energiasuunnittelun tulisi pohjautua ylempään, esimerkiksi kansalliseen, energiastrategiaan, jonka tavoitteena on saavuttaa pitkällä aikavälillä sosioekonomisesti paras mahdollinen energiajärjestelmä koko yhteiskunnan kannalta – eli kestävä energiajärjestelmä.

Kestävissä energiajärjestelmissä hyödynnetään pääasiallisesti uusiutuvia energialähteitä. Uusiutuvat energialähteet ovat luonteeltaan erityyppisiä kuin fossiiliset polttoaineet, minkä vuoksi kestävilta energiajärjestelmiltä vaaditaan uudenlaista joustavuutta verrattuna perinteisiin energiajärjestelmiin. Energiajärjestelmän joustavuudella tarkoitetaan, että energiajärjestelmällä on kyky säädellä toimintaansa niin, että erityisesti uusiutuviissa energiajärjestelmissä ajoittain esiintyvää energiantuotannon ja -kysynnän spatiotemporaalista yhteensopimattomuutta voidaan kompensoida. Integroitu älykäs energiajärjestelmä, jossa hyödynnetään esimerkiksi energiavektorien vuorovaikutuksia, kysyntäjoustoa ja energian varastointia, tarjoaa optimaalisesti toteutettuna tarvittavan joustavuuden kestäville energiajärjestelmille. Näin ollen kestävä energiajärjestelmä on määritelmältään myös kokonaisvaltaisesti integroitu sekä älykäs energiajärjestelmä. Kestävien energiajärjestelmien toteutuminen vaatii myös energiamarkkinoiden, säännöstelyn ja alan toimijoiden yhtenäistä sopeutumista uudenlaiseen järjestelmään, ja niiden tulisi pyrkiä edesauttamaan kestävien energiajärjestelmien muodostumista. Valtavat systeemitason tekniset, taloudelliset ja sosiaaliset suorituskykyparannukset ovat saavutettavissa kestävien energiajärjestelmien implementoinnilla, mutta näiden suorituskykyparannuksien realisoituminen vaatii kokonaisvaltaista lähestymistapaa. Kestäviin energiajärjestelmiin liittyvä alueellisten suunnitteluratkaisujen etsintäavaruus on huomattavasti laajempi ja monimutkaisempi perinteisiin energiajärjestelmiin verrattuna, mikä osaltaan luo tarpeen optimointimenetelmien hyödyntämiselle kestävien alueellisten energiajärjestelmien suunnittelussa. Toisaalta optimointimenetelmien hyödyntämisellä on myös suuri potentiaali tukea alueellista strategista energiasuunnittelua mahdollistamalla perinteisiin suunnittelumenetelmiin verrattuna ylivertaisen tehokkaan, objektiivisen ja dynaamisen suunnitteluprosessin, jolla voidaan tunnistaa myös radikaaleja teknologisia tai regulatiivisia muutoksia edellyttäviä ratkaisuja.

Energiamurroksen ajamana ja uusiutuvan energian sekä tietotekniikan kehityksen edesauttamana alueellinen energiaoptimointi onkin muodostunut viimeisen reilun vuosikymmenen aikana ajankohtaiseksi tutkimusaiheeksi. Tästä johtuen alueelliseen energiaoptimointiin liittyvät käsitteet, konseptit ja menetelmät eivät ole vielä vakiintuneita, ja aihetta koskevassa kirjallisuudessa on huomattavasti niihin liittyvää vaihtelua sekä epämääräisyyttä mutta myös

yrityksiä niiden yhdenmukaistamiseen ja vakiinnuttamiseen. Varsinkin viime vuosien aikana on esitetty lukuisia, usein hyvin matemaattisen näkökulman omaavia, tutkimuksia alueellisesta energiaoptimoinnista. Näissä tutkimuksissa osoitetaan johdonmukaisesti ja vakuuttavasti alueellisen energiaoptimoinnin potentiaali ja tärkeys siirryttäessä kohti pääasiallisesti uusiutuvia energialähteitä hyödyntäviä energiajärjestelmiä. Täysin kokonaisvaltaista ja yleispätevää alueellisen energiaoptimoinnin lähestymistapaa, joka huomioisi alueellisen energiasuunnittelun kaikki näkökulmat uusiutuvien energiajärjestelmien vaatimalla tarkkuudella, ei kuitenkaan ole kyetty esittämään – etenkin jos kriteeriksi lisätään menetelmän helposti lähestyttävyyden. Viime vuosina on kuitenkin tehty huomattava määrä kehitystyötä tällaisten lähestymistapojen ja työkalujen luomiseen, ja etenkin mallintamisrajapintoihin pohjautuvat työkalut vaikuttavat olevan erityisen potentiaalisia vaihtoehtoja kokonaisvaltaisen alueellisen energiaoptimoinnin toteuttamiseen.

Koska alueelliseen energiaoptimointiin ei ole olemassa yksittäistä yleispätevää työkalua tai menetelmää, jota hyödyntämällä voitaisiin aina saada luotettavia ja tarkkoja tuloksia tutkimuskohteesta riippumatta, niin analyysin suorittajan kokonaisvaltaisen asiantuntijuuden tärkeys korostuu koskien esimerkiksi optimointia, kestävästä kehitystä ja energiajärjestelmien suunnittelua sekä mallintamista. Alueellista energiaoptimointia onkin luonnehdittu kirjallisuudessa eräänlaiseksi tieteen ja taiteen välimuodoksi, jolla tarkoitetaan, että yksiselitteisesti parasta tai standardiksi kelpaavaa yleispätevää tapaa sen suorittamiseen ei ole ainakaan vielä kyetty osoittamaan. Jotta alueellinen energiaoptimointi voisi muodostua normiksi rakennetun ympäristön suunnittelussa, sen vaatiman kokonaisvaltaisen ymmärtämisen ja suorittamisen helposti lähestyttävyyteen tulisi kiinnittää siis erityistä huomiota. On myöskin huomioitava, että alueellinen energiaoptimointi ei ole luonteeltaan täysin itsenäinen ja irrallinen kokonaisuus, vaan se tulisi linkittää osaksi tarkoituksenmukaista kontekstia eli alueellista strategista energiasuunnittelua. Ilman strategisen energiasuunnittelun kontekstia ei ole takeita – ja on itse asiassa varsin epätodennäköistä – että yksittäiset alueelliset energiaoptimoinnit johtaisivat koko yhteiskunnan kannalta optimaaliseen lopputulokseen. Tässä työssä esitetty alueellisen strategisen energiasuunnittelun viitekehys (ks. luku 3.3.3) linkittää alueelliset energiaoptimointimenetelmät luontevalla ja tehokkaalla tavalla osaksi alueellista strategista energiasuunnittelua. Tämä puolestaan mahdollistaa alueellisen energiaoptimoinnin täyden potentiaalin hyödyntämisen myös kansallisella ja jopa globaalilla tasolla. Toisaalta tässä työssä esitetty viitekehys tarjoaa myös hyvän lähtökohdan täysin kokonaisvaltaisten ja yleispätevien alueellisten energiaoptimointityökalujen kehittämiseksi. Lähtökohtana esitetylle viitekehykselle toimii strategisen energiasuunnittelun periaate, jonka visiona on globaalisti kestävä energiajärjestelmät.

Työn ilmeisimmäksi jatkotutkimustarpeeksi voidaan mainita työssä luodun alueellisen strategisen energiasuunnittelun viitekehysten soveltaminen oikeaan kohteeseen. Tämän pohjalta voitaisiin tunnistaa viitekehysten mahdollisia kehitystarpeita ja sen yksittäisiin vaiheisiin liittyviä käytännön ongelmallisuksia – periaatteen tasolla viitekehysten implementoinnissa ei kirjoittajan näkemyksen mukaan ole menetelmällisiä tai teknologisia esteitä. Muita työssä esille nousseita tärkeitä jatkotutkimustarpeita ovat esimerkiksi alueellisen energiantarpeen vaivattoman ja luotettavan (stokastisuus) mallintamistavan ja työkalun kehittäminen (erityisesti kiinnittäen huomioon tarvittavien lähtötietojen määrän ja simuloinnin laskentaintensiivisyyden maltillisuuteen), optimoinnin osamallin ja energiajärjestelmän analysointimallin yhdistämisen yksinkertaisen ja helpon liitettävyyden mahdollistavien menetelmien ja työkalujen luominen (jotta mallintamispainotteisen alueellisen energiaoptimoinnin suoritta-

minen ei vaatisi korkean tason ohjelmointiosaamista), alueellisen tason edistyksellisten energiajärjestelmien (ts. älykkäiden integroitujen energiajärjestelmien) operointia reaaliaikaisesti optimoivien logiikoiden ja järjestelmien kehittäminen, lämpöverkon optimaalisen lämpötilan selvittäminen Suomen olosuhteissa ja lämpöverkon lämpötilan vaikutuksen kvantifiointi (esimerkiksi eri tuotanto- ja varastointiteknologioiden suorituskyvyn ja kustannusten kannalta), Suomen kansallisen täysin uusiutuvaan energiajärjestelmään tähtäävän virallisen ja yksityiskohtaisen energiastrategian luominen (tämän tulisi sisältää myös selvät ja yksityiskohtaiset erittelyt energiamarkkinoiden sopeutumistarpeista sekä regulaation muutostarpeista) ja kattavien virallisten alueellista energiaoptimointia edesauttavien lähtötietokirjastojen luominen (sekä ylläpitäminen). Edellä esille tuotujen yksittäisten jatkotutkimustarpeiden lisäksi on syytä mainita, että jokaisesta tämän työn luvusta on mahdollista johtaa useita jatkotutkimusaiheita, sillä työn tutkimusaihe on hyvin ajankohtainen ja nopean kehityksen alainen. Tämä työ antaakin erinomaisen lähtökohdan alueellisen energiaoptimoinnin jatkotutkimustarpeiden hahmottamiselle sekä sitä koskevan jatkotutkimuksen suorittamiselle.

## Tutkimuskysymykset

### 1. Mitä on alueellinen energiaoptimointi, ja miksi sitä tehdään?

Alueellinen energiaoptimointi on alueellisella taserajalla alueellisia energiavirtoja huomioivaa, erityisesti energiankysyntää, -jakelua, -tuotantoa ja varastointia koskevaa, parhaiden mahdollisten alueellisten energiajärjestelmäratkaisujen systemaattista etsintää, jossa hyödynnetään matemaattisia optimointimenetelmiä. Alueellinen energiaoptimointi on vahvasti kytköksissä uusiutuviin, edistyksellisiin ja hajautettuihin energiajärjestelmiin, energiamurrokseen ja kestäväan kehitykseen. Alueellinen energiaoptimointi voidaan sisällyttää osaksi alueellista strategista energiasuunnittelua, ja siinä on mahdollista huomioida myös alueellisen taserajan ulkopuolisia energiavirtoja suoralla tai epäsuoralla tavalla. Alueellista energiaoptimointia tehdään, jotta voitaisiin suorittaa hyvin informoituja, läpinäkyviä ja objektiivisia – parhaita mahdollisia – päätöksiä edistyksellisiin alueellisiin energiajärjestelmiin liittyvissä monimutkaisissa ja mahdollisesti myös monitavoitteellisissa päätöksentekotilanteissa. Alueellinen energiaoptimointi mahdollistaa satojen tai jopa tuhansien vaihtoehtojen tarkastelun ajankäytöllisesti ylivoimaisen tehokkaalla tavalla sekä erilaisten tavoitteenasettelujen vaikutuksen nopean ja dynaamisen analysoimisen. Alueellinen energiaoptimointi omaa suuren potentiaalin myös edistyksellisiin energiajärjestelmiin liittyvän monimutkaisuuden ja epävarmuuden hallitsemiseen.

### 2. Missä asioissa ja milloin alueellista energiaoptimointia voidaan hyödyntää?

Alueellista energiaoptimointia voidaan ennen kaikkea hyödyntää edistyksellisiä alueellisia energiajärjestelmiä koskevan päätöksenteon tukemisessa. Alueellisen energiaoptimoinnin avulla on mahdollista määrittää suunnitteluratkaisut, joilla alueelliselle energiajärjestelmälle asetettu tavoite tai tavoitteet saavutetaan optimaalisella tavalla. Nämä suunnitteluratkaisut, eli alueellisen energiaoptimoinnin muuttujat, liittyvät tyypillisesti energiajärjestelmän teknologiavalintoihin, teknologioiden mitoittamiseen, energiajärjestelmän operointitapaan, teknologioiden sijoitteluun ja energiaverkkojen reitittämiseen sekä energiatehokkuustoimenpiteisiin. Alueellisen energiaoptimoinnin potentiaali on suurimmillaan, kun sitä hyödynnetään mahdollisimman aikaisessa vaiheessa alueen suunnitteluprosessia ilman merkittäviä optimointia rajoittavia ehtoja – tämä mahdollistaa laajan etsintävaruuden ja uudenlaisten rat-

kaisujen tasavertaisen huomioimisen. Suurin hyöty alueellisesta energiaoptimoinnista saadaan, varsinkin koko yhteiskunnan tasolla, kun se integroidaan osaksi alueellista strategista energiasuunnittelua.

### 3. Kuinka alueellista energiaoptimointia voidaan tehdä etenkin uudisalueilla?

Alueellisen energiaoptimoinnin suorittamiseen ei ole yksiselitteisen oikeaa tapaa eikä kokonaisvaltaisen yleispätevää ja tarkkaa menetelmää tai työkalua. Varsinkaan myös käytännöllisen suunnittelun kriteereitä (esimerkiksi helposti lähestyttävyyttä, yksinkertaisuus ja luotettavuus) täyttäviä työkaluja ei juurikaan ole. Tieteellisessä kirjallisuudessa on esitetty lukuisia lähestymistapoja alueellisen energiaoptimoinnin matemaattiseen suorittamiseen, mutta nämä eivät ole vielä täysin jalostuneet käytännölliseen suunnitteluun soveltuviksi yleispäteviksi ja uskottavasti validoiduiksi työkaluiksi. Monia alueelliseen energiasuunnitteluun soveltuvia suppeanäkökulmaisempia työkaluja sen sijaan on jo kattavasti saatavissa, ja niiden yhdistäminen onkin yksi lupaavimmista tavoista luoda kokonaisvaltainen alueellisen energiaoptimoinnin työkalu. Esimerkiksi EnergyPLAN, DER-CAM ja City Energy Analyst edustavat varsin edistyksellisiä alueelliseen energiaoptimointiin sellaisenaan tai optimoinnin osamalliin yhdistettynä soveltuvia työkaluja. Alueellisessa energiaoptimoinnissa voidaan karkeasti katsoen hahmottaa kaksi toisistaan metodillisesti eroavaa lähestymistapaa: matemaattinen ja mallintamiseen pohjautuva lähestymistapa. Vaikka kirjallisuudessa on esitetty useita eri lähestymistapoja matemaattisen alueellisen energiaoptimoinnin suorittamiseen, niin optimointiongelmiin muotoiltu usein toistensa kanssa hyvin samankaltaisia. Energy Hub -konsepti voidaan mainita tärkeimpänä yksittäisenä matemaattisen alueellisen energiaoptimoinnin konseptina. Mallintamiseen pohjautuvissa lähestymistavoissa hyvin tyypillistä on usean osamallin yhdistäminen mallintamisrajoitusten avulla. Usein tämä sisältää kolmiulotteisen semanttisen aluemallin hyödyntämistä esimerkiksi alueen energiantarpeen ja paikallisen uusiutuvan energian tuotantopotentiaalin määrittämisessä (aluemallin massoitussmallin luominen ei kuitenkaan tyypillisesti lukeudu mukaan alueelliseen energiaoptimointiin). Rhinoceros-Grasshopper-yhdistelmä on yksi yleisimmistä ja myös lupaavimmista tähän soveltuvista työkaluista. Selvästi yleisempiä tapoja alueellisen energiantarpeen määrittämiseen ovat kuitenkin arkkityyppimenetelmä tai vastaavasta kohteesta mitatun datan skaalaaminen, vaikka kummassakin on selviä puutteita uudisalueiden alueellisessa energiaoptimoinnissa. Esimerkiksi edellä mainituilla tavoilla luotu alueellisen energiantarpeen malli voidaan yhdistää mallintamisrajoitustoja ja erilaisia tiedonvaihtoprotokollia hyödyntäen alueellisen energijärjestelmän analysointimalliin ja optimoinnin osamalliin sekä mahdollisesti myös muihin osamalleihin. Mallintamiseen pohjautuvaa alueellista energiaoptimointia lähestytään usein myös hierarkkisella tavalla, niin että ensin optimoidaan (tai vain määritetään) alueellinen energiantarve ja paikallinen energiantuotantopotentiaali, joita käytetään alueellisen energijärjestelmän analysointimallin lähtötietona, joka puolestaan itsessään sisältää optimointiominaisuuden tai se on linkitetty erilliseen optimoinnin osamalliin. Pienemmän mittakaavan (esimerkiksi yksi kortteli) ja/tai yksinkertaisemman alueellisen energiaoptimoinnin ongelmaa voidaan lähestyä myös suoraviivaisemmin esimerkiksi taukkolaskentaohjelmaa hyödyntämällä, mutta tällöin tulee ymmärtää menetelmän suoraviivaisuuden aiheuttama analyysin kokonaisvaltaisuuden ja tarkkuuden rajoitteellisuus. Lisäksi tällaisten menetelmien avoimuus ja läpinäkyvyys ovat usein hankalia osoittaa, mikä myös osaltaan rajoittaa niiden hyödyntämistä laajemmissa alueellisissa energiaoptimoinneissa.

Suurimmat erottavat tekijät uudisalueen ja jo olemassa olevan alueen energiaoptimoinnissa ovat, että uudisalueesta ei ole saatavilla mitattua dataa eikä siinä ole juurikaan teknologisesti rajoittavia tekijöitä. Tämän takia erityisesti uudisalueen energiaoptimoinnissa tulisi soveltaa



bottom-up-mallintamista, jossa malli perustuu ainakin suurimmaksi osaksi fysikaalisten ilmiöiden mallintamiseen. Uudisalue tarjoaa myös mahdollisuuden erittäin kokonaisvaltaisen ja myös energiankysyntää laajasti koskevan alueellisen energiaoptimoinnin suorittamiselle, minkä tuomia mahdollisuuksia tulisi parhaalla mahdollisella tavalla pyrkiä hyödyntämään. Tässä työssä luotua alueellisen strategisen energiasuunnittelun viitekehystä voidaan soveltaen hyödyntää myös korjausrakentamisen yhteydessä, ja tässä työssä esille tuotua alueellisen energiaoptimoinnin kokonaisuutta voidaan hyödyntää sekä uudisalueiden että soveltaen myös korjausrakentamisen tarpeisiin.

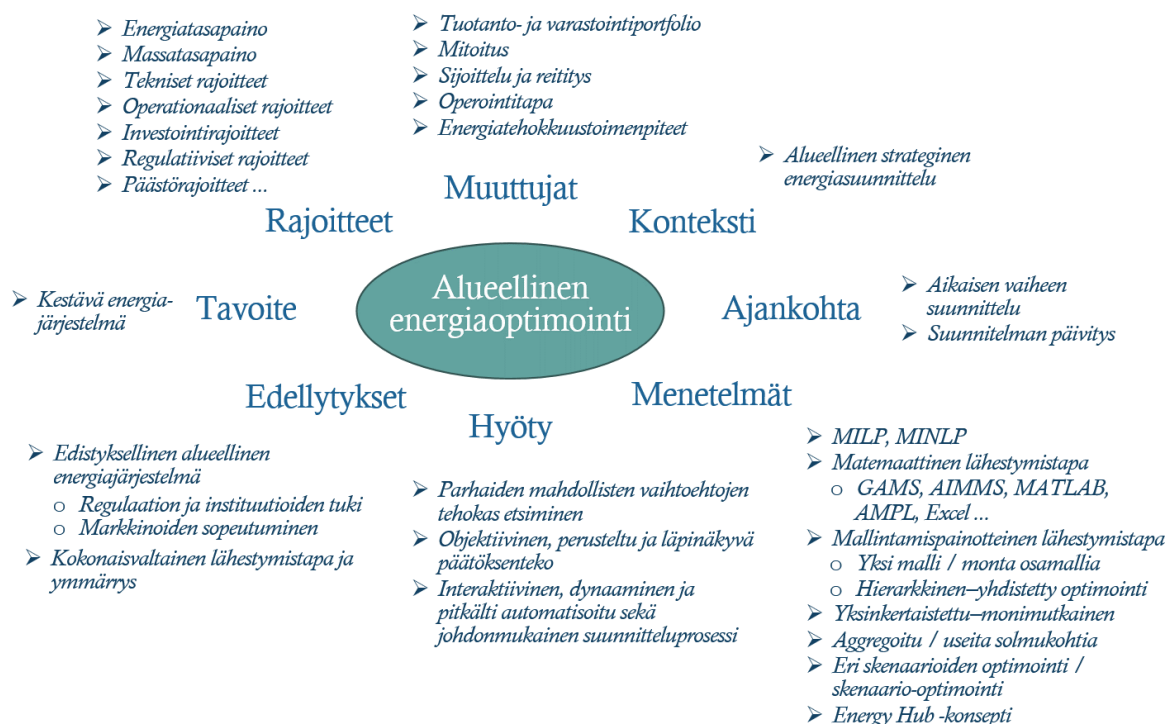
## 5 Yhteenveto

Tässä työssä tuotiin esille alueellisen energiaoptimoinnin muodostama kokonaisuus laajanäkökulmaisella ja kattavalla lähestymistavalla kiinnittäen erityistä huomiota aiheen käsittelyn selkeyteen ja helposti ymmärrettävyyteen kuitenkin niin, että aiheen käsittelyn kokonaisvaltaisuus ja yksityiskohtaisuus eivät merkittävästi heikentyneet. Työn ajankohtainen, erittäin monimutkainen ja laaja tutkimusaihe, jota koskevassa runsaassa kirjallisuudessa on selkeä puute hyvin jäsennellyistä ja kokonaisvaltaisesti eri asioita toisiinsa linkittävistä teoksista, tiivistettiin oivaltavalla tavalla yhtenäiseksi, eheäksi ja kompaktiksi kokonaisuudeksi. Työn rakenne jäseneltiin niin, että se intuitiivisesti noudattaa matemaattisen optimointiongelman muotoilua – luku 3.1 antaa valmiuden alueellisen energiaoptimointiongelman kestävän kehityksen mukaisen tavoitteenasettelun muodostamiseen, luku 3.2 antaa valmiuden optimointiongelman rajoitteiden ja edellytyksien tunnistamiseen ja luku 3.3 antaa valmiuden optimointiongelman muuttujien valitsemiseen sekä optimointiongelman ratkaisemiseen. Lisäksi luvussa 3.3 tuotiin ilmi, missä kontekstissa ja milloin alueellista energiaoptimointia voidaan parhaiten hyödyntää. Näitä ennen luvussa 2 tarjottiin monin esimerkein havainnollistettuna helposti lähestyttävä johdatus matemaattiseen optimointiin. Työn lähtökohtaisena alkuoletuksena oli, että alueellisia energiajärjestelmiä koskevassa päätöksenteossa, ja siten myös käytännönläheisessä alueellisessa energiasuunnittelussa, on ilmeinen ja välitön tarve menetelmille, joilla voidaan luoda ja analysoida vaihtoehtoisia alueellisia energiasuunnitteluratkaisuja kattavasti ja tehokkaasti sekä vertailla niiden suorituskykyä objektiivisesti. Alueellinen energiaoptimointi soveltuu tähän tarkoitukseen erinomaisesti, mutta sen suorittaminen vaatii ainakin optimointia, kestäviä edistyksellisiä energiajärjestelmiä ja energiajärjestelmien mallintamista koskevaa kokonaisvaltaista asiantuntemusta. Toisena lähtökohtaisena alkuoletuksena työssä olikin, että tälle asiantuntemukselle on huomattava tarve johtuen puutteellisesta aihealuetta koskevasta kokonaisvaltaisesta ja etenkin myös käytännönläheisen suunnittelun tarpeet huomioon ottavasta kirjallisuudesta. Tässä työssä pyrittiin siis osaltaan myös kaventamaan alueellista energiaoptimointia koskevan uusimman tieteellisen tutkimuksen ja käytännönläheisen suunnittelun välistä selkeää informaatiokatkosta.

Alueellisten energiaoptimointimenetelmien hyödyntäminen alueellisen strategisen energiasuunnittelun kontekstissa tarjoaa johdonmukaisen ja tehokkaan – perinteisiin suunnittelumenetelmiin verrattuna monella tapaa ylivertaisen – tavan tehdä alueellista energiasuunnittelua. Strategisen lähestymistavan ja johdonmukaisen alueellisen energiaoptimoinnin tarve korostuu etenkin silloin, kun tavoitteena on saavuttaa kestävä alueellinen energiajärjestelmä, joka tukee myös globaalilla tasolla kestävien energiajärjestelmien muodostumista. Alueellisen energiaoptimoinnin suorittaminen vaatii kuitenkin, ainakin vielä nykyään, vahvaa asiantuntemusta alueellisen energiaoptimoinnin eri osa-alueista: huomattavaa menetelmien ja työkalujen jatkokehitystä vaaditaan, jotta alueellisesta energiaoptimoinnista muodostuisi suora- viivaisesti ja yleispätevästi yhdellä työkalulla toteutettavissa oleva tehtävä. Alueellista energiaoptimointia koskevien menetelmien ja työkalujen kehitys on kuitenkin viime vuosina herättänyt paljon mielenkiintoa osittain tietotekniikan kehityksen ja energiamurroksen ajamana, mutta myös puhtaasti taloudellisten intressien tuloksena. Aluetason energiajärjestelmien optimoinnilla voidaan alueellisia energiavirtoja kierrättämällä ja energiajärjestelmän moninaisia synergiavaikutuksia hyödyntämällä saavuttaa huomattavia suorituskykyparannuksia verrattuna pelkästään yksittäisten rakennuksien optimointiin. Aluetason energiavirtojen kierrättäminen ja synergiavaikutuksien hyödyntäminen ei kuitenkaan ole mahdollista ilman edistyksellisiä alueellisia energiajärjestelmiä, jotka ovat joustavia, älykkäitä ja integroituvia. Edistyksellisten energiajärjestelmien muodostuminen puolestaan edustaa radikaalia

teknologista muutosta, minkä lisäksi myös energiamarkkinat ja energiasektoria koskeva regulaatio ovat vahvan muutospaineen alaisia. Voidaankin sanoa, että alueellinen energiaoptimoimint ei ole mielekäs tai tarpeellista ilman tätä muutosta, sillä perinteisten energiajärjestelmien suunnitteluvaihtoehdot ovat hyvin rajoitettuja ja helposti määritettävissä myös ilman optimointimenetelmien hyödyntämistä. Tässä työssä luotu alueellisia energiaoptimointimenetelmiä hyödyntävä alueellisen strategisen energiasuunnittelun viitekehys tarjoaa toimintamallin, jota noudattamalla voidaan ensinnäkin tunnistaa alueellisen energiajärjestelmän optimaaliset suunnitteluratkaisut mutta myös ne energiamarkkinoita ja regulaatiota koskevat muutokset, joilla nämä teknisestä näkökulmasta optimaaliset ratkaisut muodostuisivat myös liiketaloudellisesta näkökulmasta optimaaliseksi ratkaisueiksi – vain tällä tavalla alueellisia energiajärjestelmiä koskevat investoinnit saadaan kohdistumaan sosioekonomisesta näkökulmasta pitkällä aikavälillä optimaalisiin ratkaisuihin. Esitetty viitekehys tarjoaa myös erittäin johdonmukaisen, läpinäkyvän ja tehokkaan toimintamallin alueellisen energiasuunnittelun toteuttamiselle, minkä lisäksi se on alueellisten energiaoptimointimenetelmien hyödyntämisen ansiosta päivitettävissä minimaalisella manuaalisen lisätyön vaatimuksella. Tämä on tärkeää, koska aluetason rakentamisen aikahorisontti voi olla kymmeniäkin vuosia, ja toisaalta näin voidaan myös helposti ja dynaamisesti tarkastella esimerkiksi erilaisten tavoitteenasetteluiden, lähtötietojen ja alkuoletuksien vaikutuksia optimaaliseen suunnitteluratkaisuun tai suunnitteluratkaisuihin.

Alueellisella energiaoptimoinnilla tavoitellaan ennen kaikkea siis kestävää alueellista energiajärjestelmää, joka edesauttaa myös systeemitasolla kestävien energiajärjestelmien muodostumista. On syytä huomata, että hiilineutraalius ei itsessään takaa energiajärjestelmän kestävyyttä. Alueelliset energiaoptimointimenetelmät soveltuvat erinomaisesti energiajärjestelmien teknisten ominaisuuksien optimointiin, mutta oikeanlaisen optimointiongelman muotoilemisessa ja aluesuunnittelun muiden näkökulmien huomioimisessa kokonaisvaltaisella asiantuntijuudella on vielä ratkaiseva merkitys. Alla kuvassa 28 havainnollistetaan lopuksi alueellisen energiaoptimoinnin käsitettä ja siihen liittyviä näkökulmia sekä asioita.



Kuva 28 Alueellinen energiaoptimointi.

## Lähdeluettelo

- Absil, P., Mahony, R. & Sepulchre, R. (2008) *Optimization Algorithms on Matrix Manifolds*. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press. 240 s. ISBN 978-0-691-13298-3. (DOI: 10.1515/9781400830244).
- Acha, S., Mariaud, A., Shah, N. & Markides, C. (2018) *Optimal design and operation of distributed low-carbon energy technologies in commercial buildings*. Energy. [Verkkolehti]. Vol. 142. S. 578–591. [Viitattu 10.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.energy.2017.10.066.
- Ahmad, M., Mourshed, M., Yuce, B. & Rezgui, Y. (2016) *Computational intelligence techniques for HVAC systems: A review*. Building Simulation. [Verkkolehti]. Vol. 9:4. S. 359–398. [Viitattu 9.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1007/s12273-016-0285-4.
- Ahonen, A. (toim.) & Nuorkivi, A (toim.) (2013) *Energia yhdyskuntasuunnittelussa - Rohkeita ratkaisuja kestävämpään tulevaisuuteen*. Helsinki: Aalto-yliopisto. 159 s. (Aalto-yliopiston julkaisusarja, CROSSOVER 3/2013). ISBN 978-952-60-4991-5 (painettu) 978-952-60-4992-2 (pdf).
- Ahonen, T. & Honkapuro, S. (2017) *Energiamurroksen ennakoidut vaikutukset 2030: Kysynnänjoustojärjestelmät*. Helsinki: Aalto-yliopisto, Kauppakorkeakoulu, Johtamisen laitos. 8 s. (Aalto-C 6/2017). ISBN 978-952-60-7283-8.
- Aitkaliyev, B. (2017) *Calculation Application for Thermodynamic Properties of Piping Systems*. Bachelor's thesis. Ammattikorkeakoulu Novia. Vaasa. 40 s.
- Akhtari, M. & Baneshi, M. (2019) *Techno-economic assessment and optimization of a hybrid renewable co-supply of electricity, heat and hydrogen system to enhance performance by recovering excess electricity for a large energy consumer*. Energy Conversion and Management. [Verkkolehti]. Vol. 188. S. 131–141. [Viitattu 6.9.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.enconman.2019.03.067.
- Akorede, M., Hizam, H. & Pouresmaeil, E. (2010) *Distributed energy resources and benefits to the environment*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 14. S. 724–734. [Viitattu 24.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.rser.2009.10.025.
- Ala-Kokko, J. (2018) *Suurjänniteverkon maakaapelointi*. Opinnäytetyö. Oulun ammattikorkeakoulu. Oulu. 51 s.
- Alanne, K. (2018) *Introduction to optimization*. Espoo: Aalto-yliopisto. EEN-E4007 Building Energy Optimization -luentomateriaali.
- Alanne, K. & Cao, S. (2019) *An overview of the concept and technology of ubiquitous energy*. Applied Energy. [Verkkolehti]. Vol. 238. S. 284–302. [Viitattu 9.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.100.

- Alanne, K. & Saari, A. (2006) *Distributed energy generation and sustainable development*. Renewable & Sustainable Energy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 10. S. 539–558. [Viitattu 2.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.rser.2004.11.004.
- Alanne, K., Söderholm, N., Sirén, K. & Beausoleil-Morrison, I. (2010) *Techno-economic assessment and optimization of Stirling engine micro-cogeneration systems in residential buildings*. Energy Conversion and Management. [Verkkolehti]. Vol. 51:12. S. 2635–2646. [Viitattu 20.9.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.enconman.2010.05.029.
- Alimohammadisagvand, B., Alam, S., Ali, M., Degefa, M., Jokisalo, J. & Sirén, K. (2017) *Influence of energy demand response actions on thermal comfort and energy cost in electrically heated residential houses*. Indoor and Built Environment. [Verkkolehti]. Vol. 26:3. S. 298–316. [Viitattu 21.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1177/1420326X15608514.
- Allegrini, J., Orehounig, K., Mavromatidis, G., Ruesch, F., Dorer, V. & Evins, R. (2015) *A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 52. S. 1391–1404. [Viitattu 23.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.123.
- Allison, J. & Lents, J. (2002) *Encouraging distributed generation of power that improves air quality: can we have our cake and eat it too?*. Energy Policy. [Verkkolehti]. Vol. 30:9. S. 737–752. [Viitattu 29.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/S0301-4215(01)00135-5.
- Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D., McCallum, P. & Peacock, A. (2019) *Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 100. S. 143–174. [Viitattu 16.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.rser.2018.10.014.
- Arffman, M., Arve, J., Heinimäki, R., Korpelainen, K., Koskela-Koivisto, J., Piispa, J. & Piispanen, J. (2019) *Sähkökaupan keskitetyn tiedonvaihdon palvelujen (datahub) käyttöönotto-suunnitelma*. 1.3. painos. Helsinki: Fingrid Datahub Oy. 86 s. Saatavissa: <https://www.ediel.fi/datahub/business-processes/datahub-ohjeet>.
- Autodesk. (2019) *Insight*. Autodesk Inc. [Verkkokoaineisto]. [Viitattu 2.9.2019]. Saatavissa: <https://www.autodesk.com/products/insight/overview>.
- Aydinalp-Koksal, M. & Ugursal, V. (2008) *Comparison of neural network, conditional demand analysis, and engineering approaches for modeling end-use energy consumption in the residential sector*. Applied Energy. [Verkkolehti]. Vol. 85:4. S. 271–296. [Viitattu 8.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.apenergy.2006.09.012.
- Bačeković, I. & Østergaard, P. (2018) *A smart energy system approach vs a non-integrated renewable energy system approach to designing a future energy system in Zagreb*. Energy. [Verkkolehti]. Vol. 155. S. 824–837. [Viitattu 17.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.energy.2018.05.075.
- Balaman, Ş. & Selim, H. (2016) *Sustainable design of renewable energy supply chains integrated with district heating systems: A fuzzy optimization approach*. Journal of Cleaner

- Production. [Verkkolehti]. Vol. 133. S. 863–885. [Viitattu 15.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.06.001.
- Balyk, O., Andersen, K., Dockweiler, S., Gargiulo, M., Karlsson, K., Næraa, R., Petrović, S., Tattini, J., Termansen, L. & Venturi, G. (2019) *TIMES-DK: Technology-rich multi-sectoral optimisation model of the Danish energy System*. Energy Strategy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 23. S. 13–22. [Viitattu 26.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.esr.2018.11.003.
- Baynes, T. & Wiedmann, T. (2012) *General approaches for assessing urban environmental sustainability*. Current Opinion in Environmental Sustainability. [Verkkolehti]. Vol. 4:4. S. 458–464. [Viitattu 5.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.cosust.2012.09.003.
- Benson, H. (1998) *An Outer Approximation Algorithm for Generating All Efficient Extreme Points in the Outcome Set of a Multiple Objective Linear Programming Problem*. Journal of Global Optimization. [Verkkolehti]. Vol. 13:1. S. 1–24. [Viitattu 17.6.2019]. Saatavissa: URL: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1008215702611>.
- Bernard, J., Bocher, E., Petit, G. & Palominos, S. (2018) *Sky View Factor Calculation in Urban Context: Computational Performance and Accuracy Analysis of Two Open and Free GIS Tools*. Climate. [Verkkolehti]. Vol. 6:3. S. 1–24. [Viitattu 12.9.2019]. Saatavissa: DOI: 10.3390/cli6030060.
- Bhandari, B., Lee, K., Lee, G., Cho, Y. & Ahn, S. (2015) *Optimization of Hybrid Renewable Energy Power Systems: A Review*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. [Verkkolehti]. Vol. 2:1. S. 99–112. [Viitattu 28.11.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1007/s40684-015-0013-z.
- Bischi, A., Taccari, L., Martelli, E., Amaldi, E., Manzoloni, G., Silva, P., Camparini, S. & Macchi, E. (2014) *A detailed MILP optimization model for combined cooling, heat and power system operation planning*. Energy. [Verkkolehti]. Vol. 74. S. 12–26. [Viitattu 27.11.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.energy.2014.02.042.
- Bloess, A., Schill, W. & Zerrahn, A. (2018) *Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials*. Applied Energy. [Verkkolehti]. Vol. 212. S. 1611–1626. [Viitattu 13.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.12.073.
- Blomqvist, K., Härkönen, J. & Makkonen, T. (2017) *Älykkäät sähköverkot - Mobiilisähkövarastoilla energiahuoltovarmuutta ja säätövoimaa uusiutuvalle energialle*. Mobiilisähkövarastoilla energiahuoltovarmuutta ja säätövoimaa uusiutuvalle energialle -hanke. 33 s. Saatavissa: <http://www.karelia.fi/mobiilisahkovarastot/wp-content/uploads/2018/04/Alykkaat-sahkoverkot.pdf>.
- Bollinger, L. & Evins, R. (2015) *HUES: A Holistic Urban Energy Simulation Platform for Effective Model Integration*. Teoksessa: Scartezzini, J (toim.). Proceedings of CISBAT 2015 International Conference on Future Buildings and Districts – Sustainability from Nano to Urban Scale. Lausanne, Switzerland 9–11.9.2015. Lausanne, Switzerland. EPFL Solar Energy and Building Physics Laboratory. S. 841–846. ISBN 978-2-9701052-0-6. (URL: <https://infoscience.epfl.ch/record/212778>).

- Bouyer, J., Inard, C., Musy, M. (2011) *Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context*. Energy and Buildings. [Verkkolehti]. Vol. 43:7. S. 1549–1559. [Viitattu 16.9.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.02.010.
- Boyd, S. & Vandenberghe, L. (2004) *Convex Optimization*. 7. painos. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 716 s. ISBN 978-0-521-83378-3.
- Brown, M. & Ulgiati, S. (2004) *Energy quality, emergy, and transformity: H.T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems*. Ecological Modelling. [Verkkolehti]. Vol. 178. S. 201–213. [Viitattu 21.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2004.03.002.
- Bucher, C. & Andersson, G. (2012) *Generation of Domestic Load Profiles - an Adaptive Top-Down Approach*. Proceedings of PMAPS 2012. Istanbul, Turkey 10–14.6.2012. IEEE. S. 436–441. (URL: <https://www.researchgate.net/publication/282073597>).
- Buffa, S., Cozzini, M., D'Antoni, M., Baratieri, M. & Fedrizzi, R. (2019) *5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 104. S. 504–522. [Viitattu 31.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.rser.2018.12.059.
- Burger, S., Jenkins, J., Huntington, S. & Pérez-Arriaga, I. (2019) *Why Distributed? A Critical Review of the Tradeoffs Between Centralized and Decentralized Resources*. IEEE Power & Energy Magazine. [Verkkolehti]. Vol. 17:2. S. 16–24. [Viitattu 1.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1109/MPE.2018.2885203. ISSN 1540-7977 (painettu) 1558-4216 (sähköinen).
- Böing, F. & Regett, A. (2019) *Hourly CO2 Emission Factors and Marginal Costs of Energy Carriers in Future Multi-Energy Systems*. Energies. [Verkkolehti]. Vol. 12. S. 1–32. [Viitattu 10.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.3390/en12122260.
- Carajilescov, P. & Moreira, J. (2011) *Construction time of PWRs*. International Nuclear Atlantic Conference. Belo Horizonte, MG, Brazil 24–28.10.2011. INAC. ISBN 978-85-99141-04-5.
- Chen, L., Hang, J., Sandberg, M., Claesson, L., Sabatino, S. & Wigo, H. (2017) *The impacts of building height variations and building packing densities on flow adjustment and city breathability in idealized urban models*. Building and Environment. [Verkkolehti]. Vol. 118. S. 344–361. [Viitattu 12.9.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.03.042.
- Chicco, G. & Mancarella, P. (2009) *Distributed multi-generation: A comprehensive view*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 13. S. 535–551. [Viitattu 23.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.rser.2007.11.014.
- Child, M. & Breyer, C. (2016) *The role of energy storage solutions in a 100% renewable Finnish energy system*. Energy Procedia. [Verkkolehti]. Vol. 99. S. 25–34. [Viitattu 2.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.egypro.2016.10.094.

- Chinneck, J. (2015) *Practical Optimization: A Gentle Introduction*. June 23, 2015 version. Ottawa, Canada: Carleton University. 194 s. Saatavissa: [www.sce.carleton.ca/faculty/chinneck/po.html](http://www.sce.carleton.ca/faculty/chinneck/po.html).
- CNCA. (2019) *Carbon Neutral Cities Alliance Members*. Carbon Neutral Cities Alliance (CNCA). [Verkkosivusto]. [Viitattu 21.9.2019]. Saatavissa: <https://carbonneutralcities.org/cities/>.
- Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B.V. & Leahy, M. (2010) *A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems*. Applied Energy. [Verkkolehti]. Vol. 87:4. S. 1059–1082. [Viitattu 1.11.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.09.026.
- Cormio, C., Dicorato, M., Minoia, A. & Trovato, M. (2003) *A regional energy planning methodology including renewable energy sources and environmental constraints*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 7:2. S. 99–130. [Viitattu: 13.10.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/S1364-0321(03)00004-2.
- Davila, C., Reinhart, C. & Bemis, J. (2016) *Modeling Boston: A workflow for the efficient generation and maintenance of urban building energy models from existing geospatial datasets*. Energy. [Verkkolehti]. Vol. 117. S. 237–250. [Viitattu 14.8.2019]. (Part 1). Saatavissa: DOI: 10.1016/j.energy.2016.10.057.
- DEA. (2019) *Models*. Danish Energy Agency (DEA). [Verkkosivusto]. [Viitattu 26.8.2019]. Saatavissa: <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/models>.
- Deane, J., Ó Gallachóir, B. & McKeogh, E. (2009) *Techno-economic review of existing and new pumped hydro energy storage plant*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 14. S. 1293–1302. [Viitattu 13.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.rser.2009.11.015.
- DeCarolis, J., Daly, H., Dodds, P., Keppo, I., Li, F., McDowall, W., Pye, S., Strachan, N., Trutnevyte, E., Usher, W., Winning, M., Yeh, S. & Zeyringer, M. (2017) *Formalizing best practice for energy system optimization modelling*. Applied Energy. [Verkkolehti]. Vol. 194. S. 184–198. [Viitattu 4.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.03.001.
- DeForest, N., Mendes, G., Stadler, M., Feng, W., Lai, J. & Marnay, C. (2014) *Optimal deployment of thermal energy storage under diverse economic and climate conditions*. Applied Energy. [Verkkolehti]. Vol. 119. S. 488–496. [Viitattu 20.10.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.01.047.
- Dehaeseleer, J., Cayford, T., de Ville de Goyet, B. & Kas, I. (2015) *Gas grids for a smart energy system*. Gas for energy. [Verkkolehti]. no. 3. S. 22–26. [Viitattu 30.7.2019]. Saatavissa: URL: [https://www.gas-for-energy.com/uploads/g4e/news/gfe3\\_15\\_fb\\_Dehaeseleer.pdf](https://www.gas-for-energy.com/uploads/g4e/news/gfe3_15_fb_Dehaeseleer.pdf).



- Derelöv, M. (2009) *On Evaluation of Design Concepts - Modelling Approaches for Enhancing the Understanding of Design Solutions*. Dissertation. Linköpings universitetet. Linköping, Sweden. 227 s. ISBN 978-91-7393-536-4.
- Dickert, J. & Schegner, P. (2010) *Residential Load Models for Network Planning Purposes*. 2010 Modern Electric Power Systems (MEPS). Wroclaw, Poland 20–22.9.2010. IEEE. ISBN 978-83-921315-8-8 (sähköinen). (URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6007169>).
- DOE. (2019) *Building Energy Codes Program - Development*. U.S. Department of Energy (DOE). [Verkkoinfo]. [Viitattu 16.8.2019]. Saatavissa: <https://www.energycodes.gov/development>.
- Dogan, T. (2015) *Procedures for Automated Building Energy Model Production for Urban and Early Design*. Doctoral thesis. Massachusetts Institute of Technology (MIT). Cambridge, MA, USA. 110 s.
- Dogan, T. & Reinhart, C. (2017) *Shoiboxer: An algorithm for abstracted rapid multi-zone urban building energy model generation and simulation*. Energy and Buildings. [Verkkolehti]. Vol. 140. S. 1–38. [Viitattu 15.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.01.030.
- Driesen, J. & Katiraei, F. (2008) *Design for Distributed Energy Resources*. IEEE Power & Energy Magazine. [Verkkolehti]. Vol. 6:3. S. 30–40. [Viitattu 2.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1109/MPE.2008.918703. ISSN 1540-7977 (painettu) 1558-4216 (sähköinen).
- Drysdale, D., Mathiesen, B. & Lund, H. (2019) *From Carbon Calculators to Energy System Analysis in Cities*. Energies. [Verkkolehti]. Vol. 12:12. S. 1–21. [Viitattu 2.10.2019]. Saatavissa: DOI: 10.3390/en12122307.
- Ehsan, A. & Yang, Q. (2019) *Scenario-based investment planning of isolated multi-energy microgrids considering electricity, heating and cooling demand*. Applied Energy. [Verkkolehti]. Vol. 235. S. 1277–1288. [Viitattu 24.11.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.11.058.
- Elbeltagi, E., Hegazy, T. & Grierson, D. (2005) *Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms*. Advanced Engineering Informatics. [Verkkolehti]. Vol. 19:1. S. 45–53. [Viitattu 12.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.aei.2005.01.004.
- Elberg, R. & Lawrence, M. (2018) *From Smart Grid to Neural Grid - Industry transformation and the top five technologies poised to bring the grid into the cloud*. Chicago, IL, USA: Navigant Consulting, Inc. 19 s. Saatavissa: <https://www.navigant.com/insights/energy/2018/from-smart-grid-to-neural-grid>.
- Energiakokeilut.fi. (2019) *Uuden energian pilotit, demonstraatiot, kokeilut*. Smart Energy Transition -tutkimushanke. [Verkkoinfo]. [Viitattu 15.7.2019]. Saatavissa: <http://energiakokeilut.fi>.

- Esen, Ö. & Bayrak, M. (2017) *Does more energy consumption support economic growth in net energy-importing countries?*. Journal of Economics, Finance and Administrative Science. [Verkkolehti]. Vol. 22. S. 75–98. [Viitattu 26.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1108/JEFAS-01-2017-0015.
- Fang, X., Misra, S., Xue, G. & Yang, D. (2012) *Smart Grid – The New and Improved Power Grid: A Survey*. IEEE Communications Surveys & Tutorials. [Verkkolehti]. Vol. 14:4. S. 944–980. [Viitattu 7.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1109/SURV.2011.101911.00087. ISSN 1553-877X (sähköinen).
- Farhangi, H. (2010) *The Path of the Smart Grid*. IEEE Power & Energy Magazine. [Verkkolehti]. Vol. 8:1. S. 18–28. [Viitattu 7.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1109/MPE.2009.934876. ISSN 1540-7977 (painettu) 1558-4216 (sähköinen).
- Ferrari, S., Zagarella, F., Caputo, P. & D'Amico, A. (2019) *Results of a literature review on methods for estimating buildings energy demand at district level*. Energy. [Verkkolehti]. Vol. 175. S. 1130–1137. [Viitattu 14.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.energy.2019.03.172.
- Fonseca, J., Nguyen, T., Schlueter, A. & Marechal, F. (2016) *City Energy Analyst (CEA): Integrated framework for analysis and optimization of building energy systems in neighborhoods and city districts*. Energy and Buildings. [Verkkolehti]. Vol. 113. S. 202–226. [Viitattu 28.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.11.055.
- Forsström, J., Lahti, P., Pursiheimo, E., Rämä, M., Shemeikka, J., Sipilä, K., Tuominen, P. & Irmeli, Wahlgren. (2011) *Measuring energy efficiency - Indicators and potentials in buildings, communities and energy systems*. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland. s. (VTT Research Notes 2581 (sarjamerkintö). VTT-TIED-2581 (raporttikoodi)). ISBN 978-951-38-7707-1. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>.
- Frigg, R. & Hartmann, S., Zalta, E. (toim.) (2012) *Models in Science*. The Stanford Encyclopedia of Philosophy. [Verkkolehti]. [Viitattu 4.8.2019]. Saatavissa: <https://plato.stanford.edu/archives/sum2018/entries/models-science/>.
- Fu, H., Lewis, P., Sendhoff, B., Tang, K. & Yao, X. (2014) *What are dynamic optimization problems?*. IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). Beijing, China 6–11.7.2014. IEEE. ISBN 978-1-4799-1488-3 (sähköinen). (DOI: 10.1109/CEC.2014.6900316).
- Gabrielli, P., Gazzani, M., Martelli, E. & Mazzotti, M. (2018) *Optimal design of multi-energy systems with seasonal storage*. Applied Energy. [Verkkolehti]. Vol. 219. S. 408–424. [Viitattu 26.11.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.07.142.
- Gadd, H. & Werner, S. (2014) *Achieving low return temperatures from district heating substations*. Applied Energy. [Verkkolehti]. Vol. 136. S. 59–67. [Viitattu 31.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.09.022.

- Galus, M., Vayá, M., Krause, T. & Andersson, G. (2013) *The role of electric vehicles in smart grids*. WIREs Energy and Environment. [Verkkolehti]. Vol. 2. S. 384–400. [Viitattu 25.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1002/wene.56.
- Geidl, M. & Andersson, G. (2005) *Operational and topological optimization of multi-carrier energy systems*. 2005 International Conference on Future Power Systems. Amsterdam, Netherlands 18–18.11.2005. IEEE. ISBN 90-78205-02-4 (painettu). (DOI: 10.1109/FPS.2005.204199).
- Geidl, M. & Andersson, G. (2007) *Optimal Power Flow of Multiple Energy Carriers*. IEEE Transactions on Power Systems. [Verkkolehti]. Vol. 22:1. S. 145–155. [Viitattu 10.11.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1109/TPWRS.2006.888988.
- Geidl, M., Koepfel, G., Favre-Perrod, P., Klöckl, B., Andersson, G. & Fröhlich, K. (2007) *Energy Hubs for the Future*. IEEE Power & Energy Magazine. [Verkkolehti]. Vol. 5:1. S. 24–30. [Viitattu 17.11.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1109/MPAE.2007.264850.
- Ghorab, M. (2019) *Energy hubs optimization for smart energy network system to minimize economic and environmental impact at Canadian community*. Applied Thermal Engineering. [Verkkolehti]. Vol. 151. S. 214–230. [Viitattu 4.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.01.107.
- Goldberg, D. (1989) *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. 13. painos. Michigan: Addison-Wesley Publishing Company. 412 s. ISBN 978-0-201-15767-3.
- Haanpää, S. (2015) *Älykäs sähköverkko Kalasatamassa*. Helen. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 8.7.2019]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/asiakaspalvelu/ajankohtaista/arjessa/sahko/alykas-sahkoverkko-kalasatamassa>.
- Haikarainen, C., Pettersson, F. & Saxén, H. (2019) *Optimising the regional mix of intermittent and flexible energy technologies*. Journal of Cleaner Production. [Verkkolehti]. Vol. 219. S. 508–517. [Viitattu 4.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.103.
- Han, S. & Kim, J. (2019) *A multi-period MILP model for the investment and design planning of a national-level complex renewable energy supply system*. Renewable Energy. [Verkkolehti]. Vol. 141. S. 736–750. [Viitattu 6.10.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.renene.2019.04.017.
- Hannah, L. (2014) *Stochastic Optimization*. Teoksessa: Wright, J. (toim.). International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. 2. painos. Elsevier. S. 473–481. ISBN 978-00-8097-086-8 (painettu) ISBN 978-00-8097-087-5 (sähköinen).
- Hansen, K., Connolly, D., Lund, H., Drysdale, D. & Thellufsen, J. (2016) *Heat Roadmap Europe: Identifying the balance between saving heat and supplying heat*. Energy. [Verkkolehti]. Vol. 115. S. 1663–1671. [Viitattu 17.11.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.energy.2016.06.033.

- Hargreaves, A., Cheng, V., Deshmukh, S., Leach, M. & Steemers, K. (2017) *Forecasting how residential urban form affects the regional carbon savings and costs of retrofitting and decentralized energy supply*. Applied Energy. [Verkkolehti]. Vol. 186. S. 549–561. [Viitattu 18.11.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.095.
- Hargreaves, T., Wilson, C. & Hauxwell-Baldwin, R. (2018) *Learning to live in a smart home*. Building Research & Information. [Verkkolehti]. Vol. 46:1. S. 127–139. [Viitattu 8.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1080/09613218.2017.1286882. ISSN 0961-3218 (painettu) 1466-4321 (sähköinen).
- Hassan, A., Cipcigan, L. & Jenkins, N. (2018) *Impact of optimised distributed energy resources on local grid constraints*. Energy. [Verkkolehti]. Vol. 142. S. 878–895. [Viitattu 3.11.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.energy.2017.10.074.
- HEAL. Jensen, G. (toim.) (2013) *The unpaid health bill - How coal power plants make us sick*. Brussels, Belgium: The Health and Environment Alliance (HEAL). 45 s. Saatavissa: [https://www.env-health.org/wp-content/uploads/2018/06/unpaid\\_health\\_bill\\_EN.pdf](https://www.env-health.org/wp-content/uploads/2018/06/unpaid_health_bill_EN.pdf).
- Hedman, Å. (2016) *Energy-efficient city planning - The role and importance of actionable regulations*. Väitöskirja. Aalto-yliopisto. Helsinki. 71 s. ISBN 978-952-60-6621-9.
- Heidarinejad, M., Mattise, N., Dahlhausen, M., Sharma, K., Benne, K., Macumber, D., Brackney, L. & Srebric, J. (2017) *Demonstration of reduced-order urban scale building energy models*. Energy and Buildings. [Verkkolehti]. Vol. 156. S. 17–28. [Viitattu 11.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.08.086.
- Heimonen, I. (2017) *Pelillistäminen motivoi kuluttajia vähentämään sähkön kulutushuippuja – pilottikohteina Helsinki, Nizza ja Wien*. VTT. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.10.2019]. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/medialle/uutiset/pelillistaaminen-motivoi-kuluttajia-vahentamaan-sahkon-kulutushuippuja>.
- Heiple, S. (2007) *Using Building Energy Simulation and Geospatial Modeling Techniques in Determine High Resolution Building Sector Energy Consumption Profiles*. Master's thesis. Portland State University. Portland, OR, USA. 80 s. Saatavissa: DOI: 10.15760/etd.5287.
- Helen. (2019) *Energiantuotanto Helsingissä*. Helen. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 24.6.2019]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/yritys/energia/energiantuotanto/energiantuotanto2>.
- Heleno, M., Mashayekh, S., Stadler, M., Cardoso, G. & Luís, R. (2017) *Optimal Sizing and Placement of Distributed Generation: MILP vs PSO Comparison in a Real Microgrid Application*. Intelligent System Applications to Power Systems (ISAP) Conference. San Antonio, TX, USA 17–20.9.2017. ISAP. LBNL-2001060. (URL: <https://building-microgrid.lbl.gov/publications>).
- Helsingin kaupunki. Lehtonen, K. (toim.) (2015) *Hajautetun energiatuotannon edistämisen selvittäminen sekä kaupungin kiinteistöjen ja kaupunkirakenteen energiatehokkuuden tavoitteiden ja seurannan laatiminen*. Helsinki: Helsingin kaupunki, kaupunginkanslia. 58 s.

- (Helsingin kaupungin keskushallinnon julkaisuja 2015:25). ISBN 978-952-272-998-9 (painettu) 978-952-272-999-6 (sähköinen). Saatavissa: <https://dev.hel.fi/paatokset/media/att/da/da7b93301700051a17fee3a826b1ad4041b68d17.pdf>.
- Helsingin kaupunki. (2016) *Uuden sukupolven 3D-kaupunkimallit Helsinkiin!*. Helsinki: Helsingin kaupunki. 10 s. Saatavissa: <https://www.hel.fi/static/kanslia/Helsinki3D/Uuden-sukupolven-kaupunkimallit-Helsinkiin.pdf>.
- Helsingin kaupunki. (2018) *Hiilineutraali Helsinki 2035 -toimenpideohjelma*. Päivitetty versio (30.1.2019). Helsinki: Helsingin kaupunki / keskushallinnon julkaisuja. 128 s. (Helsingin kaupungin keskushallinnon julkaisuja 2018:4). ISBN 978-952-331-485-6 (painettu) 978-952-331-486-2 (sähköinen). Saatavissa: <https://www.stadinilmasto.fi>.
- Hietanen, J. & Kokko, P. (2016) *IFC mallinnusvaatimukset CityGML muotoisen kaupunkimallin automaattiseen tuottamiseen IFC aineistosta*. Building Smart Finland kaupunkityöryhmä. 6 s. Saatavissa: <https://buildingsmart.fi/wp-content/uploads/2016/11/19.5.2016.IFC2CityGMLmallinnusohjeet.pdf>.
- Hirvonen, J. (2017) *Towards zero energy communities: Increasing local and renewable energy utilization in buildings through shared energy and storage*. Väitöskirja. Aalto-yliopisto. Helsinki. 149 s. ISBN 978-952-60-7452-8 (painettu) 978-952-60-7451-1 (pdf).
- Hirvonen, K. (2015) *Hajautettu uusiutuva energiantuotanto – haihattelua vai tulevaisuutta?*. Opinnäytetyö. Turun ammattikorkeakoulu. Turku. 62 s.
- Hong, T., Chen, Y., Lee, S. & Piette, M. (2016) *CityBES: A Web-based Platform to Support City-Scale Building Energy Efficiency*. The 5th International Workshop on Urban Computing (UrbComp 2016). San Francisco, CA, USA 14.8.2016. ACM SIGKDD. (URL: <http://www2.cs.uic.edu/~urbcomp2013/urbcomp2016/accept.html>).
- Honkonen, M. (2016) *Thermal energy storage concepts and their feasibility*. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo. 79 s.
- Huttunen, R. (toim.) (2017) *Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030*. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö. 119 s. (Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 4/2017). ISBN 978-952-327-189-0 (painettu) 978-952-327-190-6 (pdf). Saatavissa: <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi>.
- IBM. (2019) *CPLEX Optimizer*. IBM. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.6.2019]. Saatavissa: <https://www.ibm.com/analytics/cplex-optimizer>.
- IEA. (2019) *Renewables 2019*. IEA. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 21.10.2019]. Saatavissa: <https://www.iea.org/renewables2019/>.
- IEA-ETSAP. (2019) *TIMES*. IEA-ETSAP. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 26.8.2019]. Saatavissa: <https://iea-etsap.org/index.php/applications>.

- Ilmatieteen laitos. (2019) *Energialaskennan testivuodet tulevaisuuden ilmastossa*. Ilmatieteen laitos. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.9.2019]. Saatavissa: <https://ilmatieteenlaitos.fi/energialaskennan-testivuodet-tulevaisuuden-ilmastossa>.
- IPCC. Masson-Delmotte, V. (toim.) & Zhai, P. (toim.) & Pörtner, H. (toim.) & Roberts, D. (toim.) & Skea, J. (toim.) & Shukla, P. (toim.) (2018) *Global Warming of 1.5 °C*. World Meteorological Organization (WMO) & United Nations Environment Programme (UNEP). 26 s. ISBN 978-92-9169-151-7.
- Jørgensen, S. & Svirezhev, M. (2004) *Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems*. Oxford, UK: Pergamon. 380 s. ISBN 978-0-08-044166-5 (painettu) 978-0-08-057520-9 (sähköinen). (DOI: 10.1016/B978-0-08-044166-5.X5000-9).
- Kainulainen, R. (2015) *Älykäs pienjännitejakeluverkko*. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo. 145 s.
- Kammen, D. & Sunter, D. (2016) *City-integrated renewable energy for urban sustainability*. Science. [Verkkolehti]. Vol. 352:6288. S. 922–928. [Viitattu 5.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1126/science.aad9302. ISSN 0036-8075.
- Karmellos, M. & Mavrotas, G. (2019) Multi-objective optimization and comparison framework for the design of Distributed Energy Systems. Energy Conversion and Management. [Verkkolehti]. Vol. 180. S. 473–495. [Viitattu 18.11.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.enconman.2018.10.083.
- Keirstead, J., Jennings, M. & Sivakumar, A. (2012) *A review of urban energy system models: Approaches, challenges and opportunities*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 16:6. S. 3847–3866. [Viitattu 25.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.rser.2012.02.047.
- Keirstead, J. (toim.) & Shah, N. (toim.) & Acha, S., Fisk, D., Jennings, M., Mancarella, P., Pantaleo, A., Papaioannou, N., Rutter, P., Samsatli, N. & Sivakumar, A. (2013) *Urban Energy Systems - An integrated approach*. Abingdon, UK: Routledge. 312 s. ISBN 978-0-415-52901-3 (painettu) ISBN 978-0-203-06678-2 (sähköinen).
- Kekkonen, R. (2015) *Ympäristötekijöiden vaikutus Oulun kaupungin lämpösaarekeilmiöön ke-sällä*. Pro gradu -tutkielma. Oulun yliopisto. Oulu. 75 s.
- Kekkonen, S. (2017) *Hiedanrannan alueellinen energiaselvitys*. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo. 88 s.
- Kettunen, R. (2019) *Smart Grid -toiminnot kerrostaloissa osana verkon optimointia jakeluver-kossa*. Insinöörityö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Savonlinna. 26 s.
- Kolen, S., Molitor, C., Wagner, L. & Monti, A. (2017) *Two-level agent-based scheduling for a cluster of heating systems*. Sustainable Cities and Society. [Verkkolehti]. Vol. 30. S. 273–281. [Viitattu 21.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.scs.2017.01.014.

- Koljonen, T., Similä, L., Sipilä, K., Helynen, S., Airaksinen, M., Laurikko, J., Manninen, J., Mäkinen, T., Lehtilä, A., Honkatukia, J., Tuominen, P., Vainio, T., Järvi, T., Mäkelä, K., Vuori, S., Kiviluoma, J., Sipilä, K., Kohl, J. & Nieminen, M. Koljonen, T. (toim.) & Similä, L. (toim.) (2012) *Low Carbon Finland 2050 – VTT clean energy technology strategies for society*. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland. 75 s. (VTT Visions 2). ISBN 978-951-38-7962-4 (painettu) 978-951-38-7963-1 (sähköinen).
- Komiyama, H. & Takeuchi, K. (2006) *Sustainability science: building a new discipline*. Sustainability Science. [Verkkolehti]. Vol. 1:1. S. 1–6. [Viitattu 19.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1007/s11625-006-0007-4.
- Kriechbaum, L., Scheiber, G. & Kienberger, T. (2018) *Grid-based multi-energy systems – modelling, assessment, open source modelling frameworks and challenges*. Energy, Sustainability and Society. [Verkkolehti]. Vol. 8:35. S. 1–19. [Viitattu 1.10.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1186/s13705-018-0176-x.
- Krog, L. & Sperling, K. (2019) *A comprehensive framework for strategic energy planning based on Danish and international insights*. Energy Strategy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 24. S. 83–93. [Viitattu 27.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.esr.2019.02.005.
- Kuronen, T. (2017) *Älykotijärjestelmä - Mikrokontrolleriohjattu älykoti*. Opinnäytetyö. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Jyväskylä. 81 s.
- Laakso, A. (2016) *Tulevaisuutta tekemään*. 12 s. Saatavissa: <https://www.hamk.fi/wp-content/uploads/2018/07/NÄKY-käsitteitä-ja-metodeja.pdf>.
- Laki hiilen energiakäytön kieltämisestä 416/2019. Annettu Helsingissä 29.3.2019. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2019/20190416>.
- Lasseter, R. (2002) *MicroGrids*. Teoksessa: 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings. New York, NY, USA 27–31.1.2002. IEEE. S. 305–308. ISBN 0-7803-7322-7. (DOI: 10.1109/PESW.2002.985003).
- Lasseter, R. & Piagi, P. (2004) *Microgrid: a conceptual solution*. IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551). Aachen, Germany 20–25.6.2004. IEEE. S. 4285–4290. ISBN 0-7803-8399-0. (DOI: 10.1109/PESC.2004.1354758).
- LBNL. (2019) *Distributed Energy Resources – Customer Adoption Model (DER-CAM)*. Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). [Verkkoaineisto]. [Viitattu 23.10.2019]. Saatavissa: <https://building-microgrid.lbl.gov/projects/der-cam>.
- Ledesma, P., Arredondo, F. & Castronuovo, E. (2017) *Optimal Curtailment of Non-Synchronous Renewable Generation on the Island of Tenerife Considering Steady State and Transient Stability Constraints*. Energies. [Verkkolehti]. Vol. 10. S. 1–15. [Viitattu 23.11.2019]. Saatavissa: DOI: 10.3390/en10111926.
- Lehtilä, A. & Pirilä, P. (1996) *Reducing energy related emissions: Using an energy systems optimization model to support policy planning in Finland*. Energy Policy. [Verkkolehti].

- Vol. 24:9. S. 805–819. [Viitattu 13.10.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/0301-4215(96)00066-3.
- Leligou, H., Zahariadis, T., Sarakis, L., Tsampasis, E., Voulkidis, A. & Velivasaki, T. (2018) *Smart Grid: a demanding use case for 5G technologies*. IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops). EU Horizon 2020 Programme. (DOI: 10.1109/PERCOMW.2018.8480296).
- Leobner, I., Smolek, P., Heinzl, B., Raich, P., Schirrer, A., Kozek, M., Rössler, M. & Mörzinger, B. (2018) *Simulation-based Strategies for Smart Demand Response*. Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. [Verkkolehti]. Vol. 6:1. S. 33–46. [Viitattu 23.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.13044/j.sdewes.d5.0168.
- Li, B. (2017) *Use of Building Energy Simulation Software in Early-Stage of Design Process*. Master's thesis. KTH Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden. 90 s.
- Lindgren, J. & Lund, P. (2015) *Identifying bottlenecks in charging infrastructure of plug-in hybrid electric vehicles through agent-based traffic simulation*. International Journal of Low-Carbon Technologies. [Verkkolehti]. Vol. 10:2. S. 110–118. [Viitattu 25.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1093/ijlct/ctv008.
- Lindqvist, H., Häggblom, J., Mäkinen, K., Grannas, A., Grünenfelder, M., Siira, K., Westling, G., Honkapuro, S., Laaksonen, H., Pasonen, R., Thomasson, T., Joronen, T., Pääkkönen, A. & Schalin, B. Saari, P. (toim.) (2019) *The final joint report of the projects - FLEXe DEMO and CEMNBioFlex*. Espoo: CLIC Innovation. 63 s. Saatavissa: [https://flexens.com/wp-content/uploads/2019/03/Final\\_Report\\_FLEXe\\_demo\\_and\\_CEM-BioFlex.pdf](https://flexens.com/wp-content/uploads/2019/03/Final_Report_FLEXe_demo_and_CEM-BioFlex.pdf).
- Lindskog, H. (2004) *Smart communities initiatives*. Linköping, Sweden: University of Linköping. 16 s. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/228371789\\_Smart\\_communities\\_initiatives](https://www.researchgate.net/publication/228371789_Smart_communities_initiatives).
- Loponen, L. (2017) *Huipputehon arviointi*. Opinnäytetyö. Savonia-ammattikorkeakoulu. Kuopio. 30 s.
- Lund, P. (2008) *Analysis of advanced energy chain typologies*. International Journal of Energy Research. [Verkkolehti]. Vol. 32. S. 144–153. [Viitattu 20.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1002/er.1349.
- Lund, H. (2014) *Renewable Energy Systems - A Smart Energy Systems Approach to the Choice and Modeling of 100% Renewable Solutions*. 2. painos. Waltham, MA 02451, USA & Oxford, UK: Elsevier. 362 s. ISBN 978-0-12-410423-5.
- Lund, P., Lindgren, J., Mikkola, J. & Salpakari, J. (2015) *Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 45. S. 785–807. [Viitattu 26.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.rser.2015.01.057.



- Lund, H. & Thellufsen, J. (2019) *EnergyPLAN - Advanced Energy Systems Analysis Computer Model*. 15. painos. Aalborg, Denmark: Aalborg University. 188 s. Saatavissa: <https://www.energyplan.eu/>.
- Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J., Hvelplund, F. & Mathiesen, B. (2014) *4th Generation District Heating (4GDH) – Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems*. Energy. [Verkkolehti]. Vol. 68. S. 1–11. [Viitattu 29.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.energy.2014.02.089.
- Lund, H., Østergaard, P., Chang, M., Werner, S., Svendsen, S., Sorknæs, P., Thorsen, J., Hvelplund, F., Mortensen, B., Mathiesen, B., Bojesen, C., Duic, N., Zhang, X. & Möller, B. (2018) *The status of 4th generation district heating: Research and results*. Energy. [Verkkolehti]. Vol. 164. S. 147–159. [Viitattu 26.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.206.
- Machado, P., Mouette, D., Villanueva, L., Esparta, A., Leite, B. & Santos, E. (2019) *Energy systems modeling: Trends in research publication*. WIREs Energy and Environment. [Verkkolehti]. Vol. 8:4. S. 1–15. [Viitattu 14.9.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1002/wene.333.
- Mancarella, P. (2014) *MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models*. Energy. [Verkkolehti]. Vol. 65. S. 1–17. [Viitattu 23.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.energy.2013.10.041.
- Marler, R. & Arora, J. (2004) *Survey of multi-objective optimization methods for engineering*. Structural Multidisciplinary Optimization. [Verkkolehti]. Vol. 26. S. 369–395. [Viitattu 17.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1007/s00158-003-0368-6.
- McNeel Europe. (2019) *food4Rhino*. McNeel Europe. [Verkkokoaineisto]. [Viitattu 12.8.2019]. Saatavissa: <https://www.food4rhino.com>.
- Mehleri, E., Sarimveis, H., Markatos, N. & Papageorgiou, L. (2012) *A mathematical programming approach for optimal design of distributed energy systems at the neighbourhood level*. Energy. [Verkkolehti]. Vol. 44:1. S. 96–104. [Viitattu 26.11.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.energy.2012.02.009.
- Mekawy, M., Östman, A. & Shahzad, K. (2011) *Towards Interoperating CityGML and IFC Building Models: A Unified Model Based Approach*. Teoksessa: Kolbe, T. (toim.), König, G. (toim.) & Nagel, C. (toim.). Advances in 3D Geo-Information Sciences. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. S. 73–93. ISBN 978-3-642-12669-7 (painettu) 978-3-642-12670-3 (sähköinen).
- Midžić, I., Štorga, M. & Marjanović, D. (2014) *Energy quality hierarchy and "transformity" in evaluation of product's working principles*. Teoksessa: Lien, T. (toim.). 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering. Trondheim, Norway 18–20.6.2014. Red Hook, NY, USA. Curran. S. 300–305. ISBN 978-16-32668-94-3. (DOI: 10.1016/j.procir.2014.06.084).
- Mikkola, J. (2017) *Modeling and optimization of urban energy systems for large scale integration of variable renewable energy generation*. Väitöskirja. Aalto-yliopisto. Helsinki. 69 s. ISBN 978-952-60-7266-1 (painettu) 978-952-60-7265-4 (pdf).

- Mikkonen, L. & Kauriinoja, A. Pongrácz, E. (toim.) & Hänninen, N. (toim.) (2011) *Energiaa biomassasta ja jätteistä - Määdätys, kaasutus, biomassan poltto, pyrolyysi ja alkoholikäyminen: Laitosten asennus, turvallisuus ja ylläpito*. Micro Energy to Rural Enterprise (MicrE). 28 s. Saatavissa: [http://nortech.oulu.fi/MicrE\\_files/MicrE\\_W2E\\_FIN.pdf](http://nortech.oulu.fi/MicrE_files/MicrE_W2E_FIN.pdf).
- Mohammadi, M., Noorollahi, Y., Mohammadi-ivatloo, B. & Yousefi, H. (2017) *Energy hub: From a model to a concept – A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 80. S. 1512–1527. [Viitattu 10.11.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.rser.2017.07.030.
- Mohammadi, S., Vries & Schaefer, W. (2013) *A Comprehensive Review of Existing Urban Energy Models in the Built Environment*. 16 s. (DOI: 10.1007/978-3-642-37533-0\_14).
- Mohd, A., Schmelter, A., Morton, D., Ortjohann, E. & Hamsic, N. (2008) *Challenges in integrating distributed energy storage systems into future smart grid*. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2008). Cambridge, United Kingdom 30.6–2.7.2008. IEEE. S. 1627–1632. (DOI: 10.1109/ISIE.2008.4676896).
- Moresino, F. & Fragnière, E. (2018) *Combining Behavioral Approaches with Techno-Economic Energy Models: Dealing with the Coupling Non-Linearity Issue*. Energies. [Verkkolehti]. Vol. 11:7. S. 1–14. [Viitattu 6.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.3390/en11071787.
- Morini, A., Ribeiro, M. & Hotza, D. (2019) *Early-stage materials selection based on embodied energy and carbon footprint*. Materials and Design. [Verkkolehti]. Vol. 178. S. 1–13. [Viitattu 24.9.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107861.
- Mornati, F. (2013) *Pareto Optimality in the work of Pareto*. European Journal of Social Sciences. [Verkkolehti]. Vol. 51:2. S. 65–82. [Viitattu 17.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.4000/ress.2517 URL: <https://journals.openedition.org/ress/2517#abstract-2517-en>.
- Morvaj, B., Evins, R. & Carmeliet, J. (2016) *Optimising urban energy systems: Simultaneous system sizing, operation and district heating network layout*. Energy. [Verkkolehti]. Vol. 116. S. 619–636. [Viitattu 19.10.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.energy.2016.09.139.
- Muehleisen, R. & Bergerson, J. (2016) *Bayesian Calibration - What, Why And How*. 4th International High Performance Buildings Conference. Purdue, IN, USA 11–14.7.2016. Purdue University. Paper 167. S. 1–7. (URL: <https://docs.lib.purdue.edu/ihpbc/167>).
- Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Meunier, F., Bousquet, P., Tréméac, B., Merchat, M., Poeuf, P. & Marchadier, C. (2012) *How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France?*. International Journal of Climatology. [Verkkolehti]. Vol. 33. S. 210–227. [Viitattu 13.9.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1002/joc.3415.
- Mustonen, V., Koponen, J. & Spilling, K. (2014) *Älykäs kaupunki – Smart City - Katsaus fiksiin palveluihin ja mahdollisuuksiin*. Liikenne- ja viestintäministeriö. 37 s. (Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 12/2014). ISBN 978-952-243-397-8 (sähköinen). Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-397-8>.

- Müller, A., Kranzl, L., Tuominen, P., Boelman, E., Molinari, M. & Entrop, A. (2011) *Estimating exergy prices for energy carriers in heating systems: Country analyses of exergy substitution with capital expenditures*. Energy and Buildings. [Verkkolehti]. Vol. 43. S. 3609–3617. [Viitattu 4.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.09.034.
- Müller, D., Monti, A., Stinner, S., Schlösser, T., Schütz, T., Matthes, P., Wolisz, H., Molitor, C., Harb, H. & Streblow, R. (2015) *Demand side management for city districts*. Building and Environment. [Verkkolehti]. Vol. 91. S. 283–293. [Viitattu 21.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.03.026.
- Nardelli, P., Rubido, N., Wang, C., Baptista, M., Pomalaza-Raez, C., Cardieri, P. & Latva-aho, M. (2014) *Models for the modern power grid*. The European Physical Journal Special Topics. [Verkkolehti]. Vol. 223:12. S. 2423–2437. [Viitattu 6.9.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1140/epjst/e2014-02219-6.
- Nault, E., Moonen, P., Rey, E., Andersen, M. (2017) *Predictive models for assessing the passive solar and daylight potential of neighborhood designs: A comparative proof-of-concept study*. Building and Environment. [Verkkolehti]. Vol. 116. S. 1–16. [Viitattu 17.9.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.01.018.
- Nesbakken, R. (1998) *Residential Energy Consumption for Space Heating in Norwegian Households - A Discrete-Continuous Choice Approach*. Statistics Norway, Research Department. 24 s. (Discussion Papers No. 231). Saatavissa: <http://www.ssb.no>.
- Neto, A. & Fiorelli, F. (2008) *Comparison between detailed model simulation and artificial neural network for forecasting building energy consumption*. Energy and Buildings. [Verkkolehti]. Vol. 40:12. S. 2169–2176. [Viitattu 8.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.06.013.
- Nguyen, A., Reiter, S. & Rigo, P. (2013) *A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis*. Applied Energy. [Verkkolehti]. Vol. 113. S. 1043–1058. [Viitattu 9.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.08.061.
- Ni, L., Feng, C., Wen, F. & Salam, A. (2016) *Optimal power flow of multiple energy carriers with multiple kinds of energy storage*. 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). Boston, MA, USA 17–21.7.2016. IEEE. ISBN 978-1-5090-4168-8 (sähköinen). (DOI: 10.1109/PESGM.2016.7741940).
- Niemi, R., Mikkola, J. & Lund, P. (2012) *Urban energy systems with smart multi-carrier energy networks and renewable energy generation*. Renewable Energy. [Verkkolehti]. Vol. 48. S. 524–536. [Viitattu 20.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.renene.2012.05.017.
- Niinikoski, J. (2018) *AMR-mittareiden nykytila ja kehitysmahdollisuudet pohjoismaissa*. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Lappeenranta. 31 s.
- Nissinen, J. (2019) *Menetelmä alueellisen hybridienergiaratkaisun analysointiin suunnittelu-prosessin alkuvaiheessa*. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo. 81 s.

- Nousiainen, K. (2017) *Smart Grid -sähkökeskus*. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Savonlinna. 27 s.
- Nouvel, R., Brassel, K-H., Bruse, M., Duminil, E., Coors, V., Eicker, U. & Robinson, D. (2015) *SimStadt, a New Workflow-Driven Urban Energy Simulation Platform for CityGML City Models*. CISBAT 2015. Lausanne, Switzerland 9–11.9.2015. EPFL Solar Energy and Building Physics Laboratory. S. 889–894. (URL: <https://www.researchgate.net/publication/312997307>).
- N'Tsoukpoe, K., Liu, H., Pierrès, N. & Luo, L. (2009) *A review on long-term sorption solar energy storage*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 13:9. S. 2385–2396. [Viitattu 27.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.rser.2009.05.008.
- Ohta, T. (1994) *Energy Technology: Sources, Systems and Frontier Conversion*. 1. painos. Great Britain: Pergamon. 234 s. ISBN 978-0-08-042132-2 (painettu) 978-00-8098-380-6 (sähköinen). (DOI: 10.1016/C2009-0-06879-2).
- Ommen, T., Markussen, W. & Elmegaard, B. (2016) *Lowering district heating temperatures – Impact to system performance in current and future Danish energy scenarios*. Energy. [Verkkolehti]. Vol. 94. S. 273–291. [Viitattu 29.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.energy.2015.10.063.
- Omu, A., Choudhary, R. & Boies, A. (2013) *Distributed energy resource system optimisation using mixed integer linear programming*. Energy Policy. [Verkkolehti]. Vol. 61. S. 249–266. [Viitattu 22.11.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.enpol.2013.05.009.
- OpenStudio.net. (2019) *OpenStudio*. Alliance for Sustainable Energy, LLC. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2.9.2019]. Saatavissa: <https://www.openstudio.net>.
- OptiWatti. (2019) *OptiWatin älyjärjestelmä ohjaa lämmitystä puolestasi*. OptiWatti. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 8.7.2019]. Saatavissa: <https://www.optiwatti.fi/mika-on-optiwatti/toimintaperiaate>.
- Orecchini, F. & Santiangeli, A. (2011) *Beyond smart grids – The need of intelligent energy networks for a higher global efficiency through energy vectors integration*. International Journal of Hydrogen Energy. [Verkkolehti]. Vol. 36. S. 8126–8133. [Viitattu 20.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.01.160.
- Orehounig, K., Evins, R., Dorer, V. & Carmeliet, J. (2014) *Assessment of renewable energy integration for a village using the energy hub concept*. Energy Procedia. [Verkkolehti]. Vol. 57. S. 940–949. [Viitattu 6.9.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.egypro.2014.10.076.
- Pahkala, T., Uimonen, H. & Väre, V. (2018) *Flexible and customer-centred electricity system – Final report of the Smart Grid Working Group*. Helsinki: Ministry of Economic Affairs and Employment. 44 s. (Publications of the Ministry of Economic Affairs and Employment 39/2018). ISBN 978-952-327-352-8 (pdf). Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-352-8>.

- Palonen, M., Hamdy, M. & Hasan, A. (2013) *MOBO A New Software for Multi-Objective Building Performance Optimization*. Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association. Chambéry, France 26–28.8.2013. IBPSA. S. 2567–2574. (URL: [http://www.ibpsa.org/proceedings/bs2013/p\\_1489.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/bs2013/p_1489.pdf)).
- Pasanen, P., Bruce, T. & Sipari, A. (2013) *Kaukolämmön CO<sub>2</sub>-päästöjen laskentamenetelmät päätöksenteon työkaluina*. Energiateollisuus ry, Bionova Consulting. 44 s. Saatavissa: [https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/kaukolammon\\_co2-paastojen\\_laskentamenetelmät\\_paatoksenteon\\_tyokaluina\\_-\\_bionova\\_2013.html](https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/kaukolammon_co2-paastojen_laskentamenetelmät_paatoksenteon_tyokaluina_-_bionova_2013.html).
- Perez, K., Cetin, K., Baldea, M. & Edgar, T. (2017) *Development and analysis of residential change-point models from smart meter data*. Energy and Buildings. [Verkkolehti]. Vol. 139. S. 351–359. [Viitattu 8.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.12.084.
- Perez, R., Jansen, P. & Martins, J. (2012) *pyOpt: a Python-based object-oriented framework for nonlinear constrained optimization*. Structural Multidisciplinary Optimization. [Verkkolehti]. Vol. 45. S. 101–118. [Viitattu 12.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1007/s00158-011-0666-3.
- Pfenninger, S., Hirth, L., Schlecht, I., Schmid, E., Wiese, F., Brown, T., Davis, C., Gidden, M., Heinrichs, H., Heuberger, C., Hilpert, S., Krien, U., Matke, C., Nebel, A., Morrison, R., Müller, B., Pleßmann, G., Reeg, M., Richstein, J., Shivakumar, A., Staffel, I., Tröndle, T. & Wingenbach, C. (2018) *Opening the black box of energy modelling: Strategies and lessons learned*. Energy Strategy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 19. S. 63–71. [Viitattu 1.10.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.esr.2017.12.002.
- Pickering, B. & Choudhary, R. (2019) *District energy system optimisation under uncertain demand: Handling data-driven stochastic profiles*. Applied Energy. [Verkkolehti]. Vol. 236. S. 1138–1157. [Viitattu 15.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.12.037.
- Pikk, P. & Viiding, M. (2013) *The dangers of marginal cost based electricity pricing*. Baltic Journal of Economics. [Verkkolehti]. Vol. 13:1. S. 49–62. [Viitattu 29.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1080/1406099X.2013.10840525.
- Pinel, P., Cruickshank, C., Beausoleil-Morrison, I. & Wills, A. (2011) *A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 15:7. S. 3341–3359. [Viitattu 26.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.rser.2011.04.013.
- Polly, B., Kutscher, C., Macumber, D., Schott, M., Pless, S., Livingood, B. & Van Geet, O. (2016) *From Zero Energy Buildings to Zero Energy Districts*. American Council for an Energy Efficient Economy - 2016 Buildings Summer Study. Pacific Grove, CA, USA 21–26.8.2016. ACEEE. S. 10-1–10-16. (URL: <https://www.researchgate.net/publication/307955877>).
- Prasanna, A., Dorer, V. & Vetterli, N. (2017) *Optimisation of a district energy system with a low temperature network*. Energy. [Verkkolehti]. Vol. 137. S. 632–648. [Viitattu 15.11.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.energy.2017.03.137.

- Prina, M., Cozzini, M., Garegnani, G., Manzolini, G., Moser, D., Oberegger, U., Perneti, R., Vaccaro, R. & Sparber, W. (2018) *Multi-objective optimization algorithm coupled to EnergyPLAN software: The EPLANopt model*. Energy. [Verkkolehti]. Vol. 149. S. 213–221. [Viitattu 20.10.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.energy.2018.02.050.
- Pöyry & Fingrid. (2014) *Sähkön kysyntäjoustopotentiaalin kartoitus Suomessa*. Fingrid Oyj. 20 s. Saatavissa: [https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/fingrid\\_julkinen\\_raportti\\_kysyntajousto\\_16062014.pdf](https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/fingrid_julkinen_raportti_kysyntajousto_16062014.pdf).
- Rafieian, M., Rad, H., Sharifi, A. (2014) *The Necessity of using Sky View Factor in Urban Planning: a Case Study of Narmak Neighborhood, Tehran*. International Conference and Utility Exhibition 2014 on Green Energy for Sustainable Development. Pattaya City, Thailand 19–21.3.2014. ICUE. (URL: <https://www.researchgate.net/publication/263248360>).
- Reinhart, C., Dogan, T., Jakubiec, A., Rakha, T. & Sang, A. (2013) *umi - An Urban Simulation Environment For Building Energy Use, Daylighting And Walkability*. Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association. Chambéry, France 26–28.8.2013. IBPSA. S. 476–483. (URL: <https://www.researchgate.net/publication/264352980>).
- Reinisch, C., Kofler, M., Iglesias, F. & Kastner, W. (2011) *ThinkHome Energy Efficiency in Future Smart Homes*. EURASIP Journal on Embedded Systems. [Verkkolehti]. Vol. 2011. S. 1–18. [Viitattu 8.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1155/2011/104617.
- Rekilä, H. (2019) *Parametrien tunnistus ja datajoukon sovittaminen optimoinnin avulla Potkuohjelmassa*. Pro gradu -tutkielma. Jyväskylän yliopisto. Jyväskylä. 90 s.
- Remmen, P., Lauster, M., Mans, M., Fuchs, M., Osterhage, T. & Müller, D. (2018) *TEASER: an open tool for urban energy modelling of building stocks*. Journal of Building Performance Simulation. [Verkkolehti]. Vol. 11:1. S. 84–98. [Viitattu 16.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1080/19401493.2017.1283539.
- Reynolds, J., Rezgui, Y. & Hippolyte, J. (2017) *Upscaling energy control from building to districts: Current limitations and future perspectives*. Sustainable Cities and Society. [Verkkolehti]. Vol. 35. S. 816–829. [Viitattu 17.9.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.scs.2017.05.012.
- Richardson, I., Thomson, M. & Infield, D. (2008) *A high-resolution domestic building occupancy model for energy demand simulations*. Energy and Buildings. [Verkkolehti]. Vol. 40:8. S. 1560–1566. [Viitattu 19.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.02.006.
- Richardson, I., Thomson, M., Infield, D. & Clifford, C. (2010) *Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model*. Energy & Buildings. [Verkkolehti]. Vol. 42:10. S. 1878–1887. [Viitattu 26.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.02.006.
- Riesz, J. & Milligan, M. (2015) *Designing electricity markets for a high penetration of variable renewables*. WIREs Energy and Environment. [Verkkolehti]. Vol. 4. S. 279–289. [Viitattu 29.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1002/wene.137.

- Rinne, S., Auvinen, K., Reda, F., Ruggiero, S. & Temmes, A. (2018) *Clean district heating – how can it work?*. Smart Energy Transition project. Academy of Finland's Strategic Research Council. 31 s. Saatavissa: [http://smartenergytransition.fi/wp-content/uploads/2019/04/Clean-DHC-discussion-paper\\_SET\\_2018.pdf](http://smartenergytransition.fi/wp-content/uploads/2019/04/Clean-DHC-discussion-paper_SET_2018.pdf).
- Rizwan, M., Dennis, L. & Liu, C. (2008) *A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island*. Journal of Environmental Sciences. [Verkkolehti]. Vol. 20:1. S. 120–128. [Viitattu 12.9.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/S1001-0742(08)60019-4.
- Robinson, D., Haldi, F., Kämpf, J., Leroux, P., Perez, D., Rasheed, A. & Wilke, U. (2009) *CitySim: Comprehensive Micro-Simulation of Resource Flows for Sustainable Urban Planning*. Eleventh International IBPSA Conference. Glasgow, Scotland 27–30.7.2009. IBPSA. S. 1083–1090. (URL: <https://www.researchgate.net/publication/43652081>).
- Romankiewicz, J., Qu, M., Marnay, C., Zhou, N. (2013) *International Microgrid Assessment: Governance, Incentives, and Experience (IMAGINE)*. 2. painos. USA: China Energy Group, Environmental Energy Technologies Division & Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. 21 s. (LBNL-6159E). Saatavissa: <http://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/imagine-eceee.pdf>.
- Rosberg, E. (toim.) (2019) *Lahden kestävän energian ja ilmastonmuutoksen toimenpidesuunnitelma vuoteen 2030 (SECAP 2019-2030)*. Lahden kaupunki. 34 s. Saatavissa: <https://www.lahti.fi/palvelut/luonto-ja-ymparisto/lahti-ymparistokaupunki/ilmasto>.
- Ruggiero, S., Varho, V. & Rikkinen, P. (2015) *Transition to distributed energy generation in Finland: Prospects and barriers*. Energy Policy. [Verkkolehti]. Vol. 86. S. 433–443. [Viitattu 29.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.enpol.2015.07.024.
- Saffari, M., Misaghian, M., Kia, M., Heidari, A., Zhang, D., Dehghanian, P. & Aghaei, J. (2019) *Stochastic robust optimization for smart grid considering various arbitrage opportunities*. Electric Power Systems Research. [Verkkolehti]. Vol. 174. S. 1–14. [Viitattu 15.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.epsr.2019.04.025.
- Salameh, Z. (2014) *Renewable Energy System Design*. Cambridge, MA, USA: Academic Press. 404 s. ISBN 978-012-37-4991-8 (painettu) 978-008-09-6167-5 (sähköinen).
- Samarasinghe, G., Lagisz, M., Santamouris, M., Yenneti, K., Upadhyay, A., Suarez, F., Taunk, B. & Nakagawa, S. (2019) *A visualized overview of systematic reviews and meta-analyses on low-carbon built environments: An evidence review map*. Solar Energy. [Verkkolehti]. Vol. 186. S. 291–299. [Viitattu 7.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.solener.2019.04.062.
- Santamouris, M., Ding, L., Fiorito, F., Oldfield, P., Osmond, P., Paolini, R., Prasad, D. & Synnefa, A. (2017) *Passive and active cooling for the outdoor built environment – Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects*. Solar Energy. [Verkkolehti]. Vol. 154. S. 14–33. [Viitattu 16.9.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.solener.2016.12.006.

- Scheller, F. & Bruckner, T. (2019) *Energy system optimization at the municipal level: An analysis of modeling approaches and challenges*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 105. S. 444–461. [Viitattu 10.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.rser.2019.02.005.
- Schiefelbein, J., Rudnick, J., Scholl, A., Remmen, P., Fuchs, M. & Müller, D. (2019) *Automated urban energy system modeling and thermal building simulation based on OpenStreetMap data sets*. Building and Environment. [Verkkolehti]. Vol. 149. S. 630–639. [Viitattu 16.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.12.025.
- Shi, Z., Fonseca, J. & Schlueter, A. (2017) *A review of simulation-based urban form generation and optimization for energy-driven urban design*. Building and Environment. [Verkkolehti]. Vol. 121. S. 119–129. [Viitattu 6.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.05.006.
- Siemens. (2019) *Älykoti, jossa on Siemens-kodinkoneet ja Home Connect -sovellus*. Siemens. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 8.7.2019]. Saatavissa: <https://www.siemens-home.bsh-group.com/fi/kodinkoneet/home-connect-verkkoon-yhdistettavat-kodinkoneet>.
- Sirén, K. (2016) *A Short Introduction to Building Energy Optimization*. Aalto University. 39 s.
- Socaciu, L. (2012) *Seasonal thermal energy storage concepts*. Acta Technica Napocensis: Applied Mathematics, Mechanics and Engineering. [Verkkolehti]. Vol. 55:4. S. 775–784. [Viitattu 26.7.2019]. Saatavissa: URL: <https://www.researchgate.net/publication/272179312>.
- Sodiq, A., Baloch, A., Khan, S., Sezer, N., Mahmoud, S., Jama, M. & Abdelaal, A. (2019) *Towards modern sustainable cities: Review of sustainability principles and trends*. Journal of Cleaner Production. [Verkkolehti]. Vol. 227. S. 972–1001. [Viitattu 19.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.106.
- Sola, A., Corchero, C., Salom, J. & Sanmarti, M. (2018) *Simulation Tools to Build Urban-Scale Energy Models: A Review*. Energies. [Verkkolehti]. Vol. 11:3269. S. 1–24. [Viitattu 16.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.3390/en11123269.
- Stadler, M., Groissböck, M., Cardoso, G. & Marnay, C. (2014) *Optimizing Distributed Energy Resources and building retrofits with the strategic DER-CAModel*. Applied Energy. [Verkkolehti]. Vol. 132. S. 557–567. [Viitattu 19.10.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.07.041.
- Steinbrink, C., Lehnhoff, S., Rohjans, S., Strasser, T., Widl, E., Moyo, C., Lauss, G., Lehfuss, F., Faschang, M., Palensky, P., van der Meer A., Heussen, K., Gehrke, O., Guillo-Sansano, E., Syed, M., Emhemed, A., Brandl, R., Nquyen, V., Khavari, A., Tran, Q., Kotsampopoulos, P., Hatziaargyriou, N., Akroud, N., Rikos, E. & Degefa, M. (2017) *Simulation-Based Validation of Smart Grids – Status Quo and Future Research Trends*. Teoksessa: Mařík, V. (toim.), Wahlster, W. (toim.), Strasser, T. (toim.), Kadera, P (toim.). HoloMAS 2017: Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems. Lyon, France 28–30.8.2017. Cham, Switzerland. Springer International Publishing. S. 171–185. ISBN 978-



- 3-319-64634-3 (painettu) 978-3-319-64635-0 (sähköinen). (DOI: 10.1007/978-3-319-64635-0\_13).
- Sternberg, A. & Bardow, A. (2015) *Power-to-What? – Environmental assessment of energy storage systems*. Energy & Environmental Science. [Verkkolehti]. Vol. 8:2. S. 389–400. [Viitattu 25.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1039/c4ee03051f.
- Steuer, R. (1986) *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application*. Reprint Edition 1989 with corrections. Malabar, FL 32950, USA: Robert E. Krieger Publishing Company, INC. 546 s. ISBN 0-89464-393-2.
- Takahashi, K., Baker, S. & Kurdgelashvili, L. (2005) *Policy options to support distributed resources – A report to Conectiv Power Delivery*. Newark, DE, USA: University of Delaware. 85 s. Saatavissa: <https://www.academia.edu/26404578>.
- Talebi, B., Mirzaei, P., Bastani, A. & Haghghat, F. (2016) *A Review of District Heating Systems: Modeling and Optimization*. Frontiers in Built Environment. [Verkkolehti]. Vol. 2. S. 1–14. [Viitattu 27.11.2019]. Saatavissa: DOI: 10.3389/fbuil.2016.00022.
- Tampereen kaupunkiseutu. (2010) *Tampereen kaupunkiseudun ilmastostrategia 2030*. Tampere: Tampereen kaupunkiseutu. 89 s. Saatavissa: [http://www.orivesi.fi/files/Tiedostot/Tampereen\\_seudun\\_ilmastostrategia.pdf](http://www.orivesi.fi/files/Tiedostot/Tampereen_seudun_ilmastostrategia.pdf).
- Tang, J., Wang, D., Fung, Y. & Yung K. (2004) *Understanding of fuzzy optimization: Theories and methods*. Journal of Systems Science and Complexity. [Verkkolehti]. Vol. 12:1. S. 117–136. [Viitattu 15.6.2019]. Saatavissa: URL: <http://hdl.handle.net/10397/24759>.
- Theo, W., Lim, J., Ho, W., Hashim, H. & Lee, C. (2017) *Review of distributed generation (DG) system planning and optimisation techniques: Comparison of numerical and mathematical modelling methods*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 67. S. 531–573. [Viitattu 26.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.063.
- THL. (2019) *Legionellabakteerit vesijärjestelmissä*. Terveystieteiden tutkimuskeskus (THL). [Verkkokooste]. [Viitattu 30.7.2019]. Saatavissa: <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/vesi/legionellabakteerit-vesijarjestelmissa>.
- Tian, Z., Zhang, S., Deng, J., Fan, J., Huang, J., Kong, W., Perers, B. & Furbo, S. (2019) *Large-scale solar district heating plants in Danish smart thermal grid: Developments and recent trends*. Energy Conversion and Management. [Verkkolehti]. Vol. 189. S. 67–80. [Viitattu 1.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.enconman.2019.03.071.
- Tian, Z., Chen, W., Tang, P., Wang, J. & Shi, X. (2015) *Building Energy Optimization Tools and Their Applicability in Architectural Conceptual Design Stage*. Energy Procedia. [Verkkolehti]. Vol. 78. S. 2572–2577. [Viitattu 24.9.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.288.
- Tiedemann, K. (2007) *Using conditional demand analysis to estimate residential energy use and energy savings*. Proceedings of ecee 2007. Summer study. Saving Energy - just do it!. La Colle sur Loup, France, 4–9.6.2007. eceee. Panel 6: Products and appliances. S. 1279–

1283. ISBN 978-91-633-0899-4. (URL: [https://www.eceee.org/library/conference\\_proceedings/eceee\\_Summer\\_Studies/2007/Panel\\_6/6.288/](https://www.eceee.org/library/conference_proceedings/eceee_Summer_Studies/2007/Panel_6/6.288/)).
- Tuominen, P., Stenlund, O., Marguerite, C., Pardogarcia, N., Grahn, E., Huvilinna, J. & Iglar, B. (2017) *CITYOPT planning tool for energy efficient cities*. International Journal of Sustainable Development and Planning. [Verkkolehti]. Vol. 12:3. S. 570–579. [Viitattu 2.9.2019]. Saatavissa: DOI: 10.2495/SDP-V12-N3-570-579.
- UNDP. (2019) *Sustainable Development Goals*. UNDP. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 26.6.2019]. Saatavissa: <https://www.undp.org/content/undp/en/home/sustainable-development-goals.html>.
- Unruh, G. (2000) *Understanding carbon lock-in*. Energy Policy. [Verkkolehti]. Vol. 28:12. S. 817–830. [Viitattu 17.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/S0301-4215(00)00070-7.
- Valtioneuvosto. (2019) *Pääministeri Antti Rinteen hallituksen ohjelma 6.6.2019: Osallistava ja osaava Suomi – sosiaalisesti, taloudellisesti ja ekologisesti kestävä yhteiskunta*. Helsinki: Valtioneuvoston hallintoyksikkö, Julkaisutuotanto. 211 s. (Valtioneuvoston julkaisuja 2019:23). ISBN 978-952-287-755-0 (painettu) 978-952-287-756-7 (pdf). Saatavissa: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161662>.
- Verbong, G. & Geels, F. (2007) *The ongoing energy transition: Lessons from a socio-technical, multi-level analysis of the Dutch electricity system (1960–2004)*. Energy Policy. [Verkkolehti]. Vol. 35:2. S. 1025–1037. [Viitattu 7.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.enpol.2006.02.010.
- Viholainen, J., Luoranen, M., Väisänen, S., Niskanen, A., Horttanainen, M. & Risto, S. (2016) *Regional level approach for increasing energy efficiency*. Applied Energy. [Verkkolehti]. Vol. 163. S. 295–303. [Viitattu 4.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.101.
- Virote, J. & Neves-Silva, R. (2012) *Stochastic models for building energy prediction based on occupant behavior assessment*. Energy and Buildings. [Verkkolehti]. Vol. 53. S. 183–193. [Viitattu 19.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.06.001.
- Voll, P., Lampe, M., Wrobel, G. & Bardow, A. (2012) *Superstructure-free synthesis and optimization of distributed industrial energy supply systems*. Energy. [Verkkolehti]. Vol. 45:1. S. 424–435. [Viitattu 15.11.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.energy.2012.01.041.
- Waibel, C., Evins, R. & Carmeliet, J. (2019) *Co-simulation and optimization of building geometry and multi-energy systems: Interdependencies in energy supply, energy demand and solar potentials*. Applied Energy. [Verkkolehti]. Vol. 242. S. 1661–1682. [Viitattu 15.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.03.177.
- Walter, E. & Kämpf, J. (2015) *A verification of CitySim results using the BESTEST and monitored consumption values*. Teoksessa: Baratieri, M. (toim.), Corrado, V. (toim.), Gasparella, A. (toim.), Patuzzi, F. (toim.). Proceedings of the 2nd Building Simulation Applications conference. Bozen-Bolzano, Italy 4–6.2.2015. Bozen-Bolzano, Italy. Bozen-Bolzano

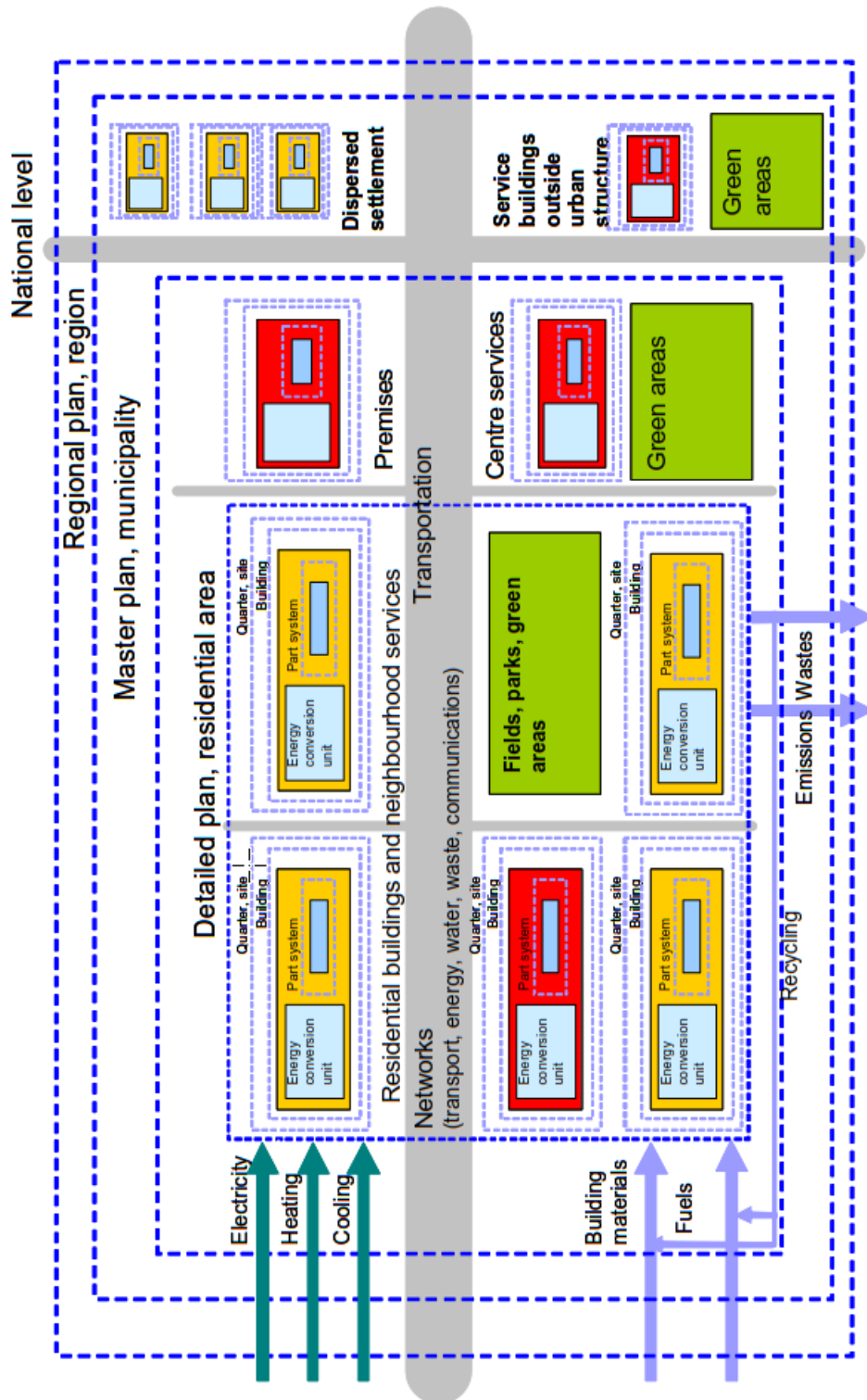
- University Press. S. 215–222. ISBN 978-88-6046-074-5. (URL: <https://infoscience.epfl.ch/record/214754>).
- Weber, C., Maréchal, F. & Favrat, D. (2007) *Design and optimization of district energy systems*. Computer Aided Chemical Engineering. [Verkkolehti]. Vol. 24. S. 1127–1132. [Viitattu 15.6.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/S1570-7946(07)80212-4.
- Weiler, V., Stave, J. & Eicker, U. (2019) *Renewable Energy Generation Scenarios Using 3D Urban Modeling Tools – Methodology for Heat Pump and Co-Generation Systems with Case Study Application*. Energies. [Verkkolehti]. Vol. 12:3. S. 1–19. [Viitattu 5.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.3390/en12030403.
- Wenliang, L., Zhou, Y., Cetin, K., Eom, J., Wang, Y., Chen, G. & Zhang, X. (2017) *Modeling urban building energy use: A review of modeling approaches and procedures*. Energy. [Verkkolehti]. Vol. 141. S. 2445–2457. [Viitattu 4.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.energy.2017.11.071.
- Wu, R., Mavromatidis, G., Orehounig, K. & Carmeliet, J. (2017) *Multiobjective optimisation of energy systems and building envelope retrofit in a residential community*. Applied Energy. [Verkkolehti]. Vol. 190. S. 634–649. [Viitattu 12.11.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.12.161.
- Yang, X., Li, H. & Svendsen, S. (2016) *Modelling and multi-scenario analysis for electric heat tracing system combined with low temperature district heating for domestic hot water supply*. Building Simulation. [Verkkolehti]. Vol. 9:2. S. 141–151. [Viitattu 30.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1007/s12273-015-0261-4.
- Yang, X., Li, Y., Luo, Z. & Chan, P. (2017) *The urban cool island phenomenon in a high-rise high-density city and its mechanisms*. International Journal of Climatology. [Verkkolehti]. Vol. 37:2. S. 890–904. [Viitattu 15.9.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1002/joc.4747.
- Zeng, L., Lu, J., Li, W. & Li, Y. (2018) *A fast approach for large-scale Sky View Factor estimation using street view images*. Building and Environment. [Verkkolehti]. Vol. 135. S. 74–84. [Viitattu 15.9.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.03.009.
- Zheng, Z., Chen, J. & Luo, X. (2019) *Parallel computational building-chain model for rapid urban-scale energy simulation*. Energy & Buildings. [Verkkolehti]. Vol. 201. S. 37–52. [Viitattu 13.8.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.07.034.
- Østergaard, P. (2015) *Reviewing EnergyPLAN simulations and performance indicator applications in EnergyPLAN simulations*. Applied Energy. [Verkkolehti]. Vol. 154. S. 921–933. [Viitattu 6.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.05.086.
- Østergaard, P. & Andersen, A. (2016) *Booster heat pumps and central heat pumps in district heating*. Applied Energy. [Verkkolehti]. Vol. 184. S. 1374–1388. [Viitattu 29.7.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.144.

Østergaard, P., Jantzen, J., Marcinkowski, H. & Kristensen, M. (2019) *Business and socio-economic assessment of introducing heat pumps with heat storage in small-scale district heating systems*. *Renewable Energy*. [Verkkolehti]. Vol. 139. S. 904–914. [Viitattu 4.11.2019]. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.renene.2019.02.140.

## Liiteluettelo

- Liite 1** Alueellisen energiasuunnittelun taserajat kaavoituksen näkökulmasta  
Lähde: Forsström ym. (2011)
- Liite 2** Arkkityyppimenetelmän tyypillinen prosessi  
Lähde: muokattu: Heiple (2007)
- Liite 3** Alueellinen energiasuunnittelu osana kunnallista päätöksentekoprosessia  
Lähde: Viholainen ym. (2016)
- Liite 4** Energiatohokkaan aluesuunnittelun näkökulmia ja laskennallinen viitekehys  
Lähde: Hedman (2016)
- Liite 5** Alueellisen energiaoptimoinnin tyypillinen tavoitteenasettelu ja rajoitteet  
Lähde: Hassan ym. (2018)
- Liite 6** Energy Hub -konsepti  
Lähde: Mohammadi ym. (2017)

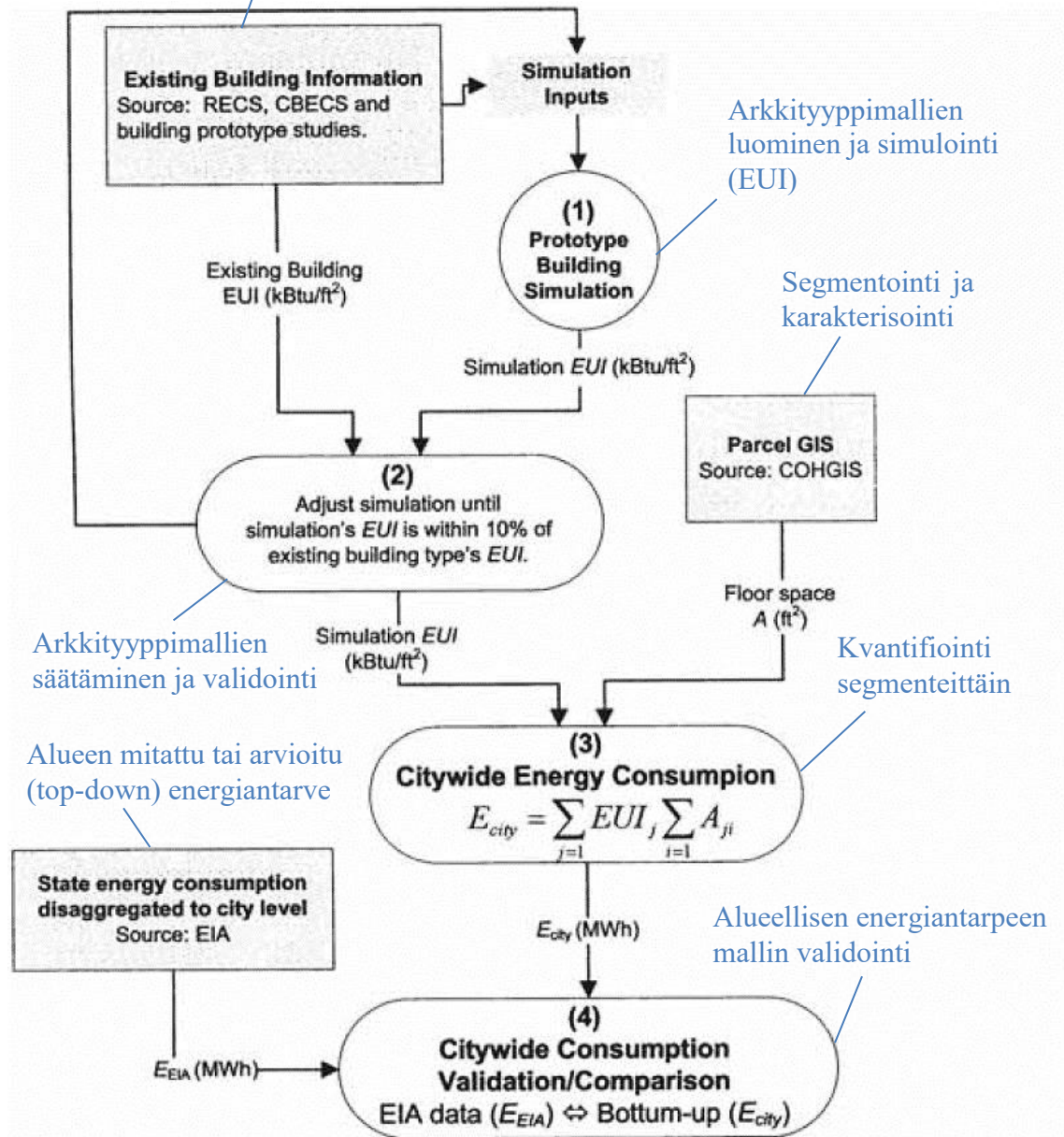
# Liite 1. Alueellisen energiasuunnittelun taserajat kaa-voituksen näkökulmasta



System boundaries for measuring energy efficiency of communities.

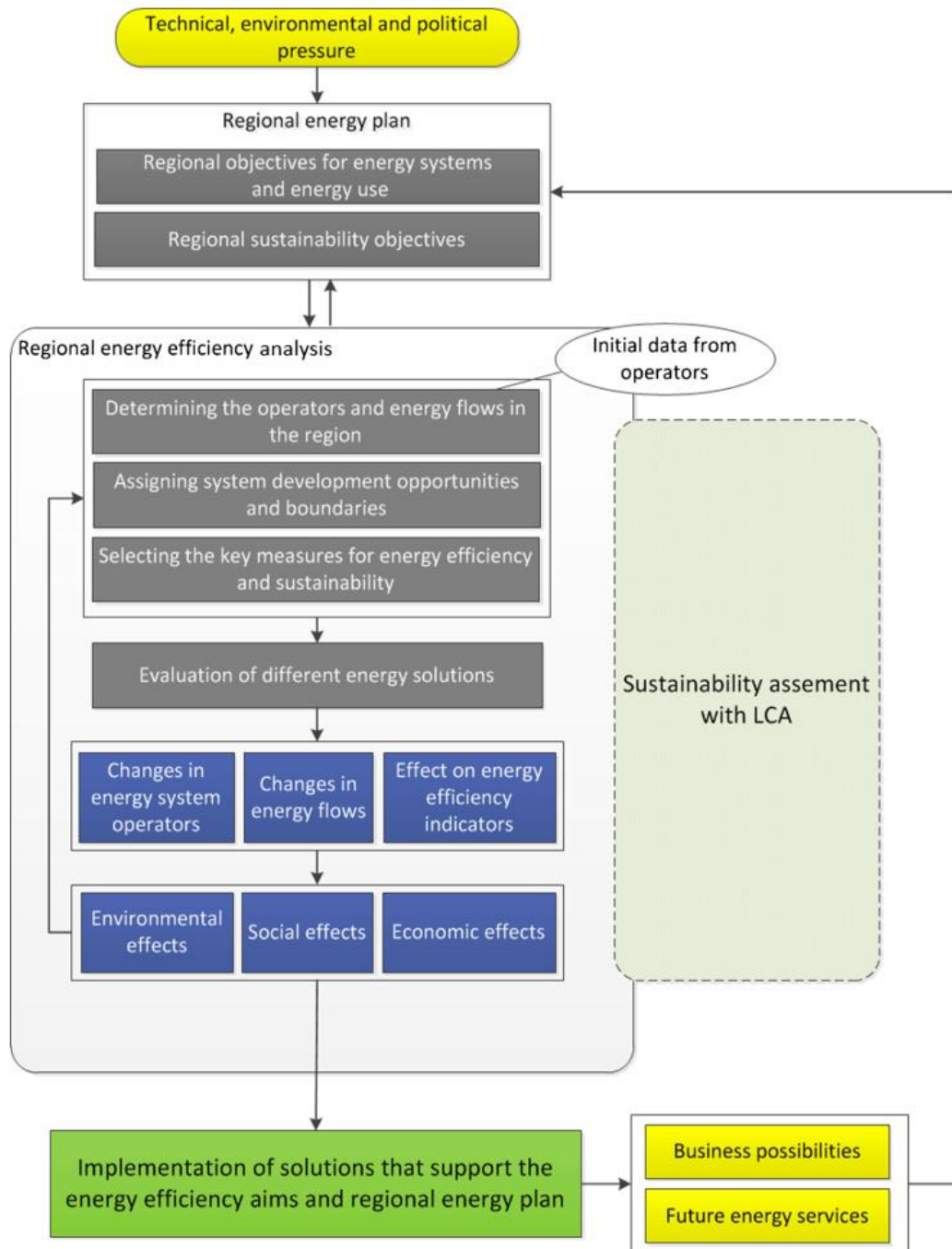
## Liite 2. Arkkityyppimenetelmän tyypillinen prosessi

Arkkityyppimalleja vastaavista olemassa olevista rakennuksista mitatut energiantarveprofiilit (EUI) ja korjausrakentamisen yhteydessä myös olemassa olevan rakennuskannan lähtötiedot



Block diagram of building simulation and validation steps. Rectangular blocks represent information sources and curved blocks represent processes.

### Liite 3. Alueellinen energiasuunnittelu osana kunnallista päätöksentekoprosessia

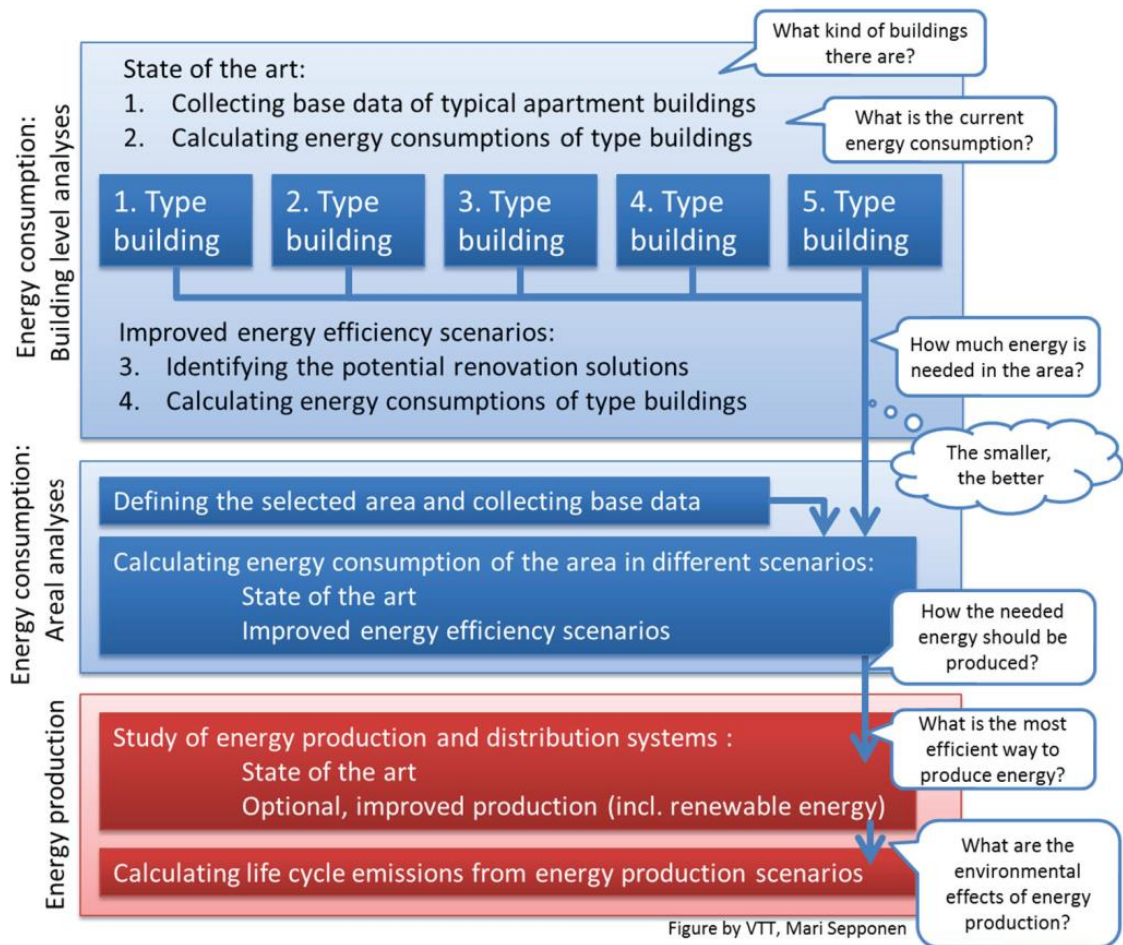


An example of including regional energy efficiency analysis in local decision-making process.



## Liite 4. Energiatehokkaan aluesuunnittelun näkökulmia ja laskennallinen viitekehys

| Topic   | Main findings  |
|---|--|
| <p><b>Questionnaire and residents survey</b></p>  | <p>City planning professionals experience a lack of knowhow about energy-efficiency and renewable energy systems. Supportive tools and guidelines are needed.</p> <p>Green areas are valued and safety is considered a problem. Residents in St Petersburg, Russia don't value renewable energy very highly and are not willing to invest in that. In order to push renewable energy and energy efficiency other than voluntary market based action is needed.</p> |
| <p><b>Detailed energy system analysis</b></p>   | <p>Heat trading could be a functional way to develop decentralised energy systems. There is a potential advantage to be utilised when buildings with consumption profiles different in shape and/or timing, are connected through a district heating network. Holistic approach to energy system planning is needed to achieve these benefits.</p>   |
| <p><b>Energy efficiency rating of districts</b></p>   | <p>Energy efficiency of districts can be improved by changes made in the detailed city plan. The assessment tool developed helps the city planners improve the energy efficiency.</p>  |
| <p><b>District level energy efficiency analysis</b></p> <p><b>District level energy system analyses</b></p> | <p>To achieve a universally efficient energy solution, the entire energy chain needs to be analysed and improvements made bearing in mind the whole energy chain.</p>  |
| <p><b>Concept for ecological city planning</b></p>  | <p>Concept can be based on general global concepts but have to always be localised. Analysis of energy systems is a key factor in order to find the best solutions for an ecological district.</p>   |



Methodology for district level Energy analysis (Article III).

## Liite 5. Alueellisen energiaoptimoinnin tyypillinen tavoitteenasettelu ja rajoitteet

**MINIMIZE**

***Annual energy cost:***

- energy purchase cost
- + amortized DER technology capital cost
- + annual O&M cost

**SUBJECT TO**

***Energy balance:***

- Energy purchased + energy generated exceeds demand

***Operational constraints:***

- Generators, chillers, etc. must operate within installed limits
- Heat recovered is limited by generated waste heat

***Regulatory constraints:***

- Minimum efficiency requirements
- Maximum emission limits

***Investment constraints:***

- Payback period is constrained

***Storage constraints:***

- Electricity stored is limited by battery size
- Heat storage is limited by reservoir size

High-level optimisation formulation illustration in DER-CAM

## Liite 6. Energy Hub -konsepti

