

Lauri Rajamäki

# Rakennuksen mitattavuuden parantaminen ja energiatehokas ohjaus kiinteistöstä saatavan tiedon avulla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

14.3.2018

Tekijä Otsikko	Lauri Rajamäki Rakennuksen mitattavuuden parantaminen ja energiatehokas ohjaus kiinteistöstä saatavan tiedon avulla
Sivumäärä Aika	70 sivua 14.3.2018
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Ammatillinen pääaine	LVI-suunnittelu
Ohjaaja	yliopettaja Jukka Yrjölä
<p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää kirjallisuuskatsauksen avulla, miten rakennusautomaatiota ja siihen liitettyjä sekä erillään olevia mittauksia voidaan hyödyntää rakennusten energiatehokkuuden parantamisessa, seurannassa, ennustettavuudessa sekä tehtyjen energiatehokkuustoimenpiteiden vaikutusten mitattavuudessa. Lisäksi työssä käsitellään toimivan, energiatehokkaan rakennuksen ja hyvien sisäolosuhteiden riippuvuutta toisistaan.</p> <p>Työn alkuosassa luodaan katsaus energiatehokkuutta ohjaaviin lakeihin, asetuksiin ja standardeihin sekä energiatehokkuuden merkitykseen kiinteistöjen arvonmuodostumisessa. Kirjallisuuskatsauksen keskeisenä osana on rakennusautomaatio, sen perusrakenne ja -toiminnot sekä merkitys rakennuksen energiatehokkaassa ohjauksessa. Työn loppuosassa perehdytään rakennuksen tarkennettuun mittarointiin ja sen tuomiin etuihin sekä rakennusautomaation tulevaisuuteen ja automaation rooliin tulevaisuuden älykaupungeissa.</p> <p>Työn perusteella voidaan todeta, että rakennusautomaation merkitys rakennusten energiatehokkuuden parantamisessa sekä sen kokonaisvaltaisessa seurannassa ja ylläpidossa tulee olemaan entistä keskeisemmässä roolissa. Lisäksi digitalisaatio ja sen myötä uudet teknologiat tulevat vahvasti muokkaamaan ja viemään niin rakennusautomaatiojärjestelmiä kuin niistä erillään olevia älykkäitä sovelluksia sekä mahdollisesti koko rakennusalaan isoin harppauksin eteenpäin.</p>	
Avainsanat	rakennusautomaatio, energiatehokkuus, mitattavuus, huipputeho, IoT, Big Data, automaatio

Author Title	Lauri Rajamäki Use of Building Data to Improve Measurability and Energy Efficient Control of Buildings
Number of Pages Date	70 pages 14 March 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Specialisation option	HVAC Engineering, Design orientation
Instructor	Jukka Yrjölä, Principal Lecturer
<p>The goal of the final year project was to establish, through a literature review, how to use building automation and building automation measurements to improve, monitor and predict the energy efficiency of a building. In addition, the project looked at the interdependency of good indoor conditions and a well-functioning, energy-efficient building.</p> <p>The laws, regulations and standards governing energy efficiency were studied, and the importance of energy efficiency in the estimation of the value of a building looked into. Furthermore, the structure, operations and role of building automation in the control of a building's energy efficiency were explored. In addition, the benefits of detailed metering, the future of building automation, and the role of automation in future smart cities were discussed.</p> <p>In conclusion, the role of building automation in both improving the energy efficiency and monitoring and maintenance of buildings will play an increasingly important role. In addition, digitalization and new technologies will strongly modify and develop building automation systems and intelligent applications, possible taking the construction industry to a whole new level.</p>	
Keywords	building automation, energy efficiency, measurability, peak-power demand, IoT, Big Data, automation

## Sisällys

1	Johdanto, tavoitteet ja rajaus	1
2	Energiatehokkuuden normiohjaus ja vaikutus kiinteistöjen arvoon	5
2.1	Yleiseurooppalainen rakennusten energiatehokkuusdirektiivi EPBD	5
2.2	Kansalliset lait ja asetuksen energiatehokkuuden parantamiseksi	7
2.3	Energiatehokkuuden merkitys kiinteistöjen arvonmuodostuksessa	9
3	Rakennusautomaatio rakennuksen energiatehokkaassa ohjauksessa	12
3.1	Rakennusautomaation perusrakenne, kaaviohierarkia ja elinkaari	12
3.2	Rakennusautomaation perustoiminnot ja niiden hyödyntäminen: hälytykset ja aikaohjaukset	15
3.3	Rakennusautomaation perustoiminnot ja niiden hyödyntäminen: mittaus- ja seurantaraportit sekä kulutus- ja energiaseuranta	17
3.4	Rakennusautomaation laatu ja haasteet kiinteistön ylläpidossa	19
3.5	Rakennusautomaation merkitys rakennuksen energiatehokkuuteen	21
4	Rakennusautomaation säätö- ja mittalaitteet sekä ohjelmalliset ominaisuudet	24
4.1	Säätöjärjestelmän perusrakenne ja säädön porrastus	24
4.2	Säätöpiirien toiminnan seuranta ja viritys sekä adaptiivinen ja itsevirittyvä säädin	26
4.3	Mittalaitteet ja niiden langaton ohjaus	29
4.4	Rakennusautomaation ohjelmallisten ominaisuuksien tehokas hyödyntäminen	31
5	Rakennuksen mittarointi ja siitä saadun tiedon analysointi	34
5.1	Rakennuksen tarkennettu mittarointi	34
5.2	Mittaroinnista saadun tiedon hyödyntäminen	35
5.3	Olosuhteiden seuranta osana mittarointi	37
5.4	Haasteet rakennuksen energiatehokkuuden arvioinnissa	38
6	Rakennusautomaatio 2.0	41
6.1	Huipputehon leikkaus	41
6.2	IoT- ja LP-WAN-teknologiat	44
6.3	Big Data	47
6.4	Uusien teknologioiden yhteensovittaminen sekä niiden hyödyntäminen	51
6.5	Uusien teknologioiden hyödyntäminen käytännössä	54

6.6	Tulevaisuuden visioita	59
7	Yhteenveto	62
	Lähteet	64

## 1 Johdanto, tavoitteet ja rajaus

Lähes kaikkia maailman maita koskevan, Pariisissa 12.12.2015 tehdyn ilmastopöytäkirjan mukaan maapallon keskilämpötilan nousu tulisi rajoittaa alle 2 °C:seen. Kokouksessa sovittiin myös kunnianhimoisesta pyrkimyksestä toimiin, joiden avulla lämpeneminen voitaisiin rajata alle 1,5 °C:n. Vuotta Pariisin kokousta aiemmin, vuonna 2014 EU-maat päättivät omien päästövähennyksien kokonaistavoitteeksi laskea päästöjä vähintään 40 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä. [1, s. 1.] Lupauksista huolimatta hiilidioksidin määrä ilmakehässä on kasvanut ennätystahtiin. Maailman ilmatieteen järjestön WMO:n mukaan hiilidioksidipitoisuudet ovat nyt saman suuruiset kuin 3–5 miljoonaa vuotta sitten, jolloin merenpinta oli noin 20 metriä nykyistä tasoa korkeammalla.

”Ilman nopeita leikkauksia lämpötilat nousevat vuosisadan loppuun mennessä vaarallisiin lukemiin, paljon Pariisin ilmastopöytäkirjan tavoitteita korkeammiksi”

sanoo WMO:n pääsihteeri Petteri Taalas järjestön tiedotteessa. [2]

Euroopassa rakennuksissa käytetään yli 40 % koko Euroopan energiankulutuksesta. Rakennukset ovat suurin yksittäinen energian kuluttaja ja kulutus on enemmän kuin liikenne ja teollisuus kuluttavat yhteensä. Kaksi kolmasosaa tästä energiamäärästä kuluu kotitalouksissa. Euroopan unionin tasolla on todettu, että rakennussektorilla kustannustehokkain ja myös tärkein tapa päästöjen vähentämisessä on energiatehokkuuden parantaminen. Tehtyjen tutkimusten mukaan Euroopassa rakennusten energiankulutusta pystyttäisiin vähentämään viidenneksellä energiatehokkuutta parantamalla. [3, s. 1; 1, s. 1.] Yksi tehokkaimmista tavoista vaikuttaa EU:ssa päästöihin olisi hyödyntää rakennussektorin valtavaa, lähes käyttämätöntä potentiaalia energiansäästöissä. EU:n tasolla noin 75 % rakennuskannasta on energiankulutukseltaan tehottomia. Jäsenvaltiosta riippuen rakennuskannasta peruskorjataan kuitenkin vain 0,4–1,2 % vuosittain. [4, s. 1.] Lisäksi rakennuskanta uusiutuu hitaasti, esimerkiksi Suomessa vain noin prosentin vuosivauhdilla. [5, s. 53.] Tämän vuoksi olemassa olevat rakennukset ovat yksi tärkeimmistä kohteista energiatehokkuustoimenpiteitä mietittäessä.

Vuonna 2016 energian kokonaiskulutus oli Suomessa 1,34 miljoonaa terajoulea (TJ) eli 371 terawattituntia (TWh). Sähköä käytettiin kaiken kaikkiaan 85,1 TWh. [6] Kuten koko EU:n tasolla, myös Suomessa rakennukset kuluttavat energian loppukäytöstä noin

40 %. Vuonna 2016 se tarkoitti noin 148 TWh:n kulutusta. Tästä kulutuksesta noin 80 % koostuu lämmityksestä, ilmanvaihdosta ja jäähdytyksestä. Sähkönkulutuksesta rakennusten osuus on vuositasolla noin 34 TWh. [1, s. 1.] Jotta kulutus olisi helpommin suhteutettavissa, voidaan sitä verrata esimerkiksi Olkiluodon ydinvoimalan nykyisiin yksiköihin, jotka tuottivat vuonna 2016 sähköä yhteensä 14,35 TWh. [7, s. 3.] Maamme hiilidioksidipäästöistä rakennusten energiankulutuksen osuus on 38 %. [8] Keskimääräisellä energian hinnalla 80 €/MWh laskettuna kuluu rakennusten energiakustannuksiin Suomessa lähes 12 miljardia euroa vuodessa. Jos rakennusten energiatehokkuutta parantamalla pystyttäisiin energiankulutusta laskemaan tutkimuksissa [3, s. 1.] arvioidulla viidenneksellä, vastaisi se vuositasolla noin 2,4 miljardin euron säästöjä sekä koko Suomen päästöjen vähenemistä 7,6 %. Tämä olisi erittäin järkevää myös kiinteistön omistajien kannalta, sillä kuten kaikessa sijoitustoiminnassa, omistajien keskeinen tavoite on pitää huolta pääoman käytön tehokkuudesta ja tulontuottamiskyvystä. Rakennusten energiatehokkuuteen investoimalla pystytään vähentämään käyttökustannuksia, parantamaan liiketoiminnan kannattavuutta, lisäämään kiinteistösijoitusten tuottoja sekä nostamaan kiinteistöjen arvoa. [9; 10.]

Suomessa tehdyissä energiakatselmuksissa on noussut esille, että samoissa olosuhteissa, tekniikaltaan ja käyttöasteeltaan samanlaisissa rakennuksissa on kulutuksen suhteen isoja, keskinäisiä eroja. Tärkeimmiksi tekijöiksi ovat nykytiedon valossa nousseet eroavaisuudet kiinteistöjen käytössä, ylläpidossa ja kulutuksen seurannassa. Kun ylläpitoon, eritoten huoltoon ja käytön seurantaan on lisätty panostuksia, myös paljon energiaa käyttävien kiinteistöjen kulutustasot on saatu laskemaan muun vertailuryhmän tasolle. Voidaankin todeta, että pelkästään energiatehokkaita kiinteistöjä rakentamalla ei pystytä takaamaan pientä energiankulutusta, vaan sen lisäksi tarvitaan laadukasta ja ammattitaitoista kiinteistöjen ylläpitoa yhdistettynä reaaliaikaiseen kulutuksen ja olosuhteiden seurantaan. Tällöin energiatehokkaalla kulutustasolla on mahdollista pysyä myös vastaisuudessakin. [1, s. 1.]

Rakennuksen toimintavarmuutta, energiatehokkuutta ja kulutuksen ennustettavuutta tavoiteltaessa rakennusautomaatio nousee vääjäämättä keskeiseen asemaan. Rakennusautomaatiojärjestelmän avulla järjestelmiä ja laitteita voidaan ennen kaikkea ohjata, mutta myös seurata tehokkaasti ja saada näin jatkuvaa tietoa koko kiinteistön talotekniikan reaaliaikaisesta toiminnasta. Seurannan ja mittauksen perusteella on lisäksi helpompaa huomata, jos jossain järjestelmässä, laitteessa tai ohjauksessa on ongelmia. Tällöin reagoiminen on nopeampaa ja ennaltaehkäisevämpää. [11, s. 9–10.] Nykypäivänä sekä

uusien että vanhojen kiinteistöjen omistajien onkin mitä luultavimmin taloudellisesti kannattavaa investoida toimivaan ja energiankäyttöä optimoivaan rakennusautomaatioon.

Rakennusten energiatehokkuutta, rakennusautomaatiota ja koko rakennusalaan pohdittaessa on tärkeää huomioida myös aikamme megatrendit, jotka tulevat vääjäämättä muuttamaan koko maailmaa. Rakennusalan kannalta ehkä keskeisimmät niistä ilmastomuutoksen lisäksi ovat teknologian kehittyminen kohti kokonaisvaltaisempaa digitalisaatiota, keinoälyä ja automatisaatiota sekä energiantuotannossa ja -varastoinnissa tapahtuvat muutokset. [12; 13.] Nämä megatrendit tulevat ratkaisevasti muuttamaan käsitystämme rakennuksista, niiden vuorovaikutuksesta ihmisiin sekä merkityksestä niin kaupunkien kuin yhteiskuntien tasolla.

Opinnäytetyön tilaajana on Vahanen Talotekniikka Oy. Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää kirjallisuuskatsauksen avulla, miten rakennusautomaatiota ja siihen liitetyjä sekä erillään olevia mittauksia voidaan hyödyntää rakennuksen energiatehokkuuden parantamisessa, seurannassa, ennustettavuudessa sekä tehtyjen energiatehokkuustoimenpiteiden vaikutusten mitattavuudessa. Lisäksi työssä käsitellään toimivan, energiatehokkaan rakennuksen ja hyvien sisäolosuhteiden riippuvuutta toisistaan.

Työssä perehdytään rakennusautomaation perusrakenteeseen ja sen toimintaan kattavasti, sillä rakennusautomaation rooli rakennusten energiatehokkaassa ohjauksessa on keskeinen. Rakennusautomaatiolle ja rakennusautomaatioinvestoinnille voidaan yleisesti määritellä seuraavat keskeiset tavoitteet:

- Toteuttaa eri prosessien ohjaukset ja säädöt suunnitelmien määrittelemällä tavalla.
- Valvoa taloteknisiä toimintoja mittauksin ja hälytyksin.
- Tuottaa kulutus-, energiatehokkuus- ja tilastomateriaalia selventämään ja auttamaan rakennuksen toiminnallista ja energiatehokasta ylläpitoa.
- Tarjota ylläpitäjälle ja käyttäjälle sellainen käyttöliittymä, joka on selkeä, ymmärrettävä ja näin päivittäistä käyttöä tukeva. [14, s. 49.]

Tässä opinnäytetyössä tullaan käsittelemään kaikkia yllämainittuja rakennusautomaation osatekijöitä, sillä rakennusautomaatio on toimiva kokonaisuus vasta silloin, kun jokainen osa-alue on kunnossa.



Opinnäytetyön loppuosassa pohditaan rakennusten muuttuvaa merkitystä tulevaisuuden älykaupungeissa, joita muovaavat uudet teknologiat, kehittynyt automaatio ja isot tietomassat. Lisäksi loppuosassa käydään läpi yksi nykypäivän älykäs palvelu, jossa hyödynnetään uusien teknologioiden luomia mahdollisuuksia.

Opinnäytetyö keskittyy lähtökohtaisesti rakennusautomaation tarjoamiin mahdollisuuksiin rakennusten kokonaisvaltaisessa energiatehokkuuden hallinnassa nyt ja tulevaisuudessa. Vaikka yhä mutkikkaammat automaatiojärjestelmät pilvipalveluineen sisältävät paljon myös erilaisia riskejä ja haavoittuvuuksia, rajataan ne tässä työssä jo lähtökohtaisesti hyvin laajan aihealueen ulkopuolelle.

## 2 Energiatehokkuuden normiohjaus ja vaikutus kiinteistöjen arvoon

Energiatehokkuutta ohjaavat lainsäädäntö, asetukset ja standardit tarjoavat ratkaisuja, joiden avulla pyritään vaikuttamaan sekä uudis- että korjausrakentamiseen ja näin vähentämään energiankulutusta samalla rakennuksen käyttömukavuutta unohtamatta. Tavoitteena on vähentää rakennusten energiantarvetta hyödyntämällä uusiutuviin energianlähteisiin perustuvia energiatehokkaita lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmiä sekä ottamalla käyttöön uusia, älykkäitä teknologioita ja innovatiivisia ratkaisuja. [15, s. 98.]

Energiatehokkaaseen uudis- ja korjausrakentamiseen ohjaavan lainsäädännön lisäksi energiatehokkuustoimenpiteisiin ohjaa myös investointien taloudellinen kannattavuus. Tekniikan kehittyessä olemassa oleviin rakennuksiin tehtävät energiatehokkuusinvestointien takaisinmaksuajat ovat lyhentyneet, ja niistä on tullut entistä kannattavampia sijoituskohteita kiinteistöjen omistajille. Kyseiset toimenpiteet näkyvät yhä enenevässä määrin vuotuisen energialaskun pienentymisen lisäksi myös kiinteistöjen arvon nousuna. Lisäksi muun muassa toimitilojen ja asuntojen ostajat sekä vuokraajat ovat tutkitusti entistä kiinnostuneempia kiinteistöjen ympäristövaikutuksista.

### 2.1 Yleiseurooppalainen rakennusten energiatehokkuusdirektiivi EPBD

EU-tasolla yksi merkittävin rakennusten energiatehokkuuteen ohjaavista direktiiveistä on yleiseurooppalainen rakennusten energiatehokkuusdirektiivi EPBD (Energy Performance of Building Directive). EPBD:een pohjautuvat standardit olivat opinnäytetyön kirjoittamisen aikaan osin julkaistu tai vasta julkaisuvaiheessa. Nämä standardit vaikuttavat luonnollisesti myös Suomen lainsäädäntöön ja standardeista osa onkin tarkoitus kääntää suomeksi vuosien 2017 ja 2018 aikana. EPBD muuttuu energiatehokkaaksi rakentamiseksi yhteisten eurooppalaisten standardien kautta. Vuoden 2015 aikana noin 50 EPBD:een liittyvää standardia oli lausunnolla. Standardien äänestyskierron oli vuosien 2016–2017 vuodenvaihteessa ja niiden julkaisu alkoi toukokuussa 2017. [15, s. 98–99.]

Kokonaisvaltaisen lähestymistavan päätavoitteena vähentää rakennuksista aiheutuvaa hiilikuormaa. Suurin osa sekä EU:n että Suomen rakennuskannasta on rakennettu sellaisena aikana, jolloin energiatehokkuusvaatimuksia ei ollut tai ne olivat rajalliset tai lähes olemattomat. Lisäksi useimmat näistä rakennuksista ovat käytössä nykyään ja edelleen vielä vuonna 2050. Standardeissa tullaan asettamaan korjausrakentamiselle isoja

tavoitteita, joihin voidaan päästä esimerkiksi lisäeristyksellä, ikkunoita vaihtamalla tai taloteknisiä järjestelmiä päivittämällä. Standardit sisältävät energian tarpeen sekä käytön laskennan, mittaukset ja tarkastukset. Niiden tarkoituksena on mahdollistaa kokonaisvaltainen lähestymistapa, joka on entistä enemmän hyödynnettävissä suunnittelussa ja laskelmissa. Standardit auttavat suunniteltaessa eri toimenpiteitä ja ennustettaessa eri vaihtoehtojen tuomia energiansäästöjä. [15, s. 99; 16, s. 2.]

Standardeissa yhtenä keskeisimpänä tekijänä rakennusten energiatehokkuuteen on rakennusautomaatio. Rakennusautomaation kehittyminen avaa uusia mahdollisuuksia parantaa rakennusten toimivuutta ja tehokkuutta. Rakennusautomaatio ja rakennusten älykkyyks ovat kehittyneet viime vuosina kovaa vauhtia, ja EU-komissio suunnittelee rakennuksille suunnatun älykkyyksindikaattorin kehittämistä ja käyttöönottoa. [17, s. 7; 16, s. 7.] Toimivilla säätöjärjestelmillä pystytään toisaalta varmistamaan myös optimaalinen asumismukavuus. Tämän vuoksi EU-komission EPBD-standardien ohjeistuksessa esille nostettuja tärkeimpiä asioita ovat juuri rakennusautomaation ja ohjausjärjestelmien tarkastelu ja niiden oikeaoppinen, tehostettu käyttö sekä hyödyntäminen tehtyjen toimenpiteiden mitattavuudessa. Kaiken tämän ohjeistuksen päätavoitteena on nopeuttaa nykyistä voimakkaammin olemassa olevien rakennusten energiatehokkuutta parantavia korjaustoimenpiteitä sekä varmistaa toimenpiteiden kustannustehokkuus. [15, s. 99; 17, s. 1.]

Myös ilmkäsittelykoneiden ja kiinteistössä käytettävien pumppujen hyötysuhdevaatiuksiin on tulossa uusia tiukennettuja vaatimuksia vuoden 2018 alusta. Komission asetuksessa (EU) N:o 1253/2014 määritellään muun muassa ilmanvaihtokoneiden lämmöntalteenottolaitteille (LTO) ja puhaltimille uudet hyötysuhdevaatimukset, joita edellisen kerran tiukennettiin vuonna 2016. Myös puhaltimien ominaissähkötehon (SFP) vaatimus tiukentuu vuoden 2016 tasosta. Lisäksi SFP-luvun rinnalle uutena arvona otetaan sisäinen ominaissähköteho ( $SFP_{int}$ ), joka määritellään ilmanvaihtokoneen viitekokooppanolla. Viitekokooppanoon kuuluu

- puhdas M5-suodatin poistoilmassa ja puhdas F7-suodatin tuloilmassa
- poisto- ja tuloilmapuhallin
- lämmöntalteenottolaite. [18]

## 2.2 Kansalliset lait ja asetuksen energiatehokkuuden parantamiseksi

Myös Suomen lainsäädännössä on useita rakennusten energiatehokkuuteen ohjaavia lakeja ja asetuksia. Säännöksiä annetaan muun muassa maankäyttö- ja rakennuslaissa ja sen nojalla annettavissa ympäristöministeriön asetuksissa, jotka on julkaistu Suomen rakentamismääräyskokoelmassa.

Maankäyttö- ja rakennuslain tavoitteena on edistää ekologisesti, sosiaalisesti, kulttuurisesti ja taloudellisesti kestävää kehitystä. Uudisrakennusten energiatehokkuudesta linjataan pykälässä (§) 117 seuraavanlaisesti:

Rakennushankkeeseen ryhtyvän on huolehdittava, että rakennus sen käyttötarkoituksen edellyttämällä tavalla suunnitellaan ja rakennetaan siten, että energiaa ja luonnonvaroja kuluu säästeliäästi. Rakennuksessa käytettävien rakennustuotteiden ja taloteknisten järjestelmien sekä niiden säätö- ja mittausjärjestelmien on oltava sellaisia, että energiankulutus ja tehontarve rakennusta ja sen järjestelmiä käyttötarkoituksensa mukaisesti käytettäessä jää vähäiseksi ja että energiankulutusta voidaan seurata. [19, s. 32.]

Samaisessa pykälässä veloitetaan myös korjausrakentamisessa huomioimaan energiatehokkuus:

Energiatehokkuutta on parannettava rakennuksen rakennus- tai toimenpideluvanvaraisen korjaus- ja muutostyön tai rakennuksen käyttötarkoituksen muutoksen yhteydessä, jos se on teknisesti, toiminnallisesti ja taloudellisesti toteutettavissa [19, s. 32].

Myös ympäristöministeriön asetuksessa rakennuksen energiatehokkuuden parantamisesta korjaus- ja muutostöissä ja sen teknisestä, taloudellisesta ja toiminnallisesta toteutavuudesta linjataan seuraavaa:

Korjaus- tai muutostyön teknisesti toteutettava energiatehokkuutta parantava ratkaisu on sellainen ratkaisu, joka suunnitellaan ja toteutetaan siten, että maankäyttö- ja rakennuslain 117 a - 117 g §:n mukaiset tai niiden nojalla säädettyjen vaatimusten mukaiset ominaisuudet eivät heikkene verrattuina olevaan suunnitteluratkaisuun. Taloudellisesti toteutettava ratkaisu on tarkastelun perusteella kustannustehokkaasti toteutettavissa oleva ratkaisu. [20, s. 1.]

Lisäksi maankäyttö- ja rakennuslain pykälän 166 mukaan rakennus ja sen energiahuoltoon kuuluvat järjestelmät on pidettävä kunnossa niin, että ne täyttävät energiatehokkuudelle asetetut vaatimukset rakennuksen rakennustapa huomioiden [19, s. 32].

Rakentamismääräyskokoelman määräysten soveltaminen on tarkoitettu joustavaksi siten kuin se rakennuksen erityispiirteet sekä ominaisuudet huomioiden on mahdollista. Energiatohokkuuden kannalta rakentamismääräyskokoelma sisältää eri osioita, joita ovat

- D2 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, määräykset ja ohjeet 2012.
- D3 Rakennusten energiatohokkuus, määräykset ja ohjeet 2012.
- D5 Rakennusten energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta, ohjeet 2012.

Rakentamista koskevat asetukset olivat kirjoitushetkellä uudistettavana ja ne astuvat voimaan vuoteen 2018 mennessä. Kun määräyksien osia uudistetaan, jokaisesta uudesta asetuksesta käy suoraan ilmi, koskeeko se rakennuksen korjaus- tai muutostyötä vaiko uuden rakennuksen rakentamista. Uudistuksen keskeisimpänä tavoitteena on rakentamista koskevan sääntelyn selkeyttäminen ja vähentäminen sekä sen soveltamisen ennakoitavuus ja yhtenäisyys. [21]

Myös uudistuva energiatodistusasetus on lausuntokierroksella, ja sen on tarkoitus tulla voimaan vuoden 2018 alussa. Asetus on tarkoitus päivittää yhdenmukaiseksi samaan aikaan voimaan tulevien lähes nollaenergiarakentamista koskevien määräysten kanssa. Näiden muutosten taustalla on yleiseurooppalainen, edellisessä kappaleessa esitelty rakennusten energiatohokkuusdirektiivi EPBD. [22]

Ympäristöministeriö, Rakennusteollisuus RT ry ja Talotekniikkateollisuus ry ovat toteuttaneet yhdessä FlnZEB-hankkeen, jonka tarkoituksena on kiteyttää rakennusalan yhteinen näkemys siitä, mitä EU:n edellyttämällä lähes nollaenergiarakennuksilla (nearly Zero-Energy Building, nZEB) Suomessa tarkoitetaan. Samaisessa hankkeessa määriteltiin myös alustavasti taso, mille eri rakennustyypeillä kansalliset energiatohokkuusvaatimukset voitaisiin asettaa. [23, s. 5–8.]

Kokonaisuudessa Suomen energiatohokkaaseen rakentamisesta ohjaavista säädöksistä voidaan todeta, että EU:n uudet energiatohokkuusdirektiivit tulevat muodostamaan pohjan myös Suomen energiatohokkuuteen ohjaavalle lainsäädännölle. Tällöin ne yhdessä luovat suuntaviivat niin uudisrakennusten kuin korjausrakentamisen energiatohokkuusvaatimuksille.

Toisaalta, kaikesta lainsäädännöstä huolimatta ympäristöministeriön tiedotteen [24] mukaan Suomen rakennuskannan energiankulutus laskee nykyisillä poliittisilla toimilla vain 13 % vuosina 2015–2050. Samalla rakennuskanta kasvaa 38 %. Energiankulutuksen lasku kyseisellä aikavälillä selittyy pääasiassa nykyistä rakennuskantaa energiatehokkaammasta uudistuotannosta, vanhojen rakennusten korjauksista ja lämmitystapojen muutoksista.

”Energiantuotannolle on suuri haaste, että rakennuskanta kasvaa edelleen, samalla kun sen keskimääräinen energiatehokkuus paranee vain hitaasti. Lämmön- ja sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästöjä tulee kuitenkin saada rajusti laskemaan. Toisaalta vanhan rakennuskannan energiatehokkuutta voidaan kyllä parantaa voimallisemmin ja uusi ICT-teknologia voi hillitä kiinteistöjen sähkönkulutuksen kasvua nopeammin kuin arvioinnissa on oletettu”

toteaa ryhmäpäällikkö Ari Nissinen Suomen ympäristökeskuksesta. [24]

### 2.3 Energiatehokkuuden merkitys kiinteistöjen arvonmuodostuksessa

KTI Kiinteistö Oy:n vuonna 2013 kiinteistöomistajille suunnatun kyselyn mukaan 70 % vastaajista piti ympäristönäkökohtien ja ympäristövaikutusten huomioimista tiloissa ja niihin liittyvissä palveluissa joko erittäin tärkeänä tai tärkeänä. Lisäksi yli 50 % asetti ympäristövaatimuksia tiloille ja niihin liittyville palveluille. Pöyryn vuonna 2014 tekemän tutkimuksen mukaan suomalaiset ovat valmiita maksamaan ympäristöystävällisestä rakentamisesta 1–3 % enemmän. Samana vuonna DLA Piper teki vastaavanlaisen kyselyn euroopanlaajuisesti, jossa selvisi, että 71 % vastaajista hyväksyy ympäristöystävällisille kiinteistöille isommat investointikustannukset. Lisäksi 46 % piti ympäristöluokituksia erittäin tärkeinä. Luokituksista suosituin oli BREEAM, ja lähes yhtä suosittu oli LEED.

Aalto-yliopiston Seppo Junnilan ja Jussi Vimparin vuonna 2014 tekemän haastattelututkimuksen mukaan ympäristösertifiointi voi nostaa toimistotalon arvoa Suomessa jopa yhdeksän prosenttia. Tutkimuksen mukaan sertifiointi nostaa kiinteistön arvoa ja lisää kiinteistön vuokratuottoja samalla laskien hoitokustannuksia sertifioimattomiin rakennuksiin verrattuna. Lisäksi etenkin kansainväliset yhtiöt asettavat nykypäivänä toimistotalon valinnalleen vaatimuksen sertifioinnista. Tätä edellyttävät myös yhä useammat kiinteistösjoiittajat. [25, s. 41.]

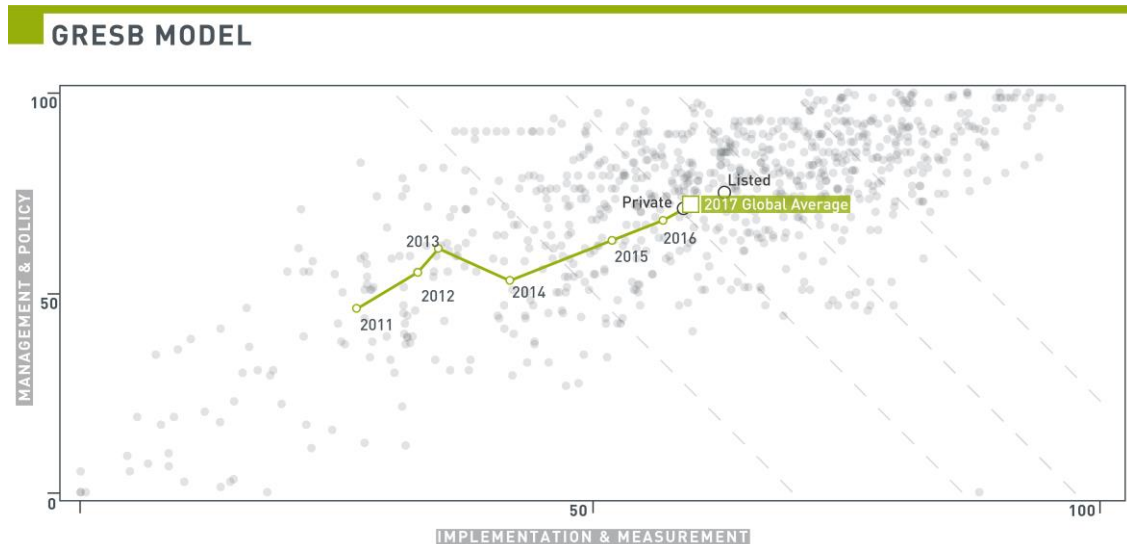
Kiinteistöalan eri tahoilla on paljon syitä suosia ympäristöystävällisiä ja sitä kautta energiatehokkaita rakennuksia ja -ratkaisuja. Näitä eri motiiveja on esitetty kuvassa 1. Kiinteistönomistajalla, rakentajalla ja asukkaalla ovat yhteisinä motiiveina määräysten noudattaminen ja yhteisvastuu, alemmat korjauskustannukset ja yrityksen imago. Lisäksi jokaisella toimijalla on omat syynsä suosia ja edesauttaa ympäristöystävällistä rakentamista.



Kuva 1. Eri toimijoiden motiivit ympäristöystävälliseen rakentamiseen [25, s. 41].

Pitävätkö tällaiset puheet ja tutkimukset paikkansa? Global Real Estate Sustainability Benchmark (GRESB) on tutkinut vihreiden sanojen ja tekojen suhdetta toisiinsa. GRESB tutkii kaupallisten kiinteistöportfolioiden tai -salkkujen vihreyttä kyselytutkimuksin vuosittain. GRESB on pystynyt esittämään portfolioiden menettelytavat ja oikeat teot vihreyden suhteen aina vuodesta 2011 lähtien. [25, s. 42.] Kuvassa 2 on esitetty näiden kyselytutkimusten tulokset vuodelta 2017. Lisäksi kuvaajassa on omina pisteinään yhteenvetotulokset vuosilta 2011–2016. Kuvaajan vaaka-akselilla on toimeenpanon toteutuminen ja

pystyakselilla johdon linjaukset. Tuloksena näistä kahdesta tutkitusta arvosta saadaan vertailuarvo puheiden ja tekojen välille. Kuvaaja vahvistaa yleisolettamusta, että puheet ovat yleensä alussa suurempia kuin teot. Tutkimus pystyy samalla kuitenkin osoittamaan myös sen, että teot ovat vuosi vuodelta vastanneet paremmin johdon tekemiä linjauksia.



Kuva 2. GRESB:n vuoden 2017 kaupallisten kiinteistöportfolioiden tai -salkkujen vihreyden kyselytutkimuksen tulokset [26].

Energiatehokkuustoimenpiteitä olemassa oleviin rakennuksiin suunniteltaessa on hyvä pitää mielessä myös Suomen rakennusten korjausvelka eli -vaje, jota on kertynyt vuosien saatossa merkittävästi, noin 30–50 miljardia. Tämä tarkoittaa noin 9–14 % koko 350 miljardin euron rakennuskannan arvosta. Rakennusteollisuuden ASKO-mallin mukaan pelkästään asuinrakennusten korjaustarve on vuosittain noin 9,4 miljardia euroa vuosina 2016–2025. Myös energiatehokkuutta on parannettava korjausrakentamisen yhteydessä. Kannattavinta se onkin toteuttaa osana normaalia korjausrakentamista ja näin sisällyttää se osaksi kiinteistön kunnossapitosuunnitelmaan. [27]

Kun vielä huomioidaan se, että energian hinta on viimeisen 15 vuoden aikana noussut 100 % ja pelkästään viimeisen vuoden aikana 4,2 %, löytyy energiatehokkuuden parantamiseen taloudellisessa mielessä monta merkittävää kannustinta, jotka varmasti kiinnostavat myös kiinteistön omistajia [8].



### 3 Rakennusautomaatio rakennuksen energiatehokkaassa ohjauksessa

Rakennusautomaatiolle ei ole olemassa yksimielistä määrittelyä. Rakennusautomaatiolla on perinteisesti tarkoitettu ainoastaan LVI-automaatiota. Taloteknisten järjestelmien kuitenkin vahvasti lisääntyessä rakennusautomaatiolla on alettu tarkoittamaan laajemmin LVI-automaation lisäksi muiden kokonaisuuksien kuten esimerkiksi valaistuksen ja kulunvalvonnan ohjaamista yhdellä järjestelmällä. Kiinteistössä olevista automaatiojärjestelmistä käytetään useita eri nimityksiä. Nämä ovat kuitenkin toistensa synonyymejä. Rakennusautomaation lisäksi käytettyjä termejä ovat esimerkiksi talotekniikan automaatio, kiinteistöautomaatio, taloautomaatio ja kotiautomaatio. [28, s. 2.]

#### 3.1 Rakennusautomaation perusrakenne, kaaviohierarkia ja elinkaari

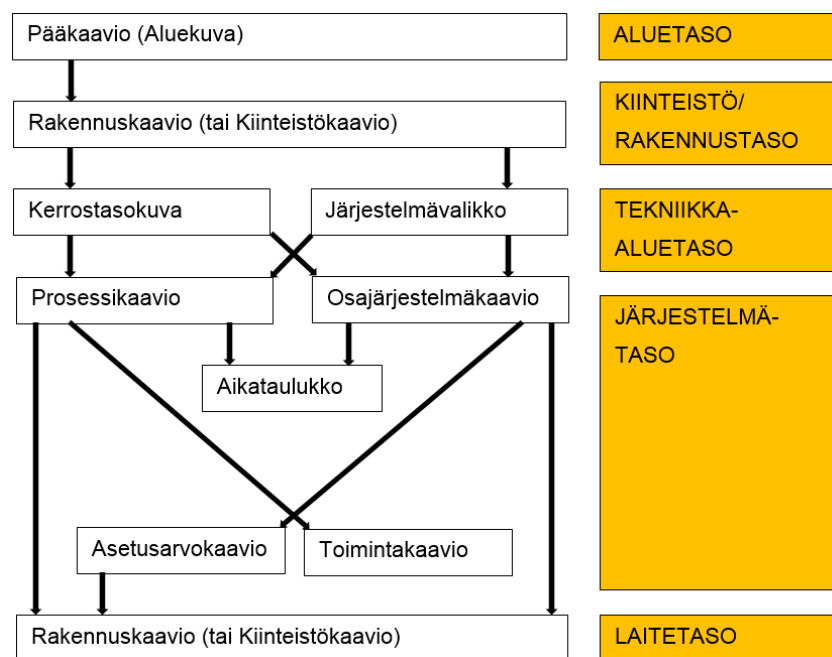
Rakennusautomaatiojärjestelmä koostu kolmesta osasta, jotka on jaoteltu tehtäväalueensa mukaan. Alimpana hierarkiassa ovat kenttälaitteet. Seuraavan kerroksen muodostavat alakeskukset ja ylimpänä ovat valvomot. Kuvassa 3 on esitetty tyypillinen rakennusautomaation hierarkia.



Kuva 3. Rakennusautomaation hierarkia [11, s. 12].

Kenttälaitteet ovat toimi- ja mittalaitteita, joiden avulla voidaan vaikuttaa esimerkiksi lämmitykseen ja ilmastointikoneen toimintaan. Mittalaitteiden välittämät tiedot kerätään alakeskuksissa ja sieltä ne välittyvät eteenpäin ohjauksikäskyinä toimilaitteille. Myös mitta- viestien fysikaaliseksi suureeksi muuttaminen, ohjauksien laskeminen ja muu mahdollinen laskenta suoritetaan yleensä alakeskuksissa. Kolmas taso muodostuu valvomoista, jotka toimivat rajapintana ihmisen ja järjestelmän välillä. Valvomotasolla mittauksia voidaan havainnollistaa graafisesti. Lisäksi valvomotasolla mahdollistetaan manuaalisen ohjauksen ja järjestelmän valvonnan. Valvomojen tehtävänä on tukea kiinteistön ylläpitäjää. [11, s. 12–13.]

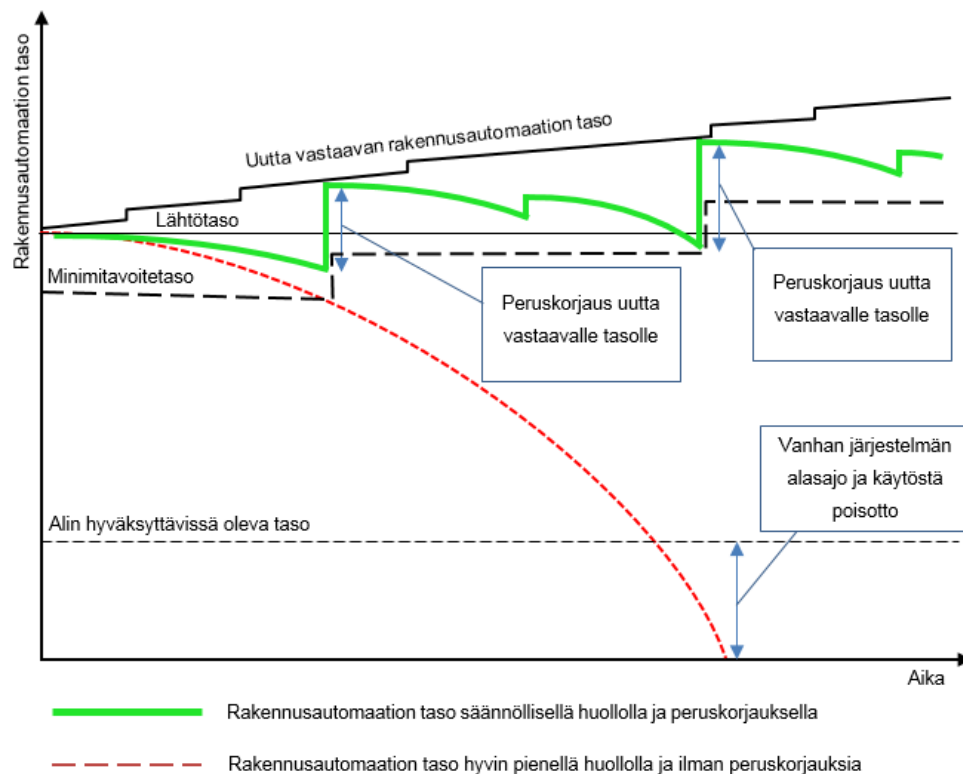
Kuvassa 4 on esitetty eri kaaviotyypin sijoittuminen tyypillisen käyttöliittymähierarkian eri tasoilla. Kuvassa on kaksi rinnakkaista polkua, jotka tarjoavat vaihtoehdoisen tavan navigointiin ja tiedon löytämiseen. Käyttöliittymän ylätasoilta voi olla suoria reittejä yksittäisten järjestelmien kaavioihin ja eri pisteiden pistetietokunoihin. Suunta voi olla myös järjestelmätason kaavioista rakennustason kaavioihin. [11, s. 35.]



Kuva 4. Yksinkertaistettu periaatekuva rakennusautomaation kaaviohierarkiasta ja kaavioiden liittymästä [11, s. 35].

Rakennusautomaatiojärjestelmien tyypillinen elinkaari on noin 15–20 vuotta, jonka jälkeen järjestelmä on viimeistään perusteltua uusia. Toisaalta järjestelmän eri osien elinkaaret vaihtelevat merkittävästi, minkä vuoksi jatkuvan ylläpidon ja huollon rooli koros-

tuu. Eritoten jos kohteen olosuhteissa havaitaan ongelmia tai energiankulutus on kasvussa ja on epäilystä, että se voisi johtua automaatiojärjestelmästä, kannattaa järjestelmän kunto tutkia huolella ja varmistua tällä tavoin ongelmien mahdollisesta aiheuttajasta. Tällaisen tutkimuksen päätavoitteena on selvittävää luotettavasti nykyisen järjestelmän kunto ja toiminta. Oleellista on myös samalla saada selville järjestelmän kokonaisvaikutus rakennuksen energiatehokkuuteen. Tehdyn selvityksen perusteella voidaan laatia raportti järjestelmän nykytilasta ja toimivuudesta sekä tehdä tarkempia tutkimuksia ja suunnitelmia siitä, mitä olemassa olevista järjestelmän osista voidaan vielä hyödyntää ja miten puutteita lähdetään ratkaisemaan. [29, s. 1.] Kuvassa 5 on esitetty rakennusautomaation tasot suhteessa säännöllisiin huoltoihin ja peruskorjauksiin. Jotta automaatiojärjestelmän käytettävyys voidaan säilyttää halutulla tasolla, korostuu ennaltaehkäisevien toimenpiteiden merkitys tällöin entisestään.



Kuva 5. Rakennusautomaation tasot.

Varsinaiset rakennusautomaatioinvestointien hyödyt eivät yleensä synny suoraan järjestelmä- ja laiteinvestoinneista vaan siitä, että niiden avulla voidaan rakentaa ratkaisuja, joiden avulla rakennusta pystytään entistä tarkemmin mutta samalla myös helpommin hallinnoimaan. Tällöin saadaan sekä laadukkaampaa että paremmin ajan tasalla olevaa informaatiota, jota voidaan edelleen hyödyntää myös tulevaisuudessa päätöksissä. [11, s. 11.]

### 3.2 Rakennusautomaation perustoiminnot ja niiden hyödyntäminen: hälytykset ja aikaohjaukset

Hälytysvalvonta on yksi rakennusautomaation perusominaisuuksista sekä sen tärkeimmistä käyttötoiminnoista. Jokainen hälytystapahtuma sisältää yksilöidyn tiedon hälyttävästä kohteesta. Yleensä hälytystietoon sisältyy selväkielinen kuvaus tapahtumasta, tapahtuman ilmenemisajankohdasta ja tieto tapahtuman kiireellisyysluokasta. Hälytyksiä voidaan ohjelmoida kaikkiin mittauksiin, indikoiteihin ja myös laskennallisiin johdannaisuureisiin, kuten esimerkiksi LTO:n hyötysuhteeseen. [11, s. 39; 14, s. 52.]

Hälytykset voidaan jakaa karkeasti kahteen eri luokkaan:

- kertaluonteiset, laiterikkoontumisesta tai vastaavasta syntyvät hälytykset
- toistuvat, ilman erityisesti havaittavaa syytä esiintyvät hälytykset.

Kertaluonteiset hälytykset ovat yleensä selkeitä ja helpompia jatkotoimenpiteiltään. Riittävän nopeasti reagoiden kyseiset hälytykset poistuvat korjaavien toimenpiteiden jälkeen. Toistuvien hälytysten käsittely ja varsinaisen primaarisyyntä selvittäminen voi olla usein jo huomattavasti työläämpää. Monesti ne jäävät roikkumaan hälytyslokiin, josta ne kuitataan aina hälytyksen esiintyessä. [31, s. 3.] Tällaisessa tilanteessa järjestelmästä voidaan tarkastella kiinteistön taloteknisten prosessien toimintaa ennen ja jälkeen häiriötilanteen. Sen avulla voidaan helpommin päätellä, mikä häiriön mahdollinen aiheuttaja on. Lisäksi hälytysten historiaseurantaa voidaan tallentaa valvomokoneen tietokantaan, josta niitä voidaan hakea ja tarkastella erilaisten hakuehtojen avulla. [14, s. 224; 11, s. 61.]

Huoltohälytyksiin on tärkeää reagoida riittävän nopeasti, koska ne kertovat usein myös vioista, jotka saattavat toiminnallisten haittojen lisäksi aiheuttaa turhaa energiankulutusta sekä mahdollisesti heikentää rakennuksen sisäolosuhteita. Hälytykset ovat oikein käytettyinä erinomainen tapa seurata järjestelmien toimivuutta sekä tehdä johtopäätöksiä koko talotekniikan toimivuudesta. Toimivissa rakennuksissa ei ole normaalissa käyttötilassa paljoa hälytyksiä. Hälytysten suuri määrä kertoo usein suoraan rakennuksen huonosta kunnosta tai kiinteistöhuollon puutteellisesta toiminnasta. [14, s. 225.] Koska hälytystapahtumat yleensä vaikuttavat myös rakennuksen ylläpitokustannuksiin, on kiinteistön omistajan etu kohdistaa panostuksia hälytyksiin niiden tilastotiheyden mukaan.

Usein tilanne voi olla sellainen, että toistuvuutta ei saada poistettua välittömällä toimenpiteillä, vaan on investoitava riittävästi lopullisen korjaantumisen varmistamiseksi. [31, s. 7–8.]

Aikaohjauksiin perustuvat ohjaustapahtumat ovat myös keskeisiä valvomojärjestelmien avulla automatisoitavia tehtäviä. Aikaohjausten avulla voidaan hallita olosuhteita ja niiden tarkoituksenmukaisuutta samalla optimoiden energiankulutusta. Yleensä käyttöliittymässä on ohjattaville pisteille sekä viikko-ohjelma että vuosikalenteri, jolloin normaalia viikkorutiinista poikkeavat aikaohjaustapahtumat ja erikoispäivät voidaan ohjelmoida järjestelmään. Koska aikaohjelmien avulla voidaan ohjata lähes kaikkia rakennuksen taloteknisiä järjestelmiä ja laitteita, on niiden asetuksilla myös suuri vaikutus rakennuksen energiankäyttöön. Oikealla aikaohjelmien asettelulla voidaan pitää rakennuksen energiankulutus hallinnassa. Lisäksi aikaohjelmien asetukset ja sitä kautta eri koneiden käyntiajat vaikuttavat merkittävästi sisäolosuhteisiin joko olosuhteita parantamalla tai huonontamalla niitä. [11, s. 40, 63.]

Yksi energiatehottoman ohjauksen tunnusmerkeistä on ilmastoinnin käyntiaikojen liukuminen yli suunnitellun tarpeen. Näin voi helposti käydä, jos jonkin poikkeuksellisen tapahtuman johdosta perusaikaohjelmaa muutetaan, mutta muutoksia ei muisteta poistaa. Energiansäästön kannalta esimerkiksi keskimääräisen toimistorakennuksen IV-kojeen tunnin mittainen ylimääräinen käynti päivittäin lisää noin 10 % kyseisen kojeen energiankulutusta. [14, s. 226.] Vastaavaa voi ilmetä myös silloin, jos jokin kone tai laite on unohdettu käsikäyttöohjaukselle. Koska rakennuksen käytön tulee mukautua käyttäjien tarpeen mukaan, ei ainoita oikeita aikaohjauksia voida aina määrittellä. Tällöin on erityisen tärkeää ylläpitää käyntiaikojen muutosten huolellista raportointia sekä seurantaa. Käyntiaikalaskentaa voidaan käyttää myös, kun arvioidaan satunnaisesti käyviä laitteita kuten

- tuulikaappikojeita
- ilmastointikonehuoneiden tuuletuspuhaltimia
- pumppaamoita
- jäädytyskoneikoita
- valaistusta
- rännisulatuksia

- kylmäkoneiden ja lämpöpumppujen höyrystimien sulatuksia.

Poikkeukselliset käyntiajat voivat kertoa esimerkiksi kojeen mahdollisesta käsikäytölle kytkemisestä tai asetusten virheellisyyksistä. [31, s. 7; 11, s. 78.]

### 3.3 Rakennusautomaation perustoiminnot ja niiden hyödyntäminen: mittaus- ja seurantaraportit sekä kulutus- ja energiaseuranta

Rakennuksen järjestelmistä ja eri LVI-prosesseista saadaan kattavasti tietoa keräämällä niiden mittauksia ja ohjauksia tietokantaan. Koska rakennusautomaatiojärjestelmien levyntallennuskapasiteetti on kasvanut, voidaan prosessien perusmittauksia kytkeä jatkuvaan historiatallennukseen niin, että levyille on tallennettuna ainakin viimeisimmän kuukauden mittaukset. Tämä auttaa merkittävästi häiriötilanteiden selvittelyssä, kun historiatiedoista voidaan havaita mahdolliset muutokset eri prosessien käyttäytymisessä. Historiatallenteen säilytysaika tulisi tämän vuoksi olla vähintään hieman yli kuukauden verran, jotta kuukausittaisesta energiaseurannasta mahdollisesti seuraavat historiatrenditarpeet saadaan varmasti katettua. [11, s. 44–45.]

Seuranta ja sen pohjalta kerätyn datan avulla syntyvät raportit ovat tehokas tapa tarkkailla rakennuksen ja sen eri teknisten prosessien ja järjestelmien toimintaa. Nykypäivän graafiset käyttöliittymät tarjoavat siihen monenlaisia työkaluja, joita ovat

- dynaamiset trendit
- historiatrendit
- käyntiaikaraportit
- hälytysraportit
- järjestelmäraportit
- olosuhderaportit
- muut tapahtuma- ja tilanneraportit. [11, s. 41.]

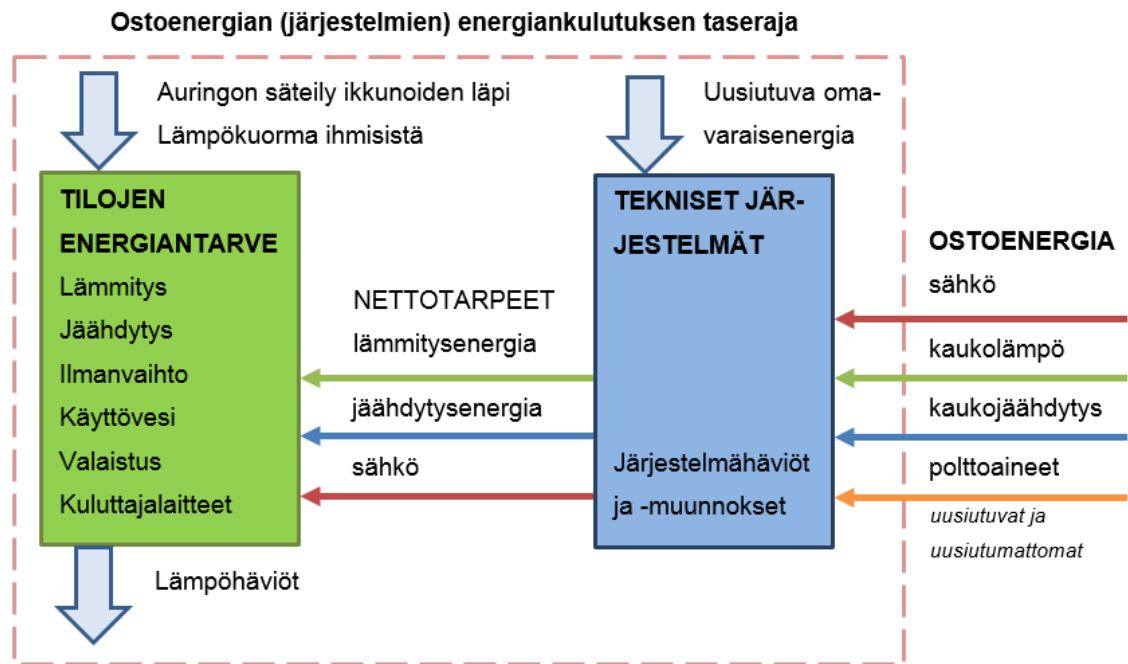
Raporttiohjelmien avulla voidaan seurata rakennuksen tavoiteolosuhteiden toteutumista sekä sitä, kuinka energiataloudellista rakennuksen käyttö eri tarkastelujaksoilla on ollut. Yksi hyödyllisimmistä edellä mainituista raporteista on trendiseuranta. Trendiseurannalla

ymmärretään yleisesti yhden tai useamman mittauksen arvon jatkuvaa seuranta ja tulostusta. Näin trendiseuranta mahdollistaa jatkuvan hetkellisten arvojen päivityksen ja osoituksen esimerkiksi graafisen aika-akselikäyrästä muodossa. Trendiseuranta sopii erityisesti muutostilanteiden tarkkailuun ja analysointiin. [11, s. 67; 31, s. 5.] Trendejä on kahden tyyppisiä: dynaamisia ja historiatrendejä. Dynaamisia trendejä käytetään yleensä virityksissä, toimintakokeissa sekä suorituskyvyn tarkkailuissa ja optimoinneissa. Historiatrendiä käytetään yleensä tapahtuneiden häiriöiden ja hälytysten analyysiin. Trendiseuranta on myös keskeinen työkalu, kun rakennuksessa pyritään pitämään yllä hyvää sisäilmastoa ja energiataloutta. Tämän vuoksi kaikki keskeiset mittaukset ja käyttötilat on syytä määrittellä historiaohjelmaan niiltä osin, kuin se on mahdollista. Nämä tallennettavat suureet voivat olla myös laskennallisia suureita. [11, s. 44–45.]

Koska energiakustannuksilla on merkittävä osuus kiinteistöjen omassa taloudenpidossa, kuuluu tavoitteelliseen ja hyvään kiinteistönhallintaan olennaisena osana energiankulutuksen seuranta sekä seurannassa ilmeneviin poikkeamiin puuttuminen. Tässä rakennusautomaation keräämät kulutus- ja energiaraportit ovat hyödyllisiä perustyökaluja. Energiankulutuksen seurannan pitäisi pohjautua käsitykseen rakennuksen oikeasta kulutustasosta. Kulutustaso voidaan määrittää esimerkiksi aikaisempien vuosien pohjalta tehdyn tai suunnitteluvaiheessa mitoituservoilla lasketun kulutuservion mukaan. Usein kiinteistön omistajilla saattaa olla koko kiinteistökannan osalta määriteltä oma tavoiteltu ominaiskulutustaso, esimerkiksi lämmönkulutuksen osalta 30 kWh/m<sup>3</sup>/vuosi, johon pyritään pääsemään. Tällaisiin tavoitteisiin tulisi kuitenkin suhtautua kriittisesti ja pohtia asiaa analyttisesti, sillä rakennukset, niiden käyttöaste ja sitä kautta myös käyttöajat ovat aina yksilöllisiä ja näin ollen saattavat jo luonnostaan poiketa merkittävästi asetetusta tavoitekulutuksesta. Haasteeksi helposti muodostuukin se, että oikean tason määrittäminen on usein kaikkea muuta kuin yksinkertaista. Kulutustavoitteen määrittelyssä on otettava huomioon rakennukselle asetettujen sisäolosuhdevaatimusten mukaiset lämpötilat ja ilmapirrat sekä rakennuksen todelliset käyttöajat eli käyttöaste. Jälleen keran pääperiaatteena on kuitenkin pidettävä se, että sisäolosuhteiden laatutasosta ei tule tinkiä kulutuksen hyväksi. [31, s. 3; 11, s. 70.]

Jos rakennuksen järjestelmien ylläpito on kunnossa ja tekniikka ohjelmoitu vastaamaan kiinteistön todellista käyttöastetta, saa edellisten vuosien kulutusseurannan raporteista toimivan pohjan yleisseurannalla. Jos tilanne ei ole näin, tällöin on erittäin tärkeää, että järjestelmien toimivuus käydään läpi. Samalla asetetaan eri prosessien käyntiajat vas-

taamaan käyttöä ja seuranta aloitetaan niin sanotusti puhtaalta pöydältä, jolloin muodostuva vertailupohja saadaan vastaamaan rakennuksen todellista käyttöastetta. Jotta tässä onnistuttaisiin, tulee rakennuksen erityispiirteet ottaa huomioon kulutusprofiilin ymmärtämiseksi. Kulutus on kokonaistase, jossa rakennukseen tuodaan joko osto- tai ilmaisenergiaa. Tuotu energia poistuu poistoilman ja ilmavuotojen mukana sekä lämpöhäviöinä vaipan läpi. [11, s. 73–74.] Rakennuksen energiavirtojen tase ja taserajat ovat avattu kuvassa 6.



Kuva 6. Rakennuksen energiavirrat ja taserajat [32, s. 13].

Millainen tase on, vaihtelee eri erityyppisten rakennusten välillä merkittävästi. Esimerkiksi toimisto- ja liikerakennuksissa ilmanvaihdon osuus on merkittävin, kun taas asuinpientalossa auringon säteilyenergian osuus voi nousta huomattavaksi. Nämä seikat pitää aina osata huomioida rakennuksen energiavirtoja ja energiankulutusta arvioidessa.

### 3.4 Rakennusautomaation laatu ja haasteet kiinteistön ylläpidossa

Yleisesti eri järjestelmien käyttövarmuus riippuu kolmesta eri osa-alueesta: toimintavarmuudesta, kunnossapidettävyydestä ja kunnossapito-organisaation toimintakyvystä eli kunnossapitovarmuudesta. Toimintavarmuudella tarkoitetaan järjestelmän kykyä toimia



sille asetettujen määrittelyjen mukaisesti sille määritellyissä olosuhteissa. Näiden määrittelyiden tulee sisältää käyttäjän vaatimukset ja järjestelmän toiminnalliset määrittelyt. Tällöin voidaan puhua myös käyttövarmuudesta tai järjestelmän laadusta.

Järjestelmässä voi ilmetä erinäisiä virheitä ja vikoja, jotka voivat johtaa vikatilanteisiin. Yksi vikaluokista on laiteviat, jotka syntyvät esimerkiksi valmistusvirheiden tai kulumisen seurauksena. Toinen merkittävä luokka ovat systemaattiset virheet, jotka johtuvat itse järjestelmän rakenteesta. Ne ovat esimerkiksi suunnittelun aikana syntyneitä ohjelmisto-, määrittely- tai laitevirheitä. Systemaattinen virhe voi aiheutua myös puutteellisista tai vääristä käytön ja kunnossapidon menettelyistä. Kaikissa näissä olennaisena piirteenä on se, että virhe aiheuttaa vikatilanteen toistuvasti aina, kun tietyt ehdot toteutuvat. Toisaalta vikatilanne, esimerkiksi virheellinen laskennan tulos, ei välttämättä johda ulospäin näkyvään virhetoimintaan järjestelmässä, jolloin se jää helposti huomaamatta väärinä tietoa. [33, s. 118–119.]

Nykypäivän modernien mutta monimutkaisten rakennusautomaatiojärjestelmien laadun ja toimivuuden haasteeksi muodostuu usein järjestelmien monimutkainen käyttöliittymä ja vaikea hallittavuus. Lisäksi samassa kiinteistössä voi olla yhtä aikaa useita eri järjestelmiä käytössä, joita kaikkia pitäisi osata käyttää ja säätää. Kuilu esimerkiksi nykyisten älypuhelinien käyttöliittymien sekä sovellusten ja talotekniikan toteutusten välillä on todella iso. Silti molempia järjestelmiä käyttää sama henkilö, joka on arjessa tottunut helpokäyttöisiin sovelluksiin. Liian usein käykin niin, että käyttäjät eivät osaa käyttää talotekniikkaan liittyviä laitteita riittävän hyvin. Tämän lisäksi järjestelmässä voi olla moninaisia virheitä ohjelmoinnin suhteen, jolloin se ei välttämättä edes osaa hälyttää mahdollisista vikatilanteista ja energiatehokkuuden kannalta oleellisista poikkeamista. [15, s. 114.]

Rakennusautomaatiojärjestelmän käytön tavoitteena on kuitenkin mahdollisuus ohjata ja valvoa kiinteistön talotekniikan toimintaa niin, että kiinteistössä saavutetaan tavoitellut sisäolosuhteet mahdollisimman pienellä energiankulutuksella. Se on siksi kiinteistön käytöstä ja huollosta vastaavan kiinteistöorganisaation keskeisin työkalu pyrittäessä näihin tavoitteisiin. Siinä onnistuminen edellyttää osaamista hyödyntää rakennusautomaation ominaisuuksia mahdollisimman tehokkaasti kiinteistön talotekniikan ohjauksissa, säädöissä, valvonnassa, raportoinnissa ja oleellisen tiedon käsittelyssä. [1, s. 4.] Rakennusautomaation käytön osaaminen ja sen eri osa-alueiden optimoiminen ovat siis raken-

nuksen energiatehokkuuden ja toimivuuden perusedellytyksiä. Sillä pystytään vaikuttamaan olennaisesti kiinteistön ylläpidon suurimpaan vuotuiseseen menoerään, energiankulutukseen. Jotta hyvinkin säädetty järjestelmä toimisi moitteettomasti, tarvitaan oikein viiritetyt automaatiojärjestelmän lisäksi asiansa osaavat käyttäjät sekä säännöllistä huoltoa ja kunnossapitoa. [11, s. 13.]

### 3.5 Rakennusautomaation merkitys rakennuksen energiatehokkuuteen

Rakennuksen energiatehokkuudella tarkoitetaan sitä todellista, kulutettua energiamäärää tai arvioitua määrää, joka vastaa rakennuksen standardoitua käyttöä. Se voi sisältää

- lämmitystä
- lämpimän veden lämmitystä
- jäähdytystä
- ilmanvaihtoa
- valaistusta
- muuta energian käyttöä. [34, s. 8.]

Koska korjausrakentamisessa ei juurikaan voida hyödyntää arkkitehtuurin tai kaavoituksen ratkaisuja energian säästämiseksi, ovat tekniikan avulla tehtävät parannukset sisäolosuhteisiin ja energiankulutuksen vähentämiseen keskeisellä sijalla. Muutoksia suunniteltaessa on kuitenkin aina muistettava, että talotekniikan ja rakennusautomaation tärkein tehtävä on ylläpitää sisäolosuhteet haluttuina ja tarkoituksenmukaisina. Vasta sen jälkeen tulee energiakulutuksen optimointi. Tämän vuoksi, ennen mitään muita toimenpiteitä, pitää halutuille sisäolosuhteille asettaa selkeät tavoitteet, joita on mahdollista seurata ja ylläpitää.

Talotekniikassa on lähtökohtaisesti kaksi päätapaa vähentää energiankulutusta. Ne ovat tehokkaammat laitevalinnat sekä laitteiden energiatehokas ohjaus. [25, s. 25.] Rakennusautomaation avulla voidaan parhaiten vaikuttaa energiatehokkaaseen ohjaukseen, jolloin valituista laitevalinnoista saadaan paras hyöty. Koko rakennuksen energiatehokkuudessa keskeisimmät osatekijät ovat

- rakennuksen vaipan (seinät, katto, alapohja ja ikkunat) lämmöneristyskyky

- rakennuksen tiiveys
- ilmanvaihdon mitoitus ja lämmöntalteenotto
- ilmanvaihdon käyttöajat
- sähkötehokkuus (valaistus, puhaltimet, pumput)
- jäähdytys
- vedenkäyttö
- säätötarkkuus (ilmaislämpöjen hyödyntäminen). [14, s. 51.]

Jotta energiatehokkuudessa voitaisiin saavuttaa hyvä taso, tulisi kaikkiin osa-alueisiin panostaa, koska yksittäisen tekijän osuus on suhteessa kokonaisuuteen melko pieni. Toisaalta rakenteisiin tehtävät muutokset rakennuksesta riippuen voivat olla haasteellisia tai jopa lähes mahdottomia toteuttaa. Rakennusautomaation avulla on kuitenkin mahdollista vaikuttaa kaikkiin muihin energiatehokkuuden osa-alueisiin, jolloin näistä muodostuneella kokonaisuudella on iso painoarvo rakennuksen energiatehokkuudessa ja sen optimoinnissa. Rakennusautomaatiolla voidaan katsoa olevan kolme erilaista roolia energiatehokkuuden suhteen:

- Automaatiota hyväksikäyttäen voidaan suunnitella prosesseja energiatehokkuuden optimoimiseksi.
- Automaatiojärjestelmä valvoo ja hälyttää, jolloin virhe- ja korjausajoja voidaan lyhentää ja niistä aiheutuvaa energiahukkaa minimoida.
- Rakennusautomaatio tuottaa informaatiota, jonka avulla rakennuksen toimintaa voidaan ymmärtää, verrata ja kehittää. [14, s. 51.]

Rakennusten energiatehokkuuden parantamisen eri osa-alueita on havainnollistettu kuvassa 7. Kyseinen pyramidimalli on nimeltään Kioto-pyramidi, jossa on esitelty energiatehokkaan rakentamisen portaat. Pyramidissa on esitetty energiatehokkuuden kannalta tärkeimmät osa-alueet vaikuttavuusjärjestyksessä alhaalta ylös, jossa portaan koko kuvastaa kunkin osa-alueen merkitystä kokonaisuudessa.



Kuva 7. Energiatehokkaan rakentamisen portaat (Kioto-pyramidi) [3, s. 6].

Esimerkkejä rakennusautomaation vaikutusmahdollisuuksista kyseisen pyramidin eri portaisiin ollaan avattu taulukossa 1. Jaottelu on tehty portaiden mukaan.

Taulukko 1. Automaatiotoimintojen vaikutusmahdollisuuksia [3, s. 7].

Kioto-pyramidin porras	Esimerkki rakennusautomaation vaikutuskeinoista
Energiamuoto	Reaaliaikainen, optimoitu energiamuotojen valinta. Raportointi energialajeittain.
Kulutuksen ohjaus ja näyttö	Olosuhteiden ohjaus ja säätö esim. huonetasolla. Järjestelmien ja laitteiden energiatehokas automaattinen käyttö.
Ilmaisenergioiden hyödyntäminen	Vapaajäähdytys, lämmöntalteenoton ohjaus, dynaaminen jäähdytyksen ja lämmityksen ohjaus.
Sähkökäytön tehostaminen	Tarpeenmukainen ohjaus eri tiloissa, painetasot veden ja ilman siirrossa.
Lämpöhäviöiden pienentäminen	Lämmityksen ja käyttöveden tarpeenmukaiset lämpötilatasot, ohjattavat aurinkosuojauksen laitteet (jäähdytys).

Taulukon esimerkit havainnollistavat, kuinka kaikilla osa-alueilla energiaa käyttävien laitteiden ohjauksella ja valvonnalla on oma roolinsa. Automaation rooli korostuu erityisesti kolmessa keskeisessä portaassa. Vasta näiden energiatehokkuutta parantavien toimenpiteiden jälkeen tulee eri energiatuotantoratkaisujen ja energiamuotojen arviointi. Lisäksi automaatio ja sen taso vaikuttavat kyseisessä vaiheessa tehtäviin valintoihin sekä käyttötapoihin eritoten silloin, jos rakennuksessa on käytössä tai siinä tullaan käyttöönottamaan rinnakkaisia energiantuotantojärjestelmiä.

Voidaankin todeta, että vain rakennusautomaatiota monipuolisesti hyödyntäen pystytään rakennuksen taloteknisiä laitteita ja järjestelmiä hallitsemaan tehokkaasti. Ilman oikein toteutettua rakennusautomaatiojärjestelmää jää osa energiatehokkaan rakentamisen ratkaisuista lähes varmuudella hyödyntämättä ja sen tuomat edut saavuttamatta. [3, s. 7.]

## 4 Rakennusautomaation säätö- ja mittalaitteet sekä ohjelmalliset ominaisuudet

Säätö- ja mittalaitteilla on erittäin keskeinen rooli automaatiojärjestelmien toiminnassa. Niillä on ratkaiseva merkitys rakennuksien energiankulutukseen, minkä lisäksi ne auttavat omalta osaltaan luomaan ja ylläpitämään hyviä sisäolosuhteita. Sen vuoksi säätö- ja mittalaitteiden optimaaliseen toimintaan sekä jatkuvaan huoltoon, ylläpitoon ja seurantaan on syytä panostaa. Lisäksi mittalaitteista saatavia mittaustietoja voidaan nykypäivänä hyödyntää monipuolisesti erilaisissa säätö- ja optimointiohjelmissa, joita on alan teknologioiden kehittyessä koko ajan yhä enemmän saatavilla. [14, s. 55.]

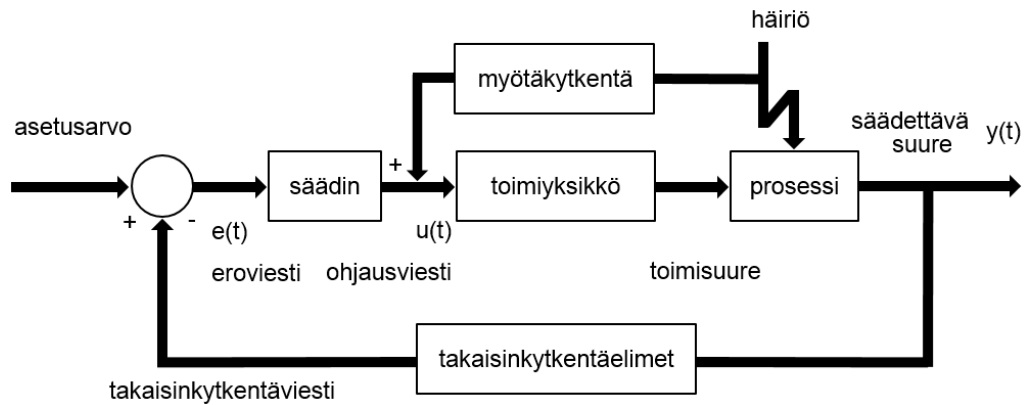
### 4.1 Säätöjärjestelmän perusrakenne ja säädön porrastus

Rakennuksen säätölaitteilla on kaksi jaoteltua perustarkoitusta:

- fyysiset perussäätö-, hälytys- ja aikaohjaustoiminnot
- ohjelmalliset optimointi-, seuranta-, tilastointi- ja graafiset toiminnot.

Fyysisiin ohjaustoimintoihin ei normaalisti tarvitse juurikaan puuttua, jos laitteiden perussäädöt ovat kunnossa. Ohjelmalliset toiminnot puolestaan edellyttävät käyttäjältä aktiivisuutta, ymmärrystä prosesseista sekä tavoitteellisuutta kiinteistöhuollossa ja -hallinnossa. Niiden hyödyntäminen voi jäädä vähäiseksi tai lähes olemattomaksi, jos kiinteistönpidon toimintamalleihin ei ole suunniteltu niiden analysointia ja tiedon hyödyntämistä osana kiinteistön ylläpitoa. [31, s. 1.]

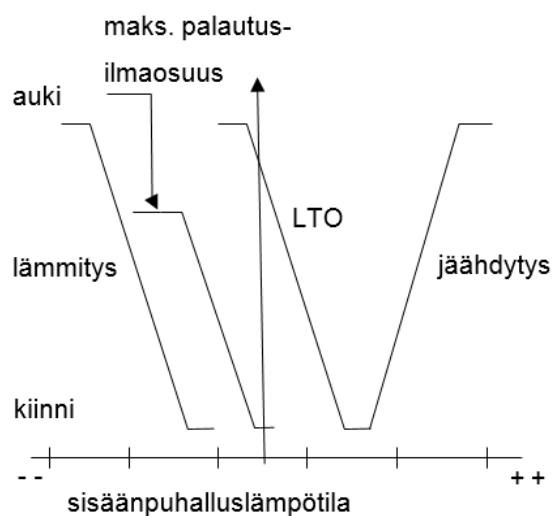
Säätöjärjestelmän perusrakenneosana toimii yksittäinen säätöpiiri. Sen tehtävänä on pitää säädettävän suureen arvo tarkoituksenmukaisella tarkkuudella asetusarvossaan. Säätöpiirin tulee olla riittävän nopea, mutta samalla kuitenkin mahdollisimman tunteeton ulkopuolisille häiriötekijöille. Yleensä säätöpiirin nopeuden lisääntyessä myös häiriöherkkyys lisääntyy, ja piiristä tulee helposti itsestään värähtelevä eli epästabili. Vastaavasti häiriöherkkyyden pienentyessä piiri hidastuu, ja samalla muutostilanteiden hallinta vaikeutuu. Hyvä säätöpiiri onkin kompromissi, jossa on huomioitu nämä eri ominaisuudet. Yleisin säätöpiirin rakenne on suljettu säätöpiiri, joka on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Suljettu säätöpiiri siihen liittyvine käsitteineen [14, s. 55].

Suljettu säätöpiiri syntyy, kun säädetävän suureen mittauksen ja asetusarvon erotuksella eli eroviestillä ohjataan prosessia toimiyksikön välityksellä. Mikäli takaisinkytkentää ei ole ollenkaan, saadaan avoin piiri. Tällöin kyseessä on säädön sijaan ohjaus. Säätimeltä lähtevät ohjausviestit  $u(t)$  määräytyvät säätimen säätölakien ja eroviestien  $e(t)$  perusteella. Säätimen säätölaki eli säätötapa määrää tavan siitä, kuinka ohjausviesti reagoi muutoksiin ja arvoon erosuureessa. Säätimen virittäminen on säätimen säätöyhtälön parametrien asettamista. Yleisimmät säätölait LVI-tekniikassa ovat PID- ja P-säädöt. [14, s. 55–57.]

Tyypillinen LVI-säätöprosessi rakentuu yleensä useista peräkkäisistä yksikköprosesseista eli sarjasäädöstä. Tästä yhtenä esimerkkinä toimii tuloilmakojeen säätöprosessi, jonka periaatekaavio on esitetty kuvassa 9.



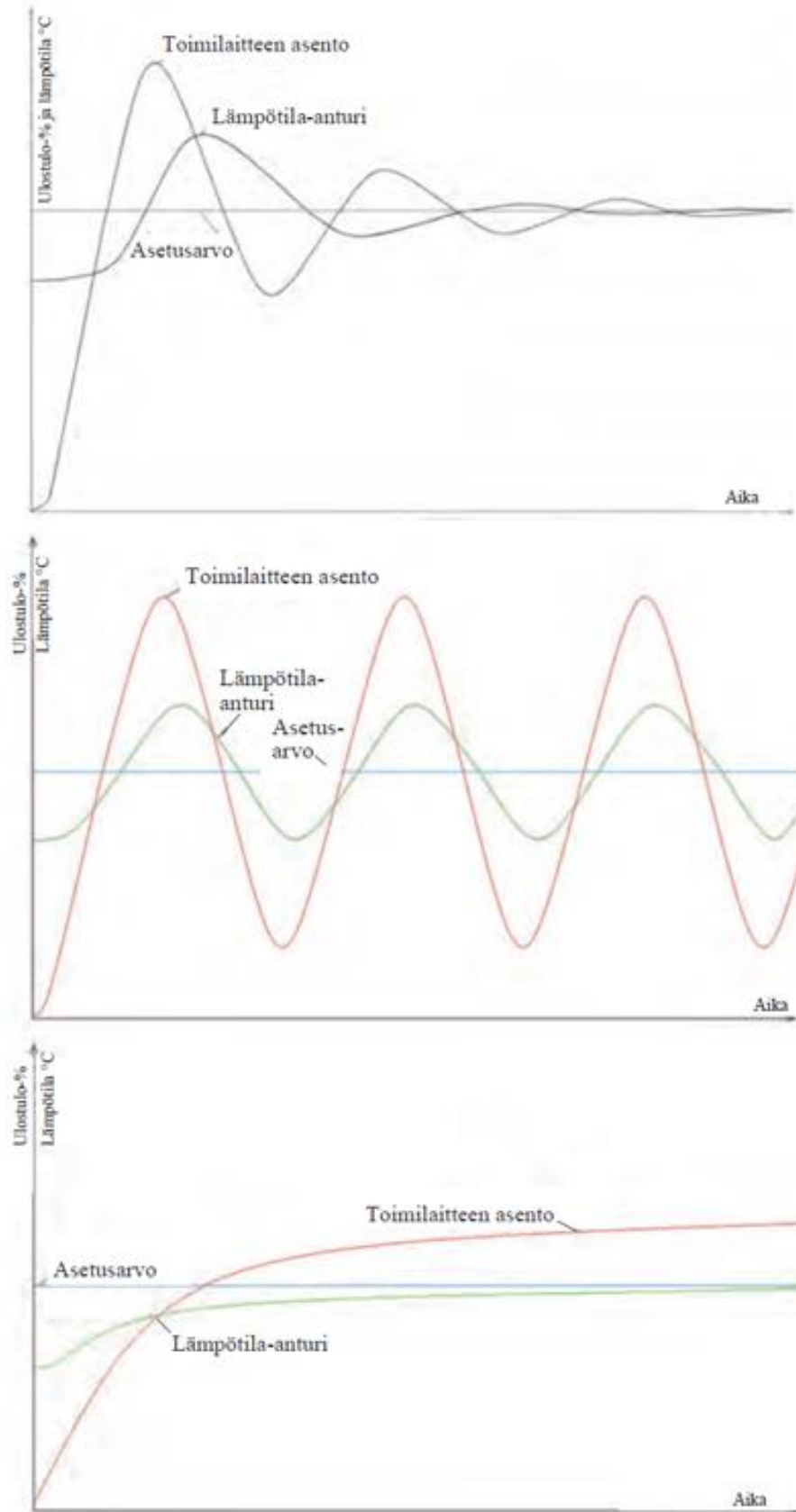
Kuva 9. Tuloilmakojeen säätöporrastus [14, s. 78].

Säätötapana prosessissa on P-säätö. Tuloilman lämpötilan laskiessa säädin vähentää sarjassa eri yksikköportaiden tehoa, kunnes sisäänpuhallusilman mitattu lämpötila vastaa asetusarvoa P-muodon säätöpoikkeama huomioon ottaen. Toiminta on päinvastainen, kun tuloilman lämpötila alkaa nousta. Jos sarjasäädössä ilmenee ongelmia, voivat tuloilmakojeen eri prosessit esimerkiksi sekä jäähdyttää että lämmittää yhtä aikaa ja energiaa menee hukkaan. Järjestelmään voidaan lisätä hälytyksiä, jotka ilmoittavat mahdollisista ristiriitatilanteista. Tällöin niihin pystytään puuttumaan heti vian ilmetessä ja uudelleensäätö voidaan suorittaa mahdollisimman nopeasti energiaa säästäen. [14, s. 78.]

#### 4.2 Säätöpiirien toiminnan seuranta ja viritys sekä adaptiivinen ja itsevirittyvä säädin

Säätöpiirien toimintaa on säännöllisesti seurattava, sillä epätoivottu säätö näkyy suoraan tilojen olosuhteissa ja energiankulutuksessa. Säätöpiirin peruslähtökohtana on säätötavan sopivin valinta ja säädön huolellinen virittäminen. Esimerkkinä väärin valitusta säätötavasta on tilojen yhtäaikainen lämmittäminen ja jäähdyttäminen. Tilassa, jossa tilakohtaisilla säädettävillä lämmityspattereilla hoidetaan lämmön säätö, tulisi ilmastointikojeen olla vain ilmanvaihtoa varten. Tällöin tuloilma tulisi pitää vakioämpöisenä. Jos ilmastointia kuitenkin käytetään siten, että sen tuloilman lämpötila muuttuu huone- tai poistolämpötilan funktiona, voi syntyä tilanne, jossa huoneen patterit lämmittävät samanaikaisesti tilaa ja ilmastointi yrittää jäähdyttää sitä. Jos ilmastointia halutaan käyttää tilojen jäähdyttämiseen, on tilojen lämmitys kytkettävä pois käytöstä siksi aikaa.

Huonosti viritetyt säädöt aiheuttavat myös välittömästi turhaa energiankulutusta sekä lyhentävät nopeasti toimilaitteiden käyttöikää lisäten entisestään vikautuneen säädön kuluja. [14, s. 229.] Kuvassa 10 on havainnollistettu kolme eri skenaariota säätöpiirien toimivuudesta: hyvin viritetty säätö, epätarkka säätö (hidas säätö) sekä yliherkkä säätö.

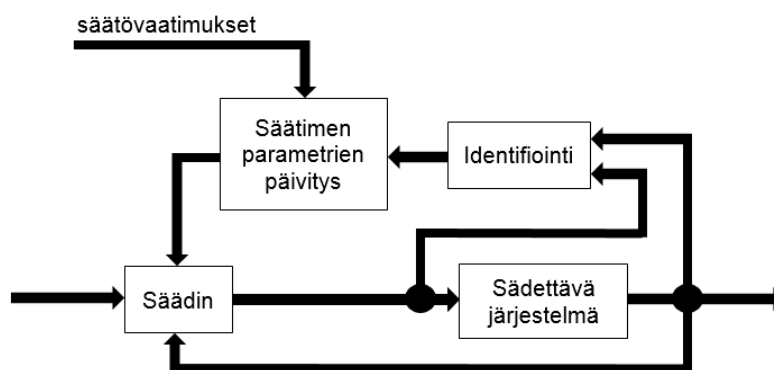


Kuva 10. Säätiöpiirin viritys. Ylhäällä hyvin viritetty säätö, keskellä yliherkkä säätö ja alhaalla epätarkka säätö (hidas säätö) [14, s.230–231].



Mittaushistoriasta voidaan melko vaivatta päätellä, kuinka hyvin prosessien säädöt toimivat. Säättöpiirien historiatallenteita olisikin syytä tarkastella säännöllisesti. Jos jonkin prosessin toimivuudesta on epäilystä, kannattaa suorittaa tarkempi toiminnallisuusmitaus. Tällöin prosessin pisteet kiinnitetään historiaohjelmaan. Tiedon keräystä jatketaan tyypillisen epäjatkuvan jakson, esimerkiksi vuorokauden ajan. Myös pysäytys- ja käynnistystilanteet saadaan tällöin analysoitua. Jos jollain alueella ilmenee epäselvyyttä, voidaan kyseinen alue kytkeä tarkempaan trendiseurantaan ja tehdä käyttäytymisen selvittämiseksi asetusarvo- ja parametrimuutoksia. [31, s. 4–5.]

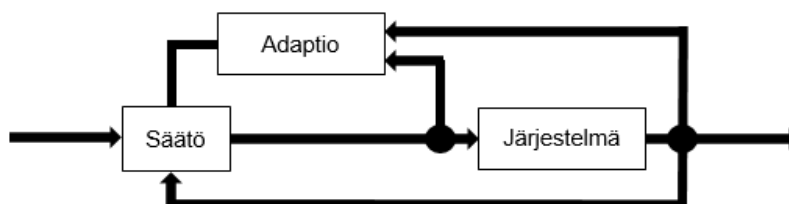
Koska säätimet ovat keskeisessä asemassa automaatioissa ja sen toimivuudessa, mutta niiden optimaalinen virittäminen on melko haastavaa, on säätöohjelmiin vähitellen kehitetty itsevirittyvyysominaisuuksia. Itsevirittyvyysominaisuuksien avulla säätöohjelmat pyrkivät jatkuvasti laskemaan toiminnan kannalta parhaat viritysarvot toiminnalleen. Tällaisen itsevirittyvän säätimen toiminnan tulee kuitenkin olla maltillista. Liian suuret kertamuutokset voivat johtaa siihen, että säätötarkkuus saattaa jopa heikentyä, jolloin tavoiteltu energiansäästö muuttuukin energian tuhlailuksi sisäilmaolosuhteiden samalla huonontuessa. [14, s. 240.] Kuvassa 11 on esitetty itsevirittyvän säätimen toiminnan perusperiaate.



Kuva 11. Itsevirittyvä säädin [35, s. 14.]

Itsevirittyvä säädin pystyy automaattisesti etsimään säätötuloksen kannalta hyvät parametrit. Itsevirittyvänä se saa viritettyä säätöpiirin automaattisesti. Se identifioi järjestelmän parametreja, ja näiden estimoitujen parametrien perusteella se päivittää omia parametrejaan. Itsevirittyvä säädin vaatii toimiakseen aina algoritmin. Tällaisen säätimen suunnittelun haasteena on luoda mahdollisimman toimiva algoritmi, joka pystyy laskemaan säätimen parametrit annettujen säätövaatimusten ja järjestelmän estimoitujen parametrien avulla. [35, s. 14; 36, s. 37.]

Sopeutuvalla eli adaptiivisella säädöllä tarkoitetaan säätöä, joka ottaa huomioon muutokset säädettävässä järjestelmässä sekä reagoi näihin muutoksiin tarkoituksenmukaisella tavalla. Toisin sanoen adaptiivinen säädin identifioi säädettävän järjestelmän parametreja ja käyttää tätä saatua tietoa säätimen parametrien uudelleenmäärittämiseksi. Adaptiivista säätöä kannattaa käyttää erityisesti silloin, kun prosessin dynamiikka muuttuu erilaisten käyttötilanteiden vuoksi. [35, s. 1; 14, s. 110.] Adaptiivisen säädön toiminta on havainnollistettu kuvassa 12.



Kuva 12. Adaptiivinen säätö [35, s. 1.]

Adaptiivisessa säätimessä on kaksi silmukkaa. Toinen on säätimen ja prosessin välinen perinteinen takaisinkytkentä. Toinen on säätimen parametrien säätö, joka tapahtuu identifioitujen parametrien kautta. Älykäs, itseorganisoituva ja oppiva säätö liittyvät myös läheisesti adaptiiviseen säätöön. Nämä säätötekniikat perustuvat yleensä tekoälypohjaisiin ratkaisuihin, ja ne pystyvät parhaimmillaan ottamaan huomioon adaptiivista säätöä vielä korkeamman tasoisia muutoksia. [35, s. 1.] Toisaalta adaptiivisen säädön prosessit voivat olla niin epälineaarisia, että säädön matemaattisen mallin kuvaaminen on lähes mahdotonta. Tällöin voidaan käyttää niin sanottua sumeaa logiikkaa, jossa jäljitellään inhimillistä toimintatapaa. Sumeaa logiikkaa käytettäessä ohjaukset voivat perustua aikaisemmin toimiviksi havaittuihin peukalosäätöihin tai ohjauksen lopputuloksen parantamiseen yrityksen ja erehdyksen kautta. [14, s. 110.]

### 4.3 Mittalaitteet ja niiden langaton ohjaus

Myös mittalaitteilla on keskeinen rooli rakennusautomaatiossa ja järjestelmien ohjauksissa. Rakennusautomaatiojärjestelmän mittaukset ovat tehokas tapa ohjata taloteknisiä laitteita. Erilaisten mittaustietojen perusteella voidaan ohjata lukuisia kojeita. Esimerkiksi lämpötilamittauksilla voidaan ohjata tuulikaappien kiertoilmakojeita, rakennusten alapohjien tuuletusta sekä teknisten tilojen jäähdytyspuhaltimia ja kosteuden mittauksilla tilojen

kuivatusta tai kostutusta. Rakennusautomaation mittauksia voidaan käyttää myös ohjaamaan esimerkiksi LVI- ja sähköjärjestelmien tehoja niin, että ne vastaavat kiinteistön kulloistakin käyttöastetta. Rakennusautomaatioon liittyviä keskeisimpiä mittauksia ovat

- lämpötila
- kosteus
- paine ja paine-ero
- virtaus
- energia
- ilman laatu
- valoisuus
- nesteen pinnankorkeus
- ja läsnäolomittaus. [37, s. 3.]

Kun termostaattiset ja erilaisten mekaaniset kytkimet korvataan mittausantureilla, voidaan samalla saada ohjattavan kohteen olosuhteista trendiseuranta. Mittausten perusteella tapahtuviin ohjauksiin voidaan asettaa myös liukuvat asetusarvot, jolloin laitteen käynnistymistä voidaan ohjata esimerkiksi ulkolämpötilan funktiona. [14, s. 236.]

Alati kiristyvät energiatehokkuusvaatimukset sekä uudis- että korjausrakentamispuolella ja sitä kautta tarpeettoman energiankäytön välttäminen johtavat väistämättä tarkentuneisiin sääätötavoitteisiin, prosessien mukauttamiseen erilaisten käyttötilanteiden mukaan sekä sääto- ja ohjausmahdollisuuksien ulottamiseen yhä pienempiin kulutusyksiköihin. [14, s. 49.] Vanhoissa rakennuksissa uudelle tekniikalle voi kuitenkin olla hankalaa löytää riittäviä tiloja. Korjauksien yhteydessä kaapelointi saattaa aiheuttaa toisinaan jopa ylityspääsemättömiä vaikeuksia. Lisäksi laitteistoille vietävä kaapelointi teettää aina työtä ja vaatii lisätilaa. Tällöin kustannustehokkain ratkaisu saada automaattiset ohjausmahdollisuudet käyttöön on hyödyntää langattomia ratkaisuja. Langattomia yhteyksiä käyttämällä voidaan myös uusissa rakennuksissa säästää kaapeloinnissa. Kommunikointi laitteiden välillä tapahtuu radiotaajuuksilla. Tällöin anturit voidaan sijoittaa entistä joustavammin optimaalisiin paikkoihin ja järjestelmän suorituskykyä parantaa, koska langattomaan runkoverkkoon voidaan yhdistää useita järjestelmiä. Etenkin vanhoissa kiinteistöissä ja kellaritiloissa sekä muissa vastaavissa paikoissa jokaisen anturin vastaanottama signaalitaso on kuitenkin tärkeää mitata ja näin varmistaa järjestelmän toimivuus.

Lisäksi langattomissa järjestelmiä käytettäessä on tietoturvaan panostettava, sillä ulkopuolisilla tahoilla on suuremmat mahdollisuudet päästä käsiksi langattomaan järjestelmään. Tämän vuoksi kunnollinen suojaus, viestien salaaminen sekä viestittäjien tunnistaminen on olennaisen tärkeää. [38, s. 2, 7; 25, s. 25.]

Langaton anturitekniikka on kehittynyt isoin harppauksin ja se mahdollistaa koko ajan uusia sovellusmahdollisuuksia rakennuksissa. Yksi esimerkki uusista mahdollisuuksista on niin sanottu radiotaajuinen etätunnistus, radio frequency identification (rfid) -anturi. Samaista tekniikkaa käytetään muun muassa etäluettavissa pankkikorteissa. Kyseessä on Metropoliassa käynnistynyt hanke, joka liittyy hallituksen kärkihankkeeseen ja jonka tavoitteena on nopeuttaa rakentamisen digitalisaatiota. Lisäksi teknologian tutkimuskeskuksessa VTT:ssä on kehitetty mittaustekniikkaa, jota pystytään esimerkiksi kiinnittämään joustaviin pintoihin. Tällaiset rfid-tarrat ovat jo nykyään hyvin halpoja ja maksavat vain muutamia kymmeniä senttejä kappaleelta. Antureita voidaan entistä helpommin kiinnittää eri tiloihin rakennuksessa ja kerätä näin isoja määriä mittaustietoa. Kehittyneillä monitorointijärjestelmillä mittausdataa voidaan käsitellä ja muuttaa helpommin käyttäjälle luettavaan ja tulkittavaan muotoon. [39]

#### 4.4 Rakennusautomaation ohjelmallisten ominaisuuksien tehokas hyödyntäminen

Rakennusautomaatiojärjestelmä sisältää monia hyödyllisiä ominaisuuksia, jotka voivat jäädä täysin tai osittain käyttämättä mutta joita hyödyntämällä voitaisiin saada energiansäästöä aikaan melko helposti. Toisaalta rakennusautomaatiosta saatavan tiedon hyödyntämien voi jäädä pelkkien raporttien ja analyysien tasolle. Mittaustulosten tiedon hyödyntämistä voidaan kuitenkin ulottaa entistä laajemmalle käyttämällä rakennusautomaation ohjelmointiominaisuuksia tai erilaisia energiatehokkuusohjelmia.

Yksi nykypäivän keskeisistä rakennusautomaation ohjelmallisista ominaisuuksista on tarpeenmukaisen lämmityksen, ilmanvaihdon ja valaistuksen hyödyntäminen. Rakennuksen LVI- ja sähköjärjestelmien tehoja voidaan helposti ohjata rakennusautomaation mittauksien pohjalta niin, että ne vastaavat mahdollisimman tarkasti kiinteistön käyttöastetta. Tätä niin sanottua tarpeenmukaista ohjausta pystytään käyttämään suuremmista tilakokonaisuuksista huonetasolle saakka, jolloin energian käyttö on aina mahdollisimman tehokasta. Esimerkiksi huoneen käyttöastetta voidaan seurata läsnäolotunnisti-

mella, mittaamalla huoneen lämpötilaa ja hiilidioksidipitoisuutta tai käyttämällä näitä molempia seurantatapoja hyödyksi. Lisäksi jos tiloissa ei ole käyttöä, huoneen lämpötilan voidaan antaa laskea lämmityskaudella ja kesällä nousta. Myös ilmanvaihtoa voidaan ohjata tilojen käytön ja ilmanlaadun mukaan. Tiloissa, joissa ei ole käyttöä, voidaan ilmanlaadun antaa heikentyä ja kun tilat ovat käytössä, ilmanlaatu pidetään sille asetellulla tasolla. Myös taajuusmuuttajaohjattuja lämmityksen, jäähdytyksen ja ilmanvaihtokojien kiertovesipumppuja ohjataan tarpeen mukaan kierroslukunopeutta säätäen. Taajuusmuuttajaohjatut ilmanvaihtokoneen puhaltimet ja lämmitys- ja jäähdytysverkojen pumpput tuottavat elinkaarensa aikana merkittäviä säästöjä sähköenergiankulutuksessa. Myös valaistukselle on mahdollista asettaa oma valaistusteho niin, että auringon valoa hyödynnetään mahdollisimman tehokkaasti tilojen valaistuksessa. [14, s. 237; 31, s. 7.]

Säätöohjelmat, jotka ottavat huomioon tilojen käyttöasteen säätäessään tilojen olosuhteita ovat lähes välttämättömiä, kun pyritään vähäiseen energiankulutukseen. Tämä on luonnollisesti sitä tärkeämpää, mitä enemmän tilojen käyttöasteet vaihtelevat. Esimerkiksi toimistojen neuvotteluhuoneissa ja yleistiloissa käyttöasteen vaihtelut ovat huomattavia. Tarpeenmukainen, älykäs ohjaus kehittyy tällä hetkellä isoin harppauksin muun digitalisaation myötä. Yhä useampia ja yksityiskohtaisempia muuttujia pystytään ottamaan kustannustehokkaammin ja laadullisesti paremmin huomioon. Tällöin tarpeenmukaisuutta on entistä kannattavampaa lisätä yhä pienempiin yksiköihin kuten toimisto- ja asuinhuoneisiin. Toisaalta rakennusautomaatio pitää sisällään myös monia muita ohjelmallisia ominaisuuksia sekä siihen liitettäviä ohjelmistoja. Osa niistä ovat hyvin yksinkertaisia ja jo yleisesti käytössä. Toisaalta uudet ohjelmat voivat olla hyvin raskaita ja pohjautua suuriin tietomassoihin. Taulukossa 2 on esitelty yleisimpiä ohjelmallisia toimintoja ja niiden toimintaperiaatteita. [14, s. 237; 25, s. 23.]

Taulukko 2. Rakennusautomaation ohjelmallisia toimintoja.

Ohjelmallinen toiminto	Toiminnon kuvaus
Käyntiaikalaskenta	- Tarkoituksena varmistaa ohjattavien, jaksoittain käyvien laitteiden ja koneiden tarkoituksenmukainen käyntiaika karsimalla tarpeettomia käyttöaikoja käyntiaikaseurannan raporteja suunniteltuihin aikaohjelmiin vertaamalla. - Ohjattavat pisteet voidaan kytkeä ristiriitahälytyksiin mahdollisten käsikäyttötilanteiden karsimiseksi. [31, s. 7.]

Ohjelmallinen toiminto	Toiminnon kuvaus
Jaksottais-ohjaus/ lukitusohjelmat	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kojeiden ohjaus jaksottaisesti joko päälle/poisjaksoon tai kompensointimitaukseen perustuen.</li> <li>- Etupäässä sähkökojeille, joiden portaaton säätö on kannattamatonta tai hankalaa.</li> <li>- Tyypillisiä soveltamiskohteita: sadevesikourujen saattolämmitykset, luiskalämmitykset, tuulikaappien kiertoilmakojeet. [14, s. 112.]</li> </ul>
Yöjäähdytys ilmanvaihdolla	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Käytetään kesällä rakennuksen rakenteiden jäähdyttämiseen yöaikana, kun se on ulkolämpötilan puolesta mahdollista. Lämmitys ja jäähdytys kyseisenä aikana pakkolukittuina kiinni.</li> <li>- Pystytään jäähdyttämään myös tiloja, joissa ei ole varsinaista jäähdytystä.</li> <li>- Voidaan myös kuivattaa kosteita tiloja lämmitystä apuna käyttäen. [31, s. 7; 14, s. 237-238.]</li> </ul>
LTO-hyötysuhteen seuranta	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Yksinkertaisimmillaan lämmöntalteenoton hyötysuhteen seuranta ja toiminnan valvonta hyötysuhdelaskennan avulla.</li> <li>- Voidaan käyttää vuosihyötysuhteen parantamiseen varsinkin huurtumisherkkien levylämmönsiirtimien kohdalla optimoimalla LTO:n toiminta poisto-, jäte- ja ulkoilman lämpötilaa ja kosteutta mittaamalla.</li> <li>- Hyvin keskeinen tekijä rakennuksen energiataloudessa. [14, s. 52; 31, s. 6.]</li> </ul>
Vuotojen valvonta	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mahdollisten vesivuotojen todentaminen kulutusta seuraamalla sellaisina ajankohtina, jolloin käyttöä ei lähtökohtaisesti pitäisi olla.</li> <li>- Voidaan toteuttaa päävesimittaritasolla tai ohjelmallisesti järjestelmiin liitettyjen pisteiden avulla, jolloin vuotojen tai aukijääneiden vesikalusteiden paikantaminen on helpompaa.</li> <li>- Voidaan toteuttaa myös niin, että seuranta käynnistyy aina, jos vuorokauden millään tunnilla vedenkulutus ei alita sille asetettua arvoa. [31, s. 7; 14, s. 244.]</li> </ul>
Optimoitu käynnistys	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lämmityksen ja jäähdytyksen aloitus- ja lopetushetken optimoiminen jaksottaisessa käytössä olevassa rakennuksessa.</li> <li>- Huomioi rakennuksen massasta aiheutuvan muutoshitauden sekä sisä- ja ulkolämpötilojen muutokset. Myös sääennusteet voidaan huomioida.</li> <li>- Adaptiivinen eli itseoppiva. [14, s. 111.]</li> </ul>
Entalpiaohjaus	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ulkoilman ja kiertoilman optimoiminen tuloilman suhteen niin, että jäähdytyksen tarve olisi mahdollisimman vähäistä.</li> <li>- Huomioi laskennallisesti suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mukaan ilman kokonaislämpösisällön.</li> <li>- Soveltuu hyvin esim. alustatilojen tuuletukseen. [14, s. 112.]</li> </ul>
Ulkoa tulevan lämpösäteilyn hallinta	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ulkoa tulevan liiallisen lämpösäteilyn rajoittaminen automaation avulla ohjattavilla ikkunasäleiköillä tai markiiseilla.</li> <li>- Lämpökuormien pienentäminen ja jäähdytystarpeen vähentäminen.</li> <li>- Mahdollinen valaistuksessa lisääntynyt sähkönkulutus huomioitava laskelmissa. [14, s. 239.]</li> </ul>
Huipputehon rajoitus	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rakennuksen sähkökuormien ohjaus niin, ettei asetettua kokonaiskuormituksen raja-arvoa ylitetäisi.</li> <li>- Yksittäisille kuormille määritellään tärkeyden mukaan prioriteetti, joiden perusteella muodostetaan mm. poiskytkentäjärjestys, kiertoperiaatteet sekä kytkentöjen maksimi- ja minimipituudet.</li> <li>- Tavoitteena on kiinteistöltä perittävän huipputehomaksun minimoiminen. [31, s. 6; 14, s. 112.]</li> </ul>
Taustaohjelmistot	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erillinen ohjelmistopaketti, joka hyödyntää automaatiosta saatua tietoa lähtötietonaan.</li> <li>- Ei osallistu järjestelmätoimintoihin. [14, s. 113.]</li> </ul>

## 5 Rakennuksen mittarointi ja siitä saadun tiedon analysointi

Rakennuksissa energiankulutusta on totuttu perinteisesti seuraamaan pelkästään rekisteröimällä sähkö- ja lämpöenergian sekä vedenkulutuksen päämittarien kulutustiedot. Näistä mittareista saatavien kulutustietojen perusteella on kuitenkin lähes mahdotonta päätellä, mitkä seikat vaikuttavat kiinteistön kulutuksen vaihteluun ja mitkä laitteet ovat energiankulutuksen kannalta ne kaikkein oleelliset.

Energiankulutuksia voidaan ja on myös järkevää mitata tarkemmin kuin vain ostoenergian suhteen. Jotta tarkempaa tietoa olisi saatavilla siitä, miten kiinteistön talotekniset järjestelmät toimivat ja miten niille asetetut tavoitearvot toteutuvat, on rakennus mittaroitava niin, että energiankulutuksen kannalta oleelliset kuluttajat saadaan luotettavasti mitattua. Mittarointia kohdentamalla voidaan järjestelmien energiatehokkuuteen paneutua huomattavasti yksityiskohtaisemmin. Mikäli mittaroinnissa ei päästä riittävän yksityiskohtaiselle tasolle, ei esimerkiksi ilmanvaihdon ja valaistuksen sähkönkulutusta ole mahdollista erottaa toisistaan. [31, s. 8; 40, s. 1; 41, s. 22.]

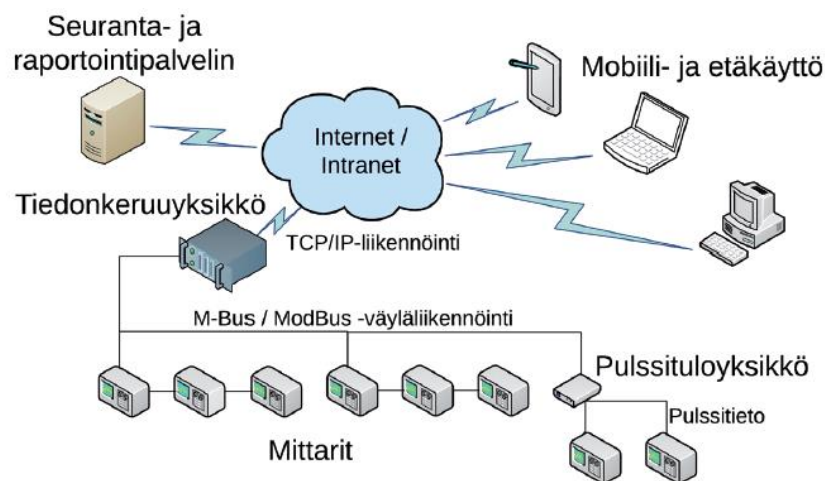
### 5.1 Rakennuksen tarkennettu mittarointi

Kiinteistönomistajan tarpeet energianseuranta- ja hallintajärjestelmiin syntyvät yleensä halusta seurata ja analysoida energian käyttöä, vuokralaisten tai muiden käyttäjien lasuttamisesta, halusta vaikuttaa omaan energiankulutukseen tai erilaisten ympäristöluokitusten ja -sertifikaattien hankkimisesta ja todentamisesta. Kulutusjakautumaa voidaan läheteä tarkentamaan eri tulokulmista, joita ovat

- järjestelmät
- suuret kuluttajat
- tai rakennusosat.

Tämä tarkoittaa esimerkiksi järjestelmätasolla lämmitysenergian kulutuksen jakautumista käyttöveden, ilmanvaihdon ja pihasulatusten välillä. Mittaroidessa suuria kuluttajia, voidaan seurantaan ottaa esimerkiksi ilmanvaihdon ja jäähdytyksen sähköenergia, kylmä ja lämmin käyttövesi sekä keittiöiden kuluttama sähköenergia. [40, s. 3, 6–7.] Kiinteistön suurimmat kuluttajat on useimmiten liitetty kiinteistön rakennusautomaatiojärjes-

telmään, joten niiden energiakulutuksen seuranta on mahdollista toteuttaa melko helposti mittaus- ja tilatietojen kautta. Toisaalta rakennus voidaan jakaa myös osiin ja tarkastella jokaista osaa erikseen. Kaikissa lähtökohdissa peruseriaatteena on kuitenkin kulutuksen tarkennettu mittarointi. Siinä rakennusautomaation kautta saatavat mittaus-tiedot toteutuneista olosuhteista sekä kulutusmittaukset ovat erityisen keskeisessä ase-massa. Energiatohokkaisiin ratkaisuihin pyrittäessä nämä mittaukset ovat viime kädessä ainoa luotettava keino todentaa asetettujen tavoitteiden toteutuminen kohdennetusti. Mittausseurannan pohjalta toteutettujen analysointien perusteella voidaan muun muassa löytää rakennuksen sähkön pohjakulutukseen vaikuttavia järjestelmiä ja laitteita, poik-keavia kulutuksia, todentaa eri energiansäästötoimenpiteiden vaikutuksia, vertailla ra-kennuksen kulutusta suhteessa rakennuksen muihin ominaisuuksiin sekä verrata kulu-tustietoja olosuhteisiin ja olosuhdetavoitteiden toteutumiseen. [31, s. 8; 3, s. 15; 40, s. 3, 8.] Kuvassa 13 on esitelty mittaus-tiedon keruujärjestelmä.



Kuva 13. Mittaus-tiedon keruujärjestelmä [40, s. 7].

## 5.2 Mittaroinnista saadun tiedon hyödyntäminen

Kun kaikista mitattujen osajärjestelmien energiakulutuksista saadaan kulutusraporteja, on tällöin huomattavasti helpompaa nähdä, mitkä järjestelmän osat aiheuttavat kulutus-poikkeamia ja -muutoksia kiinteistön kokonaiskulutukseen ja korjata näitä järjestelmiä. Yleensä merkittävimmät rakennuksen seurannassa olevat suurimmat kulutuskohteet voivat olla jopa 80 % kiinteistön kokonaisenergian kulutuksesta, jolloin niin sanotun erit-telemättömän kulutuksen osuus ja sen vaikutus kokonaiskulutukseen jää suhteessa



melko pieneksi. Toisaalta tässä jäljelle jäävässä osuudessa tapahtuvat mahdolliset muutokset on myös helpompi havaita tällöin kuin pelkän kokonaisenergian mittauksessa. Näin ollen kiinteistön kulutuksen ennustettavuutta on tehokkaampaa ja helpompaa hallinnoida. Samalla kulutusmuutosten poikkeamat ovat helpommin havaittavissa ja paikannettavissa, jolloin myös korjaustoimet voidaan kohdistaa tehokkaammin poikkeaman aiheuttajaan. [31, s. 8; 41, s. 22.]

Jotta käyttäjien toimenpiteiden, kuten käyttöaika- ja asetusarvojen vaikutusta kokonaiskulutukseen ja -käyttökustannuksiin voidaan vielä paremmin seurata ja havainnollistaa, voidaan rakennusautomaation mitatuille järjestelmille laskea keskimääräinen käyttökustannus, joka muodostuu energian hinnan ja kulutuksen pohjalta. Lopputulema voidaan näyttää esimerkiksi järjestelmän grafiikkakaaviossa. Kun käyttäjä muuttaa käyttöaika tai asetusarvoa, järjestelmä laskee uuden käyttökustannustiedon uusien parametrien pohjalta, jolloin käyttäjä pystyy näkemään suoraan, millainen vaikutus kyseisellä toimenpiteellä on energiankulutukseen. Tällöin on myös helpompaa nähdä, mitkä kiinteistön järjestelmistä ovat merkittävimpiä käyttökustannusten osalta ja kohdistaa tarvittavia toimenpiteitä niihin. [31, s. 8.]

Mittausten asentamisen ja asentamatta jättämisen kannattavuus tulee aina ratkaista tapauskohtaisesti. Uudisrakennuksissa mittauksen lisääminen ei yleensä aiheuta kovin suuria kustannuksia, sillä olemassa oleva verkostorakenne on alun alkaen suunniteltu tukemaan mittarointia. Olemassa oleviin rakennuksiin mittareiden asennus voi muodostua hankalaksi tai kalliiksi, jos verkostojen rakenne on epäedullinen mittaroinnille. Mittareita voidaan tällöin joutua lisäämään huomattavia määriä eri verkostojen osiin. Tämän lisäksi on tarvetta laskennallisille toimenpiteille, jotta kulutukset saadaan kohdennettua halutulla tavalla. Lisäksi kiinteistön omistajan mittaroinnille asettamat tavoitteet on huomioitava suunnittelussa. Mittarointijärjestelmää tarvitaan toisaalta myös tehtyjen säästötoimenpiteiden toteutuksen jälkeen, jotta toimenpiteiden vaikutukset pystytään todentamaan riittävän tarkasti. Ilman mittarointia ei voida tietää, missä ja miten mahdolliset säästöt ovat syntyneet. Koska kulutus on voinut seuranta-ajanjaksolla nousta muualla rakennuksessa tai rakennuksen käyttöaste on voinut muuttua, ei päämittaus tällöin pysty osoittamaan syntyneitä säästöjä.

Mietittäessä mahdollisia energiatehokkuustoimenpiteitä on mittaroinnin kautta kerätty ja analysoitu data myös kiinteistön omistajan kannalta erittäin hyödyllistä tietoa. Jotta pys-

tyttäisiin löytämään kannattavimmat saneerauskohteet, on luotettavan mittaustiedon kerääminen päätösten taustalle hyvin perusteltua. Kiinteistön omistajan on huomattavasti helpompaa tehdä investointeja, jotka pohjautuvat todellisiin mittaustietoihin, kuin tehdä investointeja, jotka perustuvat enemmän tai vähemmän olettamuksiin rakennuksen toiminnasta. Lisäksi laskelmat investointien takaisinmaksuajoista ovat tarkempia ja helpommin laskettavissa. Säästötoimenpiteiden takaisinmaksuajan pitää olla riittävän lyhyt, jotta kiinteistön omistajalle syntyy taloudellinen intressi investoida rakennuksen energiatehokkuuteen. Tehtyjen toimenpiteiden jälkeen säästöjen selvä osoittaminen on myös erittäin oleellista, jotta tiedetään, millainen tuottoaste investoinneille on saatu aikaan.

Mittarointijärjestelmien avulla saavutettuja säästöjä voidaan myös ylläpitää paremmin pitkällä tähtäimellä, sillä rakennuksen energiankulutuksella on tapana ryömiä takaisin aikaisemman kulutuksen tasolle. Tässä mittaroinnin avulla toteutettu aktiivinen valvonta ja ohjaus auttavat merkittävästi. Kyseinen energiankulutuksen nousu johtuu yleensä siitä, että rakennuksen käyttäjät eivät välttämättä hahmota rakennusta kokonaisuutena, jolloin jo pienillä väärillä säädöillä voidaan menettää aikaisempien säästötoimenpiteiden hyöty pitkällä aikavälillä. Laadukkaaseen ja oleellisten pisteiden mittarointiin investoiminen on lähes poikkeuksetta suhteellisen pieni panostus verrattuna varsinaisen tekniikan uusimiseen käytetystä rahasummasta. [42, s. 3, 26–27.]

### 5.3 Olosuhteiden seuranta osana mittarointi

Pelkkiä energiankulutustietoja seuraamalla ei pystytä kertomaan sitä, mitkä seikat vaikuttavat rakennuksen kulutusmuutoksiin. Energiakulutuksen lasku voi johtua yksinkertaisesti siitä, että tilojen lämpötiloja on laskettu liian alas, ilmastointia pienennetty ilmanlaadun kustannuksilla tai kojeiden käyttöaikoja lyhennetty niin paljon, että se altistaa rakennuksen mahdollisille kosteusvaurioille. Tämän seurauksena olosuhteet ovat voineet huonontua niin paljon, että esimerkiksi kyseisissä tiloissa työskentelevien työn tehokkuus on heikentynyt. Tällöin ei voida puhua kiinteistön energiatehokkaasta käytöstä. Siksi pelkkä kulutusraportointi ei riitä, vaan rinnalle tarvitaan myös samanaikaista olosuhderaportointia. [14, s. 241.]

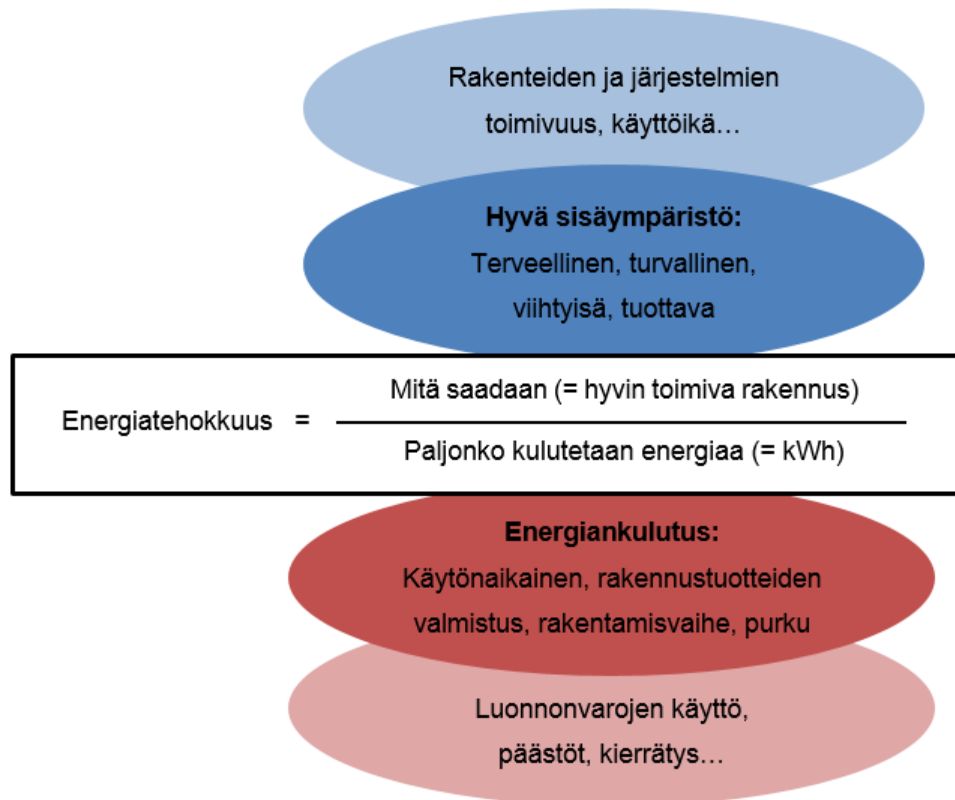
Rakennukset suunnitellaan aina tiettyä käyttötarkoitusta varten, joka edellyttää käyttötarkoituksen pohjalta määritellyt olosuhteet. Määriteltyjen olosuhteiden ylläpitäminen ku-

luttaa energiaa, joten olosuhdetavoitteiden toteutumista tulisi seurata mielellään jatkuvasti mutta etenkin ainakin silloin, kun tavoitellaan säästöjä energiankulutuksessa. Toisaalta käyttötarkoitukseen nähden ylimitoitetuilla olosuhteilla kulutetaan yhtä lailla tarpeettomasti energiaa. Energianmittausjärjestelmät eivät siksi yksistään riitä, vaan kulutusmittauksia pitää analysoida ja ennen kaikkea osata analysoida oikein.

Sisäilmaolosuhteiden tavoitteet tulee siis aina huomioida energiansäästötoimenpiteitä suunniteltaessa. Energiaa ei pidä säästää olosuhteiden kustannuksella. Sisäilmaolosuhteiden kannalta tärkeimpiä mittaussuureita ovat lämpötila ja hiilidioksidipitoisuus. Suhteuttamalla sisäilmaolosuhteet energiankulutukseen voidaan tehdä arvioita energiatehokkuudesta. Tällöin voidaan analysoida sitä, miten energian kulutus vastaa sisäilmaolosuhteille asetettuja tavoitteita ja mitä kulutetulla energialla on saatu vastineeksi. [40, s. 1, 6.]

#### 5.4 Haasteet rakennuksen energiatehokkuuden arvioinnissa

Energiatehokkuutta ja eri toimenpiteitä mietittäessä on tärkeää pohtia, mitä energiatehokkuus varsinaisesti on ja mitä sillä tarkoitetaan. Rakennusten teknisten ominaisuuksia vertaillaessa toteutuneet kulutustasot vaihtelevat yleensä paljon. Toteutuneeseen kulutukseen vaikuttavat erittäin paljon niin käyttötottumukset kuin rakennuksen käyttöaika. Toisinaan toteutunut kulutus voi usein kertoa enemmän rakennuksen käytöstä ja käyttäjistä kuin itse rakennuksesta Tyypillisesti rakennuksen energiatehokkuutta arvioidaan yksikössä kWh/m<sup>2</sup>: Se toimiikin hyvin, jos vertaillaan laskennallisesti esimerkiksi vaihtoehtoisia energiatehokkuuteen vaikuttavia ratkaisuja. Toisaalta mitattua energiankulutusta yksikössä kWh/m<sup>2</sup> on ongelmallista käyttää, jos ei tiedetä rakennuksen tarkkaa käyttötarkoitusta, käyttötunteja sekä ihmisten ja laitteiden määrää. Kun nämä muuttujat osataan huomioida analyyseissä, saadaan luvuista huomattavasti vertailukelpoisempia. Lisäksi eri laatutekijät kuten sisäilman laatu, tilassa oleskelevien ihmisten viihtyisyys ja turvallisuus tulee muistaa ottaa huomioon. Tällöin on ehkä mielekkäämpää pohtia, mitä käytetyllä energialla varsinaisesti saadaan vastineeksi eli mikä on käytetyn energian panos-tuottosuhde. Energiatehokkuus voidaankin käsittää hieman laajemmin esimerkiksi kuvassa 14 esitetyllä tavalla. [43]



Kuva 14. Energiatehokkuuden laajennettu käsitys [43]

Tällöin energiatehokkuus käsitteenä saa laajemman merkityksen ja sen voi nähdä yhtenä keskeisimmistä ohjureista niin rakennu- kuin käyttövaiheessa. Oleellista on se, mitä tietoa halutaan kerätä, mitä kyseisen tiedon saamiseen pitää mitata ja mikä on paras mittaristo sille. Tämän vuoksi energiatehokkuudelle kannattaa aina tapauskohtaisesti pohtia sopivimmat mittaristot ja tiedostaa, mitä kukin indikaattori ottaa huomioon. Energiatehokkuuden mittarina voidaan käyttää esimerkiksi seuraavanlaisia suureita:

- kWh/m<sup>2</sup> tai kWh/m<sup>3</sup>
- kWh/käyttötunnit
- kWh/hlö
- kWh/hlö/käyttötunnit
- CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> (käyttö ja sitoutunut)
- tai jokin muu.

Samaista mitattavuuden haastetta on pohdittu myös tieteellisissä artikkeleissa. Esimerkiksi Suomessa suoritetussa tutkimuksessa [44], jossa vertailtiin samana aikakautena

rakennettuja espoolaisia kouluja ja päiväkoteja ja niiden energiankulutusta, huomattiin että vaihtelut kulutuksen suhteen ovat melko suuria. Ongelmaksi koettiin juuri perinteinen kulutustavan mittaaminen ilman, että huomioitiin esimerkiksi eri kohteiden käyttöasteita tai käyttäjämääriä. Tällöin koulu, joka oli yhtä energiatehokas kuin muutkin koulut, mutta jonka käyttöaste oli korkeampi kuin muilla tutkimuksen kouluilla, näyttöä muita kohteita vähemmän energiatehokkaana. Yhdeksi tutkimuksen keskeiseksi huomioksi nousi se, että kiinteistöjen omistajien olisi hyvä kiinnittää huomioita myös kiinteistön käyttöasteeseen energiatehokkuutta mietittäessä. Kiinteistö, jonka käyttöaste on korkea ja käyttäjämäärät suuria, on käytön osalta viisaasti optimoitu ja energiatehokkaampi kuin samanlainen kiinteistö, jonka käyttöaste on matala. Molemmissa tapauksissa kiinteistöjä joudutaan kuitenkin ylläpitämään ja juoksevia kuluja syntyy koko ajan. [44, s. 125–131.]

Yksi esimerkki tällaisesta yrityksestä, joka huomioi omassa toiminnassaan tilojensa optimaalisen käyttöasteen, on yhdysvaltalainen WeWork. Se tarjoaa työskentelytilaa 12 maassa yhteensä yli 100 toimipisteessä. Yrityksen käytössä oleva kiinteistömassa tarjoaa valtavasti tietoa tilojen käyttöasteesta ja käyttäjien tyytyväisyydestä tehtyihin ratkaisuihin, jota voidaan hyödyntää tilaratkaisujen ylläpidossa. WeWork hyödyntää tietolähteinään sisäilman olosuhdeantureita, sisätilapaikannusta ja havainnointia sekä käyttäjäkyselyitä. Saadun tiedon avulla tehostetaan tilojen käyttöä, luodaan viihtyisämpiä tiloja ja muutetaan joustavasti esimerkiksi neuvottelu-, keskittymis- ja vuorovaikutustilojen määrää tarpeen mukaan. Käytännön kokemusten kautta saatua tietoa voidaan edelleen hyödyntää saneerattavien sekä uusien kohteiden suunnittelussa ja toteuttamisessa. [45; 46.]

## 6 Rakennusautomaatio 2.0

Rakennusautomaation merkitys nykypäivän korjaus- ja uudisrakentamisessa kasvaa jatkuvasti. Sen roolia energiatehokkuuden parantamisessa ja hyvien sisäolosuhteiden ylläpitämisessä ei voida kiistää. Lisäksi digitalisaatio tuo mukanaan alalle koko ajan uusia soveltamismahdollisuuksia. Toisaalta vanhan haasteet, kuten rakennusautomaation toimintahäiriöt ja liian monimutkaiset käyttöliittymät, eivät ole kadonneet mihinkään. Lisäksi rakennusten ja koko yhteiskunnan lisääntynyt sähköistyminen tuo uusia haasteita, kuten sähkönkulutuksen tehopiikkien tuomat ongelmat, joihin automaation ja tulevaisuuden älytalojen pitää pystyä vastaamaan. Seuraavissa luvuissa on hahmoteltu rakennusautomaation, rakennusten ja kokonaisten kaupunkien tulevaisuutta ja merkitystä niin yhteiskunnallisella kuin globaalilla tasolla.

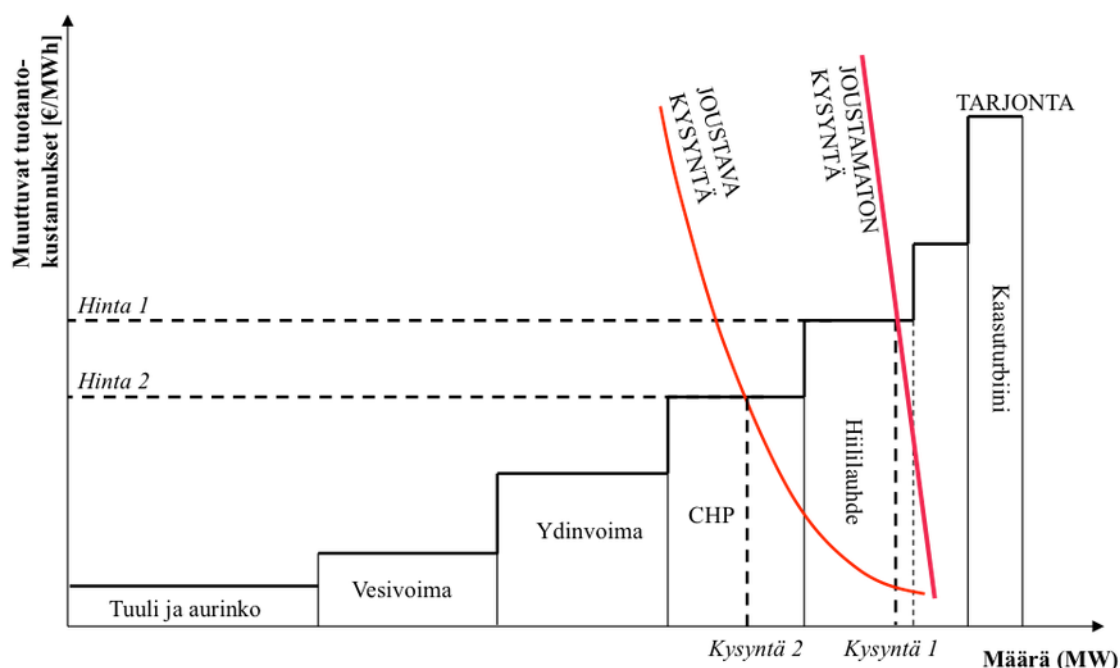
### 6.1 Huipputehon leikkaus

7.1.2016 kello 17–18 Suomen sähkönkulutuksen tuntikeskiteho nousi uuteen ennätykseen 15 105 MW:n tasolle. Tämä tuskin jää viimeiseksi ennätyspiikiksi, sillä Suomessa tullaan lähivuosina varsin suurella todennäköisyydellä saavuttamaan vielä monta uutta vastaavanlaista tehopiikkiä [47]. Näin tulee käymään, vaikka sähkönkulutus ei enää vuositasolla kasvaisi. Tulevaisuudessa sekä sähkön tuotannon vaihtelu että hetkellinen tehontarve tulevat todennäköisesti kasvamaan entisestään. Yhtenä selittävänä tekijänä on se, että ilmastoneutraalimpaan energiajärjestelmään siirtyminen merkitsee yhä suurempaa yhteiskunnan sähköistymistä. Tämän vuoksi sähkö ja sähköteho ovat kehittyville yhteiskunnille entistä tärkeämpiä asioita, joita vastaisuudessa pitää pystyä hallitsemaan ja tarvittaessa myös rajoittamaan.

Sähköjärjestelmää on ohjattava aiempaa vahvemmin teho- eikä enää vain energiapohjaiseksi niin markkinan ja verkon hallinnan kuin myös kulutuksen ja kuluttajahinnoittelun osalta. Tässä onnistumisessa kysyntäjoustoilla on tärkeä rooli. Millainen sähkön tai muun energian käyttäjä kohde on, ei yksin selviä energian käytön kokonaiskulutusta tutkimalla. Näin ollen kuluttajien tehoprofiilit eli se, kuinka paljon ja milloin energiaa hetkellisesti käytetään, tulee olemaan tulevaisuudessa keskeinen tieto huipputehojen säätämisessä. Suomessa rakennusten osuutta sähkönkulutuksen tehopiikkeihin on saatettu aliarvioida. Rakennukset ovat kuitenkin kokonaisuuden kannalta merkittävä kuluttaja,

minkä vuoksi niiden sähkötehtötarpeen huomioiminen tulee olla aiempaa keskeisempänä osana energiapolitiikkaa. Jatkossa tehopiikkiongelmien hallintaan voivat auttaa erilaiset energian varastointijärjestelmät, joissa rakennuksilla on keskeinen rooli kulutusta tasaavana ja varastoivana kokonaisuutena. Varastojen avulla huippukapasiteettia voidaan leikata, ylläpitää korkeampaa omavaraisuusastetta ja ohjata kulutusta edullisemmille tunneille. [48, s. 1–2, 7, 10.]

Smart Energy Transition Oy on Suomen Akatemian strategisen tutkimusneuvoston rahoittama hanke. Smart Energy Transition Oy:n mukaan kysyntäjoustopot hyödyttäisivät kaikkia sähkökäyttäjiä laskemalla jokaisen sähkökäyttäjän hintoja. Kuvassa 15 on avattu sähköenergian markkinahinnan muodostumista ja kysynnän juostavuuden vaikutusta siihen.



Kuva 15. Sähköenergian markkinahinnan muodostuminen ja kysynnän joustopot vaikutus [49].

Sähkön hinta tukkusähkömarkkinoilla määräytyy tuotannon ja kulutuksen perusteella osto- ja myyntitarjousten mukaan. Markkinahinnan muodostumiseen vaikuttaa myös kalteimman tuotantomuodon marginaalihinta. Jos kulutusta siirrettäisiin edullisemmille tunneille, kulutuksen painoarvo hinnanmuodostuksessa kasvaisi. Kysynnän pienentyessä hinta laskisi silloin kaikilla asiakkaila, ei ainoastaan kulutustaan pienentäneillä. Jotta kyseinen tilanne olisi käytännössä mahdollinen, tämä edellyttäisi nykyistä dynaamisempaa hinnoittelua sekä teho- tai kapasiteettimaksuja. Kysyntäjoustopot avulla voitaisiin samalla

myös edistää energiajärjestelmän resurssitehokkuutta, luotettavuutta ja pienentää kustannuksia. Lisäksi se vähentäisi kaikkein saastuttavimpien energiatuotantomuotojen käyttöä, edesauttaisi uusiutuvien energioiden integrointia ja vahvistaisi kuluttajan roolia sähkömarkkinoilla. Smart Energy Transition Oy:n mukaan jousto voitaisiin toteuttaa pääosin automaation avulla, jolloin kiinteistön omistajan aktiivisuutta tarvittaisiin lähinnä investointipäätöksissä. [49]

Vaikka rakennusten energiatehokkuus on viime vuosikymmenen aikana parantunut merkittävästi, eivät niiden energiankulutuksen tehopiikit ole kuitenkaan laskeneet samassa suhteessa. VTT:n [50] tekemässä tutkimuksessa vertailtiin Helsingissä sijaitsevia, yksikerroksisia matalaenergiataloja (omakotitaloja) perinteisiin taloihin verrattuna lämmityksen energiatehokkuuden ja tehopiikkien suhteen. Tutkimuksen mukaan lämmityksen energiatehokkuus oli matalaenergiataloissa 55–62 % parempi kuin perinteisissä taloissa mutta huipputehotarpeessa ero oli vain 28–34 %. Lisäksi matalaenergiatalojen tehopiikki oli suhteessa jyrkempi, vaikka itse tehontarve oli pienempi. Tutkimus osoittaa sen, että energiatehokkaiden rakennusten huipputehontarve on pienentynyt mutta se ei ole muuttunut samassa suhteessa kuin mitä energiatehokkuus on parantunut. Tämä on seikka, johon tulisi vastaisuudessa kiinnittää entistä enemmän huomioita. Ohjauskeinoina tutkijat ehdottavat sähkönhinnan korotuksia huipputehon aikana sekä lämmityksen- ja jäähdytyksen varastointia. [50, s. 235–236, 244–245]

Tuleva suunta tutkimusten ja nykytilanteen valossa on se, että rakennusten huipputehon tarvetta pitää pystyä tulevaisuudessa rajoittamaan. Kiinteistön omistajia tullaan ohjaamaan siihen rahallisin keinoin, olivat ne sitten sähkön hinnan vaihtelu kulutuksen mukaan, kannustimet energian varastointiin ja vapaaehtoiseen joustoon huipputehojen aikaan tai jotain muuta. Huipputehon rajoituksiin ja kulutusjoustoon pyrittäessä automaatiolla on siinä onnistumiseen todella ratkaiseva rooli. Uusimpien tutkimusten [51; 52] perusteella huipputehon leikkaaminen nykyisillä älykkäillä järjestelmillä on jo mahdollista ilman, että se merkittävästi tai jopa lainkaan vaikuttaa rakennusten sisäolosuhteisiin. Älykkeitä järjestelmiä käyttämällä pystytään samalla myös parantamaan rakennuksen energiatehokkuutta, pitämään paremmin yllä haluttuja sisäolosuhteita sekä muuttamaan niitä käyttäjän tarpeiden mukaan. [51; 52.]

Myös kaukolämmöllä on tärkeä rooli kysyntäjoistossa tasaavana puskurina. Aalto-yliopiston ja Sitran ohjaaman energiaraportin mukaan suurten kaupunkien kaukolämpöver-



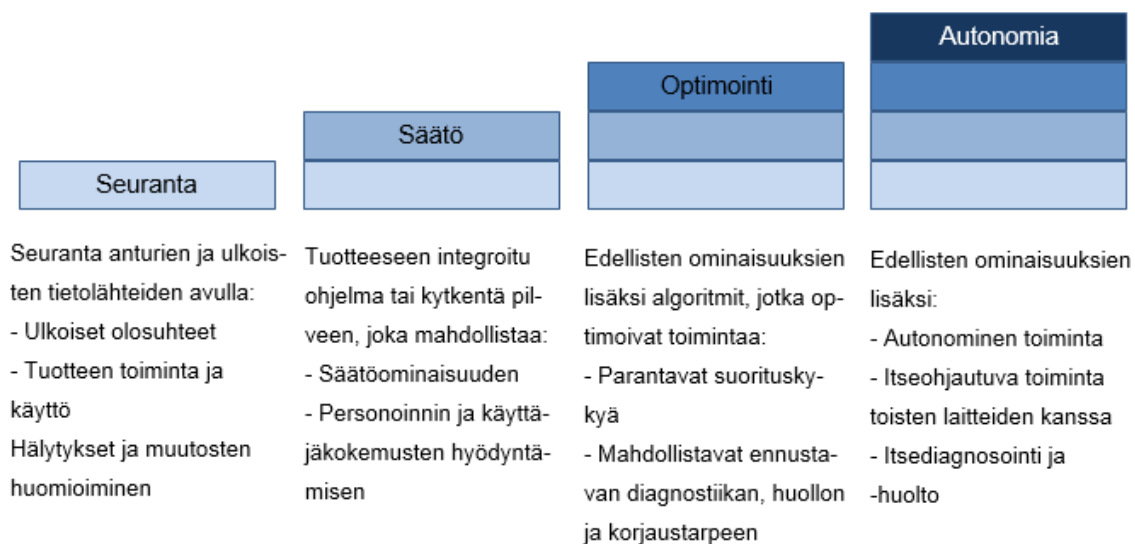
kot pitäisi avata Suomessa kilpailulle lähivuosina. Työryhmän mukaan se nopeuttaisi kivihiilen alasajoa, ja samalla kaukolämpö- ja kaukojäähdytysverkot kehittyisivät kaksisuuntaisiksi. Tällöin esimerkiksi taloyhtiöt sekä data- ja kauppakeskukset voisivat myydä ylijäämälämpöään verkkoon. Se onnistuisi varsinkin energiatehokkailta kiinteistöiltä, jotka tuottavat itse lämpöä esimerkiksi lämpöpumpuilla ja aurinkokeräimillä. Energiaraportin mukaan keskeisiä ratkaisuja kivihiileen pohjautuvan kaukolämmön muuttamisessa kohti vähäpäästöisempiä energiamuotoja ovat muun muassa rakennusten energiatehokkuus ja juostava kulutus. [53] Samalla kun hajautettu ja uusiutuva energiantuotanto lisääntyy, kaukolämpöyhtiöiden perustulot pienenevät mutta kiinteät kulut, kuten jakeluverkoston ylläpitäminen, pysyvät entisellään. Lisäksi huipputehon tarvetta varten kaukolämpöyhtiöillä pitää edelleen olla varavoimaa. Tämä hankala yhtälö aiheuttaa nostopaineita hintoihin eritoten kaukolämmön perusmaksussa, johon kiinteistön huipputehon tarve vaikuttaa merkittävästi. Siksi kaukolämpöyhtiöiden olisi myös taloudellisessa mielessä järkevää panostaa ja miettiä eri keinoja kaukolämmön tehopiikkien leikkaamiseen, jotta he voisivat vähentää kallista ja saastuttavaa varavoimareserviään.

## 6.2 IoT- ja LP-WAN-tekniikat

Esineiden internet (Internet of Things, IoT) tarkoittaa internet-verkon laajentumista laitteisiin. Gartnerin [60] mukaan esineiden internetin perusta muodostuu laitteista, jotka viestivät tai toimivat älykkäästi verkossa. Verkko koostuu tietoliikenneyhteydestä, ohjelmistoista ja antureista. Sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi niin, että eri työvaiheita voidaan ennakoida tai täysin automatisoida jalostamalla palveluiden, prosessien ja älykkäiden teknisten laitteiden tuottamaa jatkuvaa tietovirtaa. [60] Esineiden internet toimii periaatteessa laitteiden välillä. Tämän lisäksi tarvitaan silti myös ihmiskäyttöliittymiä (human interfaces), joiden avulla ihminen saadaan kytketyksi osaksi tietovirtaa. Yksinkertainen käyttöliittymä voi olla esimerkiksi mittari, joka tuottaa analogista tai numeerista dataa ja jonka tietoa ihminen käyttää päätöksenteon pohjatietona. Kaupunkia tai rakennusta kuvaavat digitaaliset 3D-tilamallit ovat esimerkkejä visuaalisesti pitkälle viedyistä ratkaisuista.

Melkeinpä mikä tahansa yksilöllisen tunnusteen omaava asia, joka on tietoverkossa, voi olla esine tai laite eli thing. Se kerää informaatiota ja siirtää sitä toiselle laitteelle tietoverkon kautta. [61, s. 32.] Oleellista esineiden internetissä on se, mitä nämä internetiin kytketyt eri laitteet ovat kykeneviä tekemään. Porter ja Heppelmann [62] ovat luokitelleet

nämä kyvykkyydet neljälle eri tasolle, jotka rakentuvat toistensa päälle ylöspäin siirryttäessä. Nämä eri tasot ovat seuranta (monitoring), säätö (control), optimointi (optimization) ja autonomia (autonomy). Mitä ylemmälle tasolle edetään, sen vähemmän ihmistä ja sen väliintuloa tarvitaan. [62] Tasot on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Tietoverkkoon kytkettyjen, älykkäiden laitteiden eri tasot ja ominaisuudet [62].

Esineiden internet tuo paljon mahdollisuuksia rakennusten energiatehokkuuden seurantaan ja optimointiin. Se mahdollistaa joko yksittäisten laitteiden tai isompien laiteryhmiä tarkkan ja jatkuvan seurannan, jonka avulla voidaan esimerkiksi havaita laitteita tai poikkeamia laitteiden toimintamalleissa, jotka aiheuttavat ylimääräistä sähkönkulutusta. Lisäksi nykypäivänä on jo olemassa älykkäitä laitteita, jotka osaavat itsenäisesti ilmoittaa mahdollisesta huollon tarpeesta tai rikkoutumisesta. Kun nämä hälytysominaisuudet yhdistetään älykkääseen hallinnointiohjelmaan, voidaan huoltotoimenpiteet toteuttaa kii-reellisyysjärjestyksessä käytössä olevat resurssit optimoidusti hyödyntäen. Tulevaisuudessa älykkäät, autonomiset laitteet voivat myös itse suorittaa optimoinnin ja toteuttaa koko energiantehokkuustoimenpiteen huolehtien samalla huollosta. [61, s. 71, 77.]

Tulevaisuuden visioissa usein kuvaillaankin, miten internetiin kytketään kymmeniä miljardeja antureita ja laitteita, jotka mahdollistavat ja luovat täysin uudenlaisia ratkaisuja. Yleensä tällöin on sivutettu se tosiseikka, että tämä ei välttämättä ole edes mahdollista. Suurin haaste on kyseisten laitteiden käyttämä yleinen mobiiliverkko ja sen rajallisuus. Mobiiliverkot on lähtökohtaisesti suunniteltu kuluttajille, jotka nykypäivänä vaativat verkoilta jatkuvasti parempaa suorituskykyä ja isompia tiedonsiirtonopeuksia. Laitteiden ja

antureiden kytkeminen tähän verkkoon ei ainakaan paranna sen toimivuutta. Tämän vuoksi langattomat IoT-laitteet on pitänyt varustaa suurikokoisilla akuilla sillä seuraamuksella, että se pitkälti tuhoaa esineiden internetin idean, joka pohjautuu valtavaan joukkoon pieniä ja huomaamattomia antureita. IoT-laitteiden tarpeisiin kehitetyistä Low Power Wide Area Network (LP-WAN) -teknologioista, joista tällä hetkellä lupaavimmat ovat Narrow Band-IoT (NB-IoT) ja Long Range (LoRa), voi kuitenkin löytyä ratkaisu tähän ongelmaan. [63]

NB-IoT tarjoaa perinteiseen mobiiliteknologiaan verrattuna monia merkittäviä etuja, joista yksi keskeisimmistä on laitteiden energiatehokkuus. Kun laitetta ei käytetä, se menee lepotilaan. Tämä pidentää akun kestoa huomattavasti. Lisäksi valitut komponentit, joita laitteissa käytetään, ovat juuri kyseiseen tarkoitukseen optimoituja. Tällaiset IoT-laitteet ovat edullisia, pieniä ja niiden akut kestävät helposti 5–10 vuotta, mahdollisesti jopa pidempään. Se säästää sekä energiaa että akun vaihtoon liittyvää työtä ja avaa näin entisestään uusia liiketoimintamahdollisuuksia. Toinen keskeinen etu on se, että laitteet käyttävät huomattavasti yksinkertaisempaa radiotekniikkaa kuin nykyiset mobiililaitteet.

Kiinteistöt ovat hyvä esimerkki kohteesta, joissa tämän uuden teknologian mahdollistamia palveluja tullaan hyödyntämään tulevaisuudessa entistä enemmän. Sensoreiden avulla voidaan muun muassa mitata rakenteiden kosteutta, sisäilman olosuhteita sekä rakennuksessa olevien ihmisten liikkeitä ja käyttäytymistä. Mittaustuloksia lähettävien laitteiden hyödyntäminen ei tähän asti ole ollut taloudellisesti välttämättä järkevää, vaikka nykyteknologia on mahdollistanut sen ja monet muut palvelut. Erinäisissä pilotti-hankkeissa on kehitetty esimerkiksi etäluettavia vesi- ja kaasumittareita, joiden akut kestävät 12 vuotta, joka on usein myös itse laitteen tekninen käyttöikä. Teollisuuteen on rakennettu antureita, jotka seuraavat laitteiden kuntoa. Tällöin pystytään ennakoimaan huoltotarpeet ja estämään yllättävät hajoamiset. Modernit anturit osaavat myös kerätä ympäristöstään toimintaansa vaativaa energiaa, jolloin niiden virta ei teoriassa pääse välttämättä loppumaan koskaan. Tämä osaltaan mahdollistaa entistä laajempien anturi-verkkojen rakentamisen ja kustannustehokkaan hyödyntämisen. NB-IoT voi siis luoda valtavia mahdollisuuksia. Yhtenä syynä siihen on se, että NB-IoT on avoin standardi, jonka vuoksi sen kattavuus kasvaa nopeasti ja markkinoille tulee paljon eri laitevalmistajia. Se kiihdyttää ja lisää kilpailua ja volyymejä näin pudottaen hintoja. Esimerkiksi Ericsson on arvioinut, että verkkoon kytkettyjen laitteiden määrä tulee nousemaan 30 miljardiin seuraavan viiden vuoden aikana. [64, 65, 66]

Uusimmissa tieteellisissä julkaisuissa [63; 67; 68] on tutkittu alan johtavina LP-WAN -teknologioina pidettyjä NB-IoT:a ja LoRa:a. Tutkimukset ovat osoittaneet, että molemmat teknologiat ovat toimivia ja ne tulevat lisäämään IoT-laitteiden ja -palvelun määrää kiihdyvällä tahdilla. Sinhan ym. [63] tutkimuksessa arvioidaan verkkoon kytkettyjen laitteiden määrän nousevan 25 miljardiin vuoteen 2020 mennessä. Tämän tutkimuksen mukaan sekä NB-IoT:llä että LoRa:lla tulee olemaan oma roolinsa IoT-markkinoilla. NB-IoT:n etuina voidaan pitää ohjelmiston käyttäjäystävällisyyttä, matalaa viivettä, luotettavuutta ja parempaa kantamaa. LoRan etuina voidaan pitää vieläkin parempaa akunkestoa, kapasiteettia ja alhaisempaa hintaa. NB-IoT:n oletetaan yleistyvän sovelluksissa, jotka vaativat käyttäjäystävällisyyttä sekä matalaa viivettä. LoRan nähdään soveltuvan paremmin yleisesti halvemman hintaluokan sovelluksiin. [63, s. 20.]

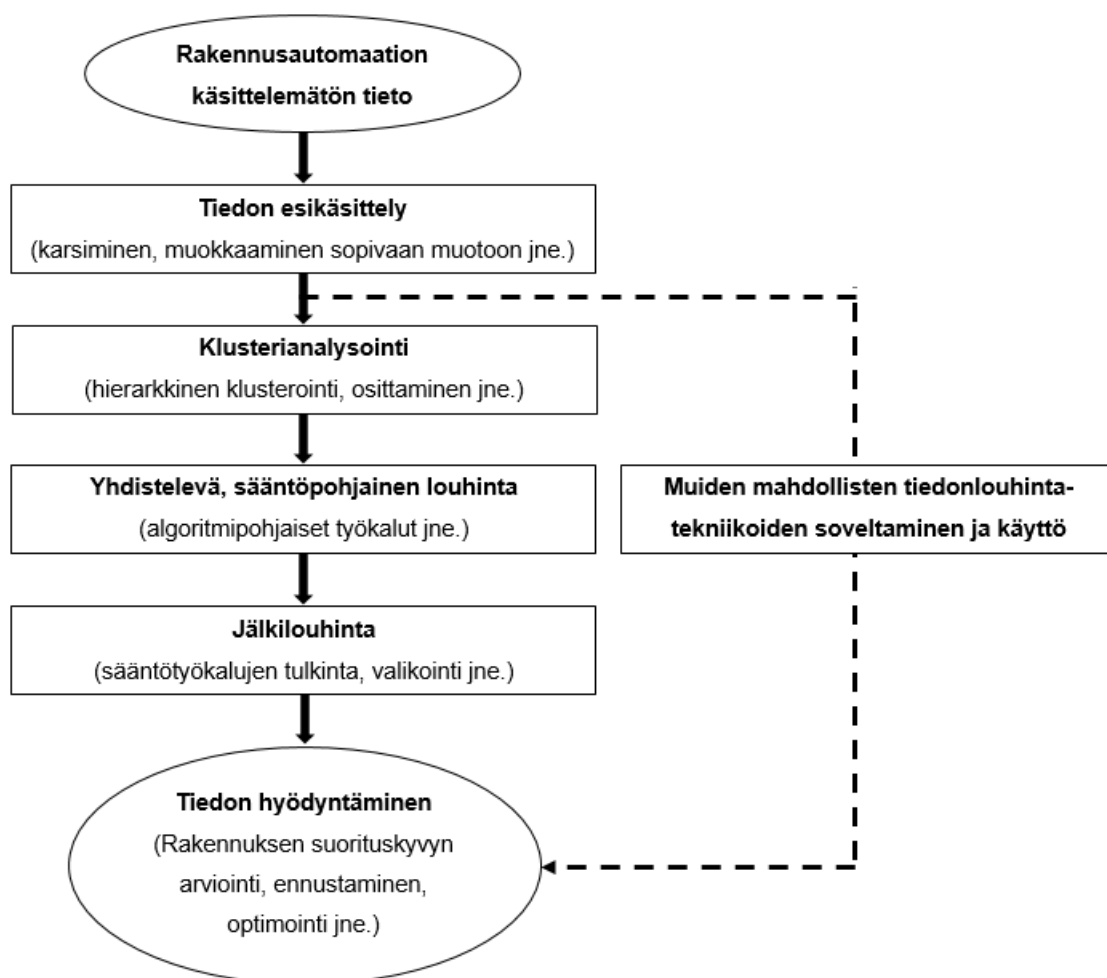
### 6.3 Big Data

Nykyiset rakennusautomaatiojärjestelmät tarjoavat valtavan määrän tietoa rakennusten toiminnoista. Rakennukset eivät ole kehittymässä pelkästään entistä energiatehokkaammiksi, vaan myös entistä informaatiotehokkaammiksi niistä saatavien suurien tietomäärien vuoksi. Valitettavan usein suurin osa tästä tiedosta jää kuitenkin hyödyntämättä. Tähän on olemassa ainakin kaksi keskeistä syytä: mahdollinen tiedon heikkotasoinen laatu tai epärelevanttius ja tehokkaiden analysointityökalujen puute. Rakennusautomaatiojärjestelmät pystyvät lähtökohtaisesti tuottamaan yksinkertaisia analyyskejä ja visuaalisia esityksiä kuten historiatrendejä ja poikkeamien aiheuttamia hälytyksiä. Ne eivät kuitenkaan osaa käsitellä ja analysoida näitä valtavia tietomääriä tehokkaasti. [55, s. 109.] Viime vuosina rakennusautomaatiosovelluksiin on ollut mahdollista saada entistä kehittyneempiä ohjelmistoja ja analysointityökaluja. Kaikesta huolimatta nämä ohjelmat pystyvät lähtökohtaisesti hyödyntämään vain rajallista määrää tarjolla olevasta tiedosta, jota enimmäkseen hyödynnetään eri säätöjen tarkentamisessa tai ohjelmien osissa. Tällöin tietoa, joka voisi olla rakennuksen kokonaisuuden kannalta hyvinkin relevanttia, jää käyttämättä. [56, s. 81.]

Termillä Big Data viitataan massiivisten tietomäärien keräämiseen useista eri lähteistä sekä tämän kerätyn tiedon jalostamiseen ja analysointiin. Rakennusten osalta Big Dataa voidaan käyttää esimerkiksi aiempaa tehokkaampien ja tarkempien säätöjärjestelmien ja -ohjelmistojen kehittämiseen. Toisaalta Big Datan käytön soveltamismahdollisuudet ovat lähes rajattomat, sillä isojen tietomassojen yhtenä keskeisenä etuna on se, että ne

mahdollistavat uudenlaisten asiayhteyksien löytämisen, joita ei ole aikaisemmin havaittu ja joita ei muilla keinoilla pystyttäisi helposti havaitsemaan. [54, s. 8–11.] Suurten tietomäärien eli Big Datan käsittelyssä niin sanottu tiedon louhiminen (data mining, DM) on tehokas keino käyttämättä jäävän tiedon löytämisessä ja analysoimisessa. Tiedon louhimista hyödynnetään jo laajalti esimerkiksi finanssi- ja terveysalalla. Nykypäivänä on olemassa paljon erilaisia, toimivaksi havaittuja tietojenkäsittelytekniikoita, joita voitaisiin käyttää entistä tehokkaammin myös monilla muilla aloilla, kuten esimerkiksi rakennus- alalla. [55, s. 110.] Xiao ja Fan [55] ovat tutkimuksessaan esittäneet yleisen tiedonlouhimismallin, joka koostuu viidestä eri osa-alueesta: tiedon esikäsittelystä (data preparation), klusterianalyseistä (clustering analysis), yhdistelevästä, sääntöpohjaisesta louhinnasta (association rule mining), jälkilouhinnasta (post-mining) sekä tiedon hyödyntämisestä ja soveltamisesta (application of discovered knowledge). Tämä prosessi on esitetty kokonaisuudessaan kuvassa 17.

Tiedon esikäsittelyssä tarkoituksena on siivota, karsia ja muuttaa tietoa sellaiseen muotoon, että se on paremmin hyödynnettävissä varsinaista louhintaa varten. Ideana on saada tieto laadullisesti paremmaksi ja näin entistä luotettavammaksi lähdeaineistoksi. Klusterointi- eli ryhmittelyanalyysissä suuria tietoaaineistoja luokitellaan ennalta määriteltuihin ryhmiin. Tarkoituksena on identifioida rakennuksen tyypilliset, toiminnalliset kaavat sekä samalla parantaa tiedon luotettavuutta lisää. Yhdistelevässä, sääntöpohjaisessa louhinnassa pyritään löytämään niin sanottu piilossa oleva tieto määriteltujen sääntömuotojen puitteissa. Jälkilouhintavaiheessa pääpaino on näiden eri analysoinneissa käytettyjen sääntöjen ja jaottelujen tulkitsemisessä ja niistä kyseiseen tutkittavaan tapaukseen parhaiten soveltuvien työkalujen valitsemisessä. Samalla pystytään selventämään, mitkä eri säännöt ja jaottelut ovat kaikkein hyödyllisimpiä oleellisen tiedon löytämiseksi. Viimeisessä vaiheessa louhittua, informatiivista tietoa hyödynnetään rakennuksen toiminnollisuuksien, kuten energiatehokkuuden ja sisäolosuhteita parantamiseen. [55, s. 110, 117.]



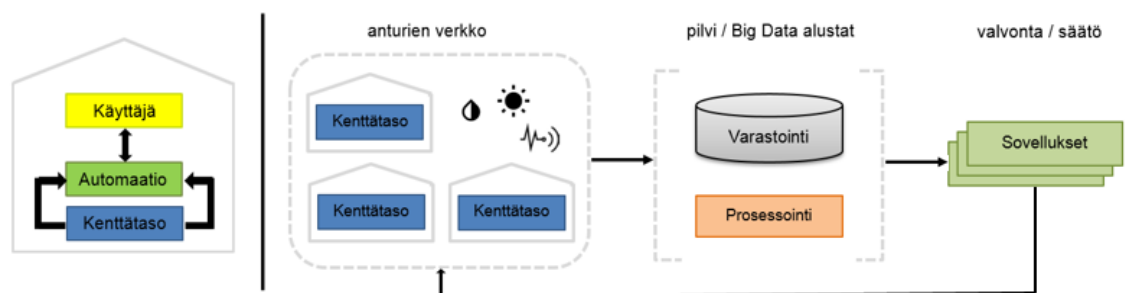
Kuva 17. Tiedon louhinta ja sen eri vaiheet [55, s. 111].

Tiedon louhinta on käytetty onnistuneesti rakennuksien tiedon käsittelyyn eri tutkimuksissa. Esimerkiksi Millerin ym. [57] tutkimuksessa tutkimuskohteen rakennuksesta pystyttiin eri mitta-antureista saadun tiedon ja siitä toteutetun tiedon louhinnan perusteella löytämään virheitä rakennusautomaation ohjauksista ja säätöjärjestelmistä. Rakennusta käyttävä henkilökunta pystyi tämän jälkeen tekemään tarkemmat analyysit vikailmoituksesta ja luomaan niistä halutessaan hälytyksiä järjestelmään. Tällöin ilmoitus tulisi vastaisuudessa automaattisesti määriteltyjen hälytysparametrien puitteissa, jos virhe pääsisi tapahtumaan uudelleen. Tämän tyyppinen virhepisteiden luominen voisi vastaisuudessa yhtä hyvin tapahtua myös automaattisesti, jolloin ihmisen inhimillisen erehtymisen riski ja ylimääräinen ajankäyttö voitaisiin karsia pois. [57, s. 15.]

Tiedon louhinnan käytöstä rakennusten analysoinnissa on löydetty hyötyä ainakin ennustettavuudessa, virheiden löytämisessä ja diagnosoinnissa sekä säätöjen optimoinnissa. Toisaalta sen käytössä on myös paljon haasteita. Yksi keskeisimmistä haasteista

on se, että tiedon louhinnasta saatava tieto itsessään ei pysty määrittelemään löytämänsä tiedon arvoa tai merkitystä. Sen vuoksi kehitystyötä tarvitaan vielä paljon käytännön sovelluksille, jotka pystyvät itsenäisesti tekemään tulkintoja ja pidemmälle vietyjä johtopäätöksiä. [56, s. 82.] Lisäksi minkä tahansa tietopohjaisen lähestymistavan kanssa, tiedon oikeellisuus ja sitä kautta sen käyttökelpoisuus on yhtä hyvää kuin mitatun ja käytetyn tiedon laatu. Tämän vuoksi tiedon laatuun ja oikeellisuuteen pitää kiinnittää erityistä huomiota. Kyseisen seikan rinnalla haasteeksi nousee myös se, että analyysityökalut eivät konkreettisesti pysty tunnistamaan rakennuksen fyysisiä ominaisuuksia ja järjestelmiä vaan ainoastaan tulkitsemaan antureista saatavaa, vieläpä mahdollisesti epäluotettavaa mittaustietoa. [57, s. 16.] Tietomäärien kasvaessa entistä massiivisemmat tietomäärät tuovat myös osaltaan haasteita. Big Datan hyödyntämisessä keskeisessä roolissa ovat tietokoneet, jotka hoitavat tiedon keruun ja louhinnan. Toisaalta tekniikan näkökulmasta tämä voidaan ratkaista käyttämällä korkean suorituskyvyn omaavia, alati kehittyviä laskentakoneita ja pilvipohjaista tietojenkäsittelyä. Sopivat tietojen muunnosmenetelmät ja tehokkaammat tiedonlouhinta-algoritmit voivat myös tarjota vaihtoehtoisia ratkaisuja. [58, s. 87.]

Linderin ym. [59] mukaan rakennusautomaatio on siis yhä enenevässä määrin siirtymässä perinteisestä muodosta kohti avointa Big Data-mallia, jolloin on kuvaavampaa puhua rakennusten verkosta (web of buildings). Kuvassa 18 on vasemmalla puolella perinteisen rakennusautomaation ja oikealla puolella rakennusten verkon hierarkia.



Kuva 18. Perinteinen rakennusautomaatio vs. rakennusten verkko [59, s. 591].

Perinteinen rakennusautomaatio on yksittäinen ohjelma, joka hoitaa toimintoja rakennuksen sisällä. Se sisältää kolme eri perustasoa: kenttätason, automaation ja käyttäjän. Kenttätaso muodostuu toimilaitteista, jotka ovat yhteydessä fyysiseen maailmaan. Automaatiotasoa toteuttaa sääntöihin ja säätöihin pohjautuvia käskyjä, kun käyttäjätason teh-

täväksi jää hallinnoida näitä kahta muuta tasoa. Lisäksi kyseisessä järjestelmässä tallennuskapasiteetti on rajallinen eikä se pysty hyödyntämään ulkopuolista tietoa. Rakennusten verkko muodostuu rakennusten Big Datasta (Big Building Data), joka sisältää anturien verkosta saatavan tiedon, tiedon varastoinnin ja käsittelyn etäratkaisut sekä sovelluspohjaisen valvonnan ja säädön. Se mahdollistaa tiedon tallentamisen sekä yhdistämisen eri tietolähteistä uudella tasolla, esimerkiksi internetpalveluista ja muista internetiin kytketyistä antureista saatavilla olevat reaaliaikaiset sääennusteet ja -mittaukset sekä niiden välittömän hyödyntämisen rakennusten ohjauksessa ja säädöissä. Lisäksi suurten, pitkäaikaisten historiatietojen varastoiminen ja yleinen saatavuus luovat pohjan kehittyneempien matemaattisten mallien ja tekoälyn kehittämiseen sekä niiden hyödyntämiseen kaikissa rakennusten Big Dataan kytketyissä kohteissa. [59, s. 590.]

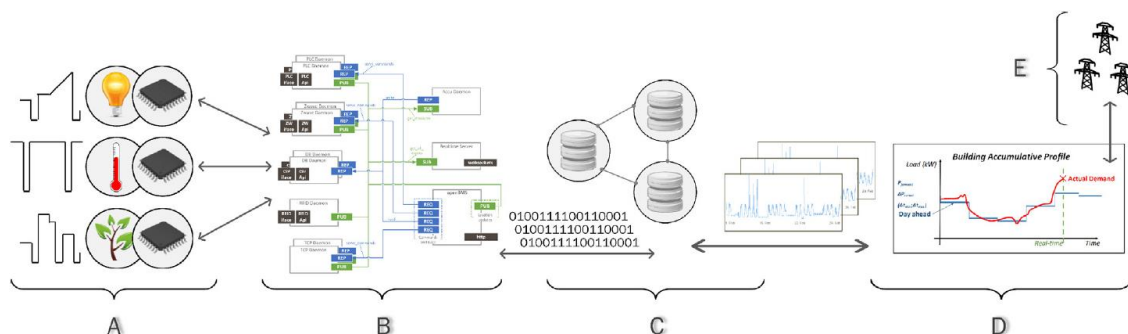
#### 6.4 Uusien teknologioiden yhteensovittaminen sekä niiden hyödyntäminen

Uudet teknologiat kuten Big Data, IoT, pilvitetokoneet (cloud computing) ja itsenäiset, langattomat seuranta- ja mittausanturit vievät yhdessä käytettynä älykkäitä rakennuksia (Intelligent Buildings, IBs) isoin harppauksin eteenpäin. Plageras ym. [69] tutkivat näiden neljän eri teknologian käyttöä rinnakkain älykkäissä rakennuksissa pyrkimyksenä yhdistää teknologiat niin, että ne muodostavat synergiaetuja keskenään. Mittaustiedon saamiseksi tutkimuksessa käytettiin IoT-pohjaisia, langattomia antureita. Näistä antureista saatua tietoa, Big Dataa, tallennettiin, hallinnoitiin ja käsiteltiin pilvipohjaisessa ympäristössä. Pilvipohjaisten ympäristöjen etuina voidaan pitää suurta tallennuskapasiteettia, matalampaa kustannustasoa, skaalautuvuutta, joustavuutta, kestävyyttä ja luotettavuutta. Lisäksi tiedon hallinnointi on helppoa missä ja milloin vain. Tutkimustulosten mukaan edelle mainitut teknologiat ovat älykkäiden talojen ohjauksessa ja energiatehokkuuden parantamisessa yhdessä enemmän kuin osiensa summa. Lisäksi rakennuksista saatava yleisin Big Datan muoto on esineiden internetissä olevien laitteiden tuottama tieto. Tämän vuoksi nämä kaksi teknologiaa ovat vahvasti keskinäisessä riippuvuussuhteessa, jolloin onkin parempi puhua IoT-Big Datasta. [69, s. 1, 7.]

Lilisin ym. tutkimuksen [70] mukaan siirtymistä älykkäisiin kaupunkeihin ja yhteiskuntiin ei voida tehdä ilman älykkäitä rakennuksia. Vanhat rakennusautomaatiojärjestelmät ovat palvelleet tarkoitustaan hyvin viimeiset vuosikymmenet, mutta nyt on aika antaa vuoro internetpohjaisille laitteille, joilla on potentiaalia tehdä läpimurto älykkäisiin kaupunkeihin siirtymisessä. Kuvassa 19 on esitetty älykkäiden rakennusten kaava (intelligent building



architecture) ja sen eri tasot, jotka ovat kytkettyinä globaaliin älysähköverkkoon. Nämä eri tasot mahdollistavat reaaliaikaisen kulutusmittauksen, -ohjauksen, -profiilin ja -ennusteen sekä älytalo- että kaupunkitasolla. Lisäksi ne ovat jatkuvassa vuorovaikutuksessa älysähköverkon kanssa reagoiden automaattisesti kaikki osa-alueet huomioiden ja optimoiden. [70, s. 478–480.]



Kuva 19. Antureista ja toimilaitteista älykkääseen verkkoon [70, s. 479].

A-tasolla on päätelaitteet (end devices), jotka koostuvat eri valmistajien toimilaitteista, antureista ja muista ohjauslaitteista. Niiden tarkoituksena on toimia rajapintana ihmisten toiminnolle sekä välittäjänä näiden toimintojen vaikutuksista kulutukseen. Ne tuottavat mittaustietoa algoritmeille, jotka säättävät ja optimoivat toimintoja. Energiankulutuksen mittaamisen ja hallinnoinnin suhteen on olennaista, että nämä laitteet ja anturit pystyvät mittaamaan älytaloissa olevien laitteiden tehokuormia.

B-tasolla on kuvattu keskitason ohjelmat (middleware), jotka vastaanottavat A-tasolta tullutta tietoa kuormituksista ja eri käyttöprofiileista sekä yhdistelevät näitä tietoja. Kyseinen taso mahdollistaa koko järjestelmän paremman suorituskyvyn sekä skaalautuvuuden. Samalla se mahdollistaa hallinnointi- ja säätöohjelmien eriyttämisen säätö- ja mittalaitteista. Lisäksi keskitason ohjelmat toimivat linkkinä ja yhteenliittymänä C-tason keskitetyille hallintapalvelimille. Kommunikointi näiden tasojen välillä perustuu kahteen peruseriaatteeseen: tapahtumapohjaiseen vuorovaikutukseen ja tiedonvälitykseen sekä sovelluspohjaisiin, mukautettuihin algoritmeihin. Jokainen toiminto on itsenäinen ja läpinäkyvä, mikä mahdollistaa eri tasojen luomisen sekä tiedonsiirron ja -irrottamisen toisistaan.

C-tasolla on rakennusautomaation keskittävä hallinnointi (centralized agent of BMS), joka on kokoava työkalu älyrakennuksista saatavan tiedon yhdenmukaiseen käsittelyyn.

Toimiakseen kyseinen taso vaatii luotettavan ja tehokkaan järjestelmän, joka pystyy keräämään, tallentamaan ja esikäsittämään eri laitteista saadun tiedon. C-tasolla tapahtuu tiedon louhinta ja analysointi, jotta kerätty ja varastoitu tieto saadaan hyödynnettyä kohdennetusti ja optimaalisesti kaikkia tahot huomioiden.

D-taso on niin sanottu energianhallinnointijärjestelmä (Energy Management System, EMS), joka säätelee energiankäyttöä, tuotantoa ja varastointia kysynnän mukaan.

E-taso muodostuu edelle esiteltyihin tasoihin liitetystä älysähköverkosta (smart grid interface). Se mahdollistaa älykkäiden rakennusten osallistumisen energiamarkkinoille luotettavalla ja ennustettavalla tavalla. Tieto kulkee järjestelmässä molempiin suuntiin huomioiden muun muassa sääennusteet, sähkön hinnan ja rajoittamismääräykset huipputehojen leikkaamiseen. [70, s. 478–480.]

Verrattuna perinteisiin rakennusautomaatiojärjestelmään, edelle kuvattu uusi teknologia luo monia etuja. Se mahdollistaa

- entistä halvemmat anturit, jotka osaltaan mahdollistavat taloudellisesti huomattavasti monipuolisemman mittauksen, olosuhteiden seurannan ja analysoinnin.
- käyttäjäprofiilin kehittämisen ja huomioonottamisen.
- paremmat edellytykset energian varastointiin ja sen tuomiin joustomahdollisuuksiin niin, etteivät nämä toimenpiteet näy käyttäjille.
- yksittäisten ihmisten tietoisuuden lisäämisen omasta energiankäytöstä ja hiilijalanjäljestä.
- sosiaalisten suunnitelmien nostamisesta päätöksenteon keskipisteeseen.
- hyvinvoinnin, elämäntapojen ja kuluttajien näkökulman huomioimisen, joka samalla lisää entisestään positiivista kiinnostusta, suhtautumista ja investointihalukkuutta älytaloja kohtaan.

Uusi, alhaalta ylöspäin suuntautuva, älykäs lähestymistapa sekä alati kehittyvien antureiden ja niiden tuottaman tiedon hyödyntämisen ansiosta energiatehokkuudessa voidaan saavuttaa ennen näkemättömiä parannuksia. Tällöin voidaan puhua kokonaisvaltaisesta, yhdistetystä ja laajamittaisesta energianhallinnasta, joka tuo mukanaan myös muita etuja ja lisäarvoa. Nämä kaikki automaation mahdollistamat tekijät voivat yhdessä luoda vihreämmän huomisen ja korkeamman elintason yhä suuremmalle joukolle ihmisiä

jo lähitulevaisuudessa, jos siihen keskitetään voimavaroja ja resursseja niin yritys-, kaupunki- ja valtiotasolla kuin globaalisti. [70, s. 476.]

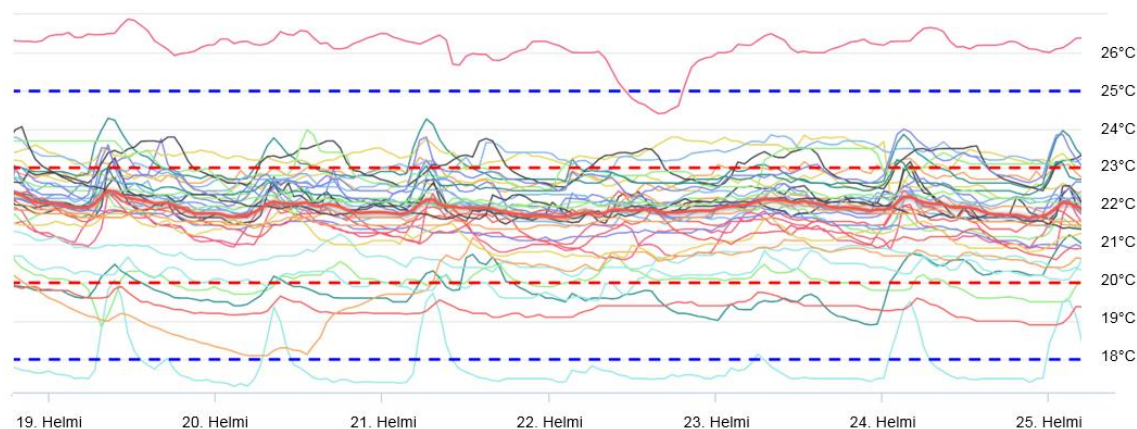
## 6.5 Uusien teknologioiden hyödyntäminen käytännössä

Ilman älykkäitä rakennuksia on toimivien älykaupunkien ja optimoidun energiankäytön ja -tuotannon toteuttaminen hyvin hankalaa. Tämän vuoksi teknologisen muutoksen on lähettävä aina asuntotasolta lähtien, kiinteistö kerrallaan. Noin 2,7 miljoonaa suomalaista asuu kaukolämmitetyissä taloissa ja lähes 95 % kerrostaloista on kaukolämmön piirissä. Se tarkoittaa lähes 50 % Suomen lämmitysmarkkinoista. [71] Asuinkiinteistöjen lämpöenergian käytön optimoinnilla ja ennustettavuudella sekä kulutuksen tehopiikkien leikkaamisella on suora vaikutus myös siihen, kuinka energiatehokasta ja optimoitua itse energiantuotanto on.

Uusimpien teknologioiden hyödyntäminen ei kiinteistöjen ylläpidossa ole vielä kovin yleistä, vaikka erilaisia palveluita on nykypäivänä yhä enenevässä määrin tarjolla. Esimerkiksi IoT-anturit mahdollistavat asuinkiinteistöissä asuntokohtaisen lämpötilamittauksen ilman kaapelointia, jolloin niitä voidaan helposti lisätä niin uudiskohteisiin kuin olemassa oleviin rakennuksiin. Lisäksi alati laskevat anturien hinnat mahdollistavat sen, että mittausdatan kerääminen on halpaa ja kannattavaa investointikustannuksiin nähden. Uusien palvelujen arvo ei kuitenkaan synny datasta, vaan älykkästä automatiikasta, joka pystyy muuttamaan kerätyn datan kiinteistön omistajien ja käyttäjien konkreettiseksi hyödyksi.

Kun asuntojen sisälämpötilaa seurataan reaaliajassa, voidaan perinteistä lämmityslogiikkaa muuttaa mielekkäämpään suuntaan. Yleensä rakennusten lämmitystä ohjataan ulkolämpötilasidonnaisen patteriverkoston menoveden säätökäyrän mukaan. Tällöin haasteeksi muodostuu usein se, että asuntojen todellisia lämpötiloja ei tiedetä, joka voi johtaa helposti koko rakennuksen yllämmittämiseen. Tämä korostuu erityisesti silloin, jos patteriventtiilit ja termostaatit ovat teknisen käyttöikänsä loppupuolella tai sen yli ja niiden toiminta ei ole enää suunnitellun mukaista tai kun verkostossa on joitain muita häiriöitä, jotka estävät sen normaalin toiminnan. Lisäksi lämmityksen säätökäyrää on saatettu aikojen saatossa nostaa useampaan otteeseen kylmyysvalitusten vuoksi eikä sitä ole muistettu palauttaa alkuperäisille asetuksille. Yhtenä selittävänä tekijänä ylläm-

pöön on myös asukkaiden tottumukset pitää termostaatteja täysin auki. Koska Suomessa lämmityskustannuksia ei kerrostaloissa jaeta asuntokohtaiseen kulutukseen pohjautuen kuten monissa muissa Euroopan maissa, ei se myöskään kannusta asukkaita säästämään lämmityskuluissa. Sen sijaan, kun kaikki asunnot ovat anturoituja ja niiden kautta saadaan reaaliaikaista tietoa lämpötiloista, voidaan lämmityksen logiikka kääntää toisin päin eli ohjata menoveden lämpötilaa asuntojen lämpötilojen suhteen. Tällöin rakennukseen voidaan asettaa haluttu tavoitekeskilämpötila, johon pyritään. Tavoitteena voi olla esimerkiksi 22 °C. Se tarkoittaa luonnollisesti samalla myös sitä, että osassa asunnoissa on keskiarvotavoitetta kylmempää ja osassa lämpimämpää. Kuvassa 20 on esitetty erään asuinkerrostalon lämpötiloja viikon mittausväliä helmikuussa 2018. Kyseistä rakennusta ohjataan Leanheat-säädöllä.

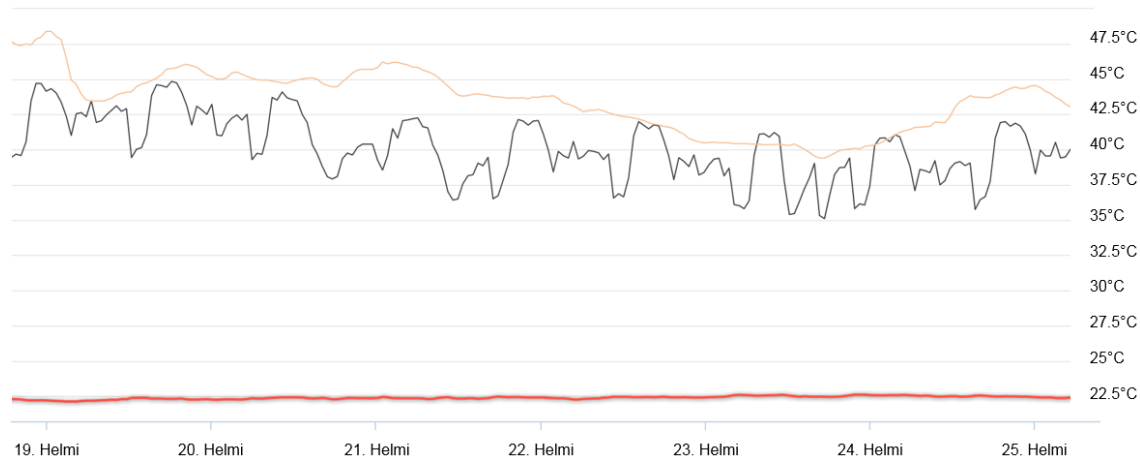


Kuva 20. Erään asuinkerrostalon asuntojen lämpötiloja sekä asuntojen keskiarvolämpötila [72].

Kuvassa jokainen käyrä kuvaa yhden yksittäisen asunnon sisälämpötilaa kulloisellakin ajanhetkellä. Punainen, paksumpi viiva kuvaa asuntojen keskiarvolämpötilaa. Sininen katkoviiva kuvaa S3 sisäilmaluokan lämpötilojen raja-arvoja ja punainen katkoviiva S1/S2 luokan raja-arvoja. Sisäilmaluokat auttavat hahmottamaan, ovatko asunnot hyvän sisäilman mukaisella välillä. Toisaalta ihmiset kokevat lämpötilat hyvin eri tavalla ja tämän vuoksi yhtä oikeaa sisälämpötilaa ei voida yksiselitteisesti määrittää. Kun asuntojen lämpötiloja on seurattu riittävän pitkään, jotta niistä pystytään tekemään luotettavia havaintoja, voidaan keskiarvosta selvästi poikkeavat asunnot poimia ja kohdentaa näihin tarvittavia huoltotoimenpiteitä. Jos kohdennettujen huoltotoimenpiteiden sijaan nostettaisiin vain asuntojen tavoitelämpötilaa, tai perinteisessä ohjauksessa säätökäyrää, nousisivat valmiiksi lämpimien asuntojen lämpötilat kylmiin asuntoihin nähden enemmän aiheuttaen samalla entisestään lisää lämpötilaepätasapainoa niiden välillä. Tämä melko perinteinen korjausratkaisu on kuitenkin epätehokas ja kallis, eikä se poista todellista

ongelman aiheuttajaa. Yleensä syy asuntojen ali- tai yllilämpöön löytyy melko helposti ja vaadittavien korjaustoimenpiteiden toteuttaminen ei ole kallista. Syynä asuntojen alilämpöön voi olla esimerkiksi jumiutuneet patteriventtiilit tai termostaatit, puutteelliset tiivisteet ikkunoissa tai epätasapainossa oleva ilmanvaihto. Syynä yllilämpöön voi olla esimerkiksi asukkaan tai huollon toimesta muutetut pattereiden suunniteltua isommat esisäätoarvot, puuttuvat termostaatit tai vajavainen ilmanvaihto. Korjaavien huoltotoimenpiteiden jälkeen asuntojen lämpötilojen kehittymistä jäädä seuraamaan. Kun asuntojen välistä epätasapainoa saadaan tasattua, voidaan myös lämmitystä optimoida entistä paremmin. Jos asuntojen välillä on huomattavaa lämpötilaepätasapainoa eivätkä korjaavat huolto- toimenpiteet auta riittävästi, on patteriverkoston tasapainotus ja perussäätö tällöin suositeltavaa. Tässäkin tapauksessa reaaliaikainen tieto sisälämpötiloista auttaa tasapainotuksen tekemisessä ja sen onnistumisessa.

Lämmityksen optimoinnissa ja huipputehon leikkaamisessa yksi tärkeä tekijä on riittävän tarkka kokonaiskäsitys kiinteistön kaukolämmön energiankulutuksesta ja sen kulutusprofiilista. Yleensä se tarkoittaa vähintään lämpimän käyttöveden kulutusprofiilin selvittämistä. Jos kiinteistössä on koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto ja tuloilman jälkilämmitys on toteutettu kaukolämmön avulla, on myös ilmanvaihdon kulutusprofiililla merkityksensä. Kun näihin kulutusprofiileihin yhdistetään vielä lähimmän säähavaintoaseman sääennusteet sekä kaukolämpöyhtiöiden omat tuotantoennusteet, voidaan analytiikan avulla luoda itseoppivia ennustemalleja, joiden perusteella kiinteistöä lämmitetään. Tällöin tekoäly oppii varaamaan ja purkamaan energiaa kulutusprofiilien ja ennusteiden mukaan asunnon lämpötekniisiä ominaisuuksia hyödyntäen. Kuvassa 21 on esitetty erään kerrostalon patteriverkoston menoveden profiili tekoälyohjauksessa viikon ajalta helmikuussa 2018. Kyseistä rakennusta ohjataan Leanheat-säädöllä.

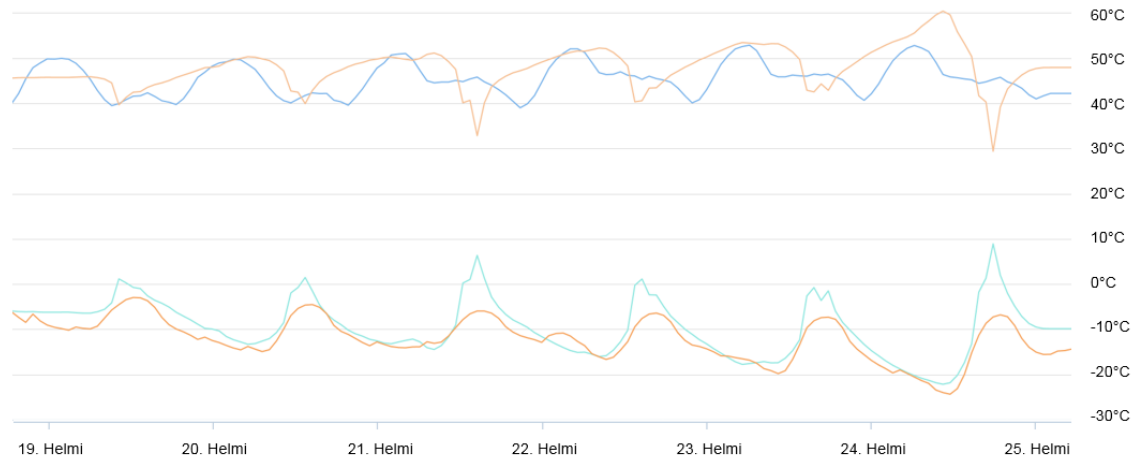


Kuva 21. Erään asuinkerrostalon patteriverkoston menovesikäyrien vertailuarvot sekä asuntojen keskimääräinen sisälämpötila [72].

Kuvassa ylin käyrä kuvaa patteriverkoston menoveden lämpötilaa, jos kiinteistöä ohjattaisiin perinteisen lämmityksen säätökäyrän mukaan. Tämän käyrän alapuolella on verkostoon todellisuudessa ohjattu menoveden lämpötila. Ohjaus on suoritettu asuntojen tavoitekeskilämpötilaan perustuen tekoälyn avulla. Alin käyrä kuvaa asuntojen keskimääräistä sisälämpötilaa. Kuvasta voi havaita eron menoveden lämpötilassa, jos ohjaus toteutettaisiin perinteisen säätökäyrän mukaan. Se myös havainnollistaa, kuinka analytiikkaan pohjautuva, sisälämpötilasidonnaisen lämmitys on energiataloudellisempaa, samalla säilyttäen asuntojen halutun lämpötilan. Myös perinteisen lämmityksen säätökäyrän avulla voidaan tavoitella näitä säästöjä muun muassa säätökäyrän suuntaissiirtoa apuna käyttäen. Tämä kuitenkin vaatii kiinteistöhoitajan aktiivista ja oma-aloitteista otetta optimaalisen säätökäyrän löytämiseksi.

Rakennuksen lämpötekniisten ominaisuuksien ja toimivan analytiikan hyödyntäminen korostuu ennen kaikkea silloin, kun kaukolämmön tehopiikkejä pyritään leikkaamaan talven kylmimmillä säillä, jolloin rakennusten huipputehontarve normaalisti kasvaa jyrkästi. Älykkäässä ohjauksessa rakennukseen varastoidaan lämpöä ennen suurimpia ennakoituja tehopiikkejä. Tehopiikkien aikaan, kun perinteisen säätökäyrän ohjauksessa ovat kiinteistöt lämmittävät suurimmalla teholla, voidaan älykkäästi ohjatussa rakennuksessa lämmitystä laskea ja hyödyntää sen rakenteisiin varastoitunutta lämpöenergiaa. Kun tehopiikki on ohi, mahdollisesti hieman tavoitellusta lämpötilatasosta jäähtyneitä asuntoja voidaan lämmittää normaalia suuremmalla teholla, koska tällä ei ole enää vaikutusta itse huipputehoon. Tehon säätely tehdään kuitenkin aina asuntojen sisälämpötilan

lojen ehdoilla, eikä asuntojen keskiarvolämpötilojen anneta muuttua asetellusta tavoitteesta +/- 0,5 °C enempää. Kuvassa 22 on esitetty, kuinka huipputeho-optimointi on toiminut eräässä kerrostalossa kuuden päivän aikana helmikuussa 2018. Kyseistä rakennusta ohjataan Leanheat-säädöllä, jossa on käytössä huipputeho-optimointi.



Kuva 22. Erään asuinkerrostalon lämmityksen älykäs ohjaus kaukolämmön huipputeho-optimointia käyttäen [72].

Kuvassa ylhäällä ruskealla käyrällä on kuvattu patteriverkoston menoveden lämpötila, jos lämmitystä ohjattaisiin rakennuksessa aikaisemmin käytössä olleen säätökäyrän mukaisesti. Kuvassa ylhäällä sinisellä käyrällä on kuvattu menoveden lämpötila älykkäässä ohjauksessa. Alhaalla oranssi käyrä kuvaa kiinteistön seinällä olevan ulkolämpötila-anturin lukemaa, jonka arvoihin pohjautuu perinteisen säätökäyrän toiminta ja sitä kautta patteriverkoston menoveden lämpötila. Kuvassa alhaalla vaalean sininen käyrä kuvaa lähimmältä säähavaintoasemalta saatua mittaustietoa ulkolämpötilasta. Kuvaajasta voi huomata, miten älykkäässä ohjauksessa kiinteistöä lämmitetään etupainotteisesti. Kun suurimmat huipputehon tehopiikit lähestyvät, lämmitystä lisätään aina niinä hetkinä, kun se on mahdollista kaukolämpöyhtiöiden ennusteet ja lämpimän käyttöveden kulutusprofiili huomioiden. Kun perinteinen lämmityskäyrä ja tehontarve on korkeimmillaan, huipputeho-optimointi leikkaa kiinteistön tehonkulutusta mahdollisimman paljon, kuitenkin asuntojen sisälämpötilat huomioiden. Kuvasta voi myös huomata, kuinka suora aurin gonpaiste tai jokin muu häiriö saattaa vääristää kiinteistön seinällä olevan ulkolämpötila-anturin mittausta. Toisinaan syynä eriäviin lämpötiloihin voi olla myös esimerkiksi sääaseman sijainti suhteessa rakennukseen. Jos mahdollinen mittausvirhe johtuu kuitenkin anturista tai sen sijainnista eikä tilannetta ole korjattu, vaikuttaa se suoraan perinteiseen säätökäyrään ja sitä kautta verkoston menoveden lämpötilaan vähentäen lämmitystehoa

juuri silloin, kun se olisi huipputehon leikkauksen kannalta kaikkein järkevintä. Koska älykkäässä ohjauksessa tiedot ulkolämpötilasta haetaan suoraan lähimmältä sääasemalta, ei vastaavaa virhettä pääse syntymään. [72; 73.]

Edellä kuvattu palvelu tuottaa hyötyä monelle osapuolelle. Asukkaiden näkökulmasta tämä tarkoittaa entistä tasaisempaa sisälämpötilaa, koska ohjaus pohjautuu asuntojen todellisiin sisälämpötiloihin eikä hetkelliseen ulkolämpötilaan. Lisäksi anturoidussa kohteessa mahdolliset lämmitysverkon ongelmat havaitaan välittömästi ja niihin voidaan puuttua ennen kuin ne aiheuttavat harmia asukkaille. Kiinteistön omistajan näkökulmasta tämä tarkoittaa säästöjä energiakuluissa, pienemmän huipputehontarpeen vuoksi pienempää kaukolämmön perusmaksua sekä kokonaisuudessaan pienempää hiilijalanjälkeä. Tarkemman mittausdatan ansiosta vikatilanteisiin voidaan puuttua entistä etupainotteisemmin, jolloin säästöjä saadaan myös rakennuksen kunnossapitokustannuksista. Kaukolämpöyhtiöiden näkökulmasta tämä tarkoittaa, että he pystyvät optimoimaan entistä paremmin omaa tuotantoaan sekä pienentämään huipputehontarpeen mitoitusta. Pienentynyt huipputehontarve mahdollistaa pienemmän varavoimareservin, jolloin kaikkein kalleimpia varavoimaloita voidaan sulkea. Se vähentää laitosten ylläpitokustannuksia sekä auttaa tekemään tuotannosta ympäristöystävällisempää, sillä varavoimaloiden hyötysuhde on lähtökohtaisesti huonompi ja niissä käytetään yleensä fossiilisia polttoaineita.

Tällaisten palvelujen yleistymisen yhdeksi keskeiseksi ehdoksi, palvelun korkean laadun lisäksi, muodostuu laitteistoriippumattomuus, jotta integroituminen on mahdollista eri rakennusautomaatiojärjestelmiin. Lisäksi avoimet ja yhteensopivat rajapinnat mahdollistavat isompien ekosysteemien rakentamisen ja synergiaetujen luomisen eri yhteistyökumppaneiden välille. Se mahdollistaa suuremman lisäarvon tuottamisen kaikille osapuolille sekä jatkuvan palveluiden kehittäminen. Sen vuoksi avoimuus, yhteistyö ja tiedon jakaminen ovat ehdottomasti nykypäivää. Ne toimijat, jotka sulkeutuvat, eristävät samalla niin itsensä kuin oman liiketoimintansa.

## 6.6 Tulevaisuuden visioita

Schneider Electric on julkaissut [74] tutkimuksen yritysten tämänhetkisistä ja tulevista, suunnitelluista tavoista käyttää esineiden internetiä. Tutkimusta varten tehtiin yhteensä



2 597 online-haastattelua 12 maasta. Haastateltavat henkilöt olivat päättävässä asemassa olevia työntekijöitä yrityksissä, jotka työllistävät yli 100 henkilöä. Raporttia varten kerättyjen vastausten perusteella pyrittiin ennustamaan, kuinka suuret organisaatiot tulevat hyödyntämään IoT-teknologioita. Tutkimustulosten ennusteiden perusteella yksi IoT:n keskeisistä mahdollisuuksista ovat automaation tuomat kustannussäästöt. Suurimmat vuosittaiset kustannussäästöt voitaisiin saavuttaa rakennusten ja teollisuuden automaatioissa. Automaatioteknologiat muodostavat IoT:n tulevaisuuden, ainakin tutkimustulosten perusteella. Lisäksi lähes puolet vastaajista suunnittelee IoT:n mahdollistavan automaatiojärjestelmän käyttöönottoa seuraavan kahden vuoden aikana. IoT:n mahdollistama massiivinen tiedonkeruu ja sen analysoinnin pohjalta luotu uusi tieto auttaa tekemään parempia, ennustettavampia päätöksiä kustannusvaikutukset huomioiden, myös rakennusalalla. [74; 75; 76.] Tämän vuoksi perinteinen rakennusautomaatio on murroksessa.

”Rakennusautomaatio edustaa vanhaa järjestelmää, jossa mittausarvot saadaan tekstitiedostoina noin kerran päivässä, kun IoT-ratkaisut on mietitty nykypäivää varten ja niistä voidaan hakea dataa vaikka sekunnin välein.”

toteaa professori Heikki Ihasalo Aalto-yliopiston Älykkäiden rakennusten teknologiat ja palvelut -yksiköstä Korjausrakentaminen-lehden artikkelissa. [77, s. 20.]

Älykkäämpien järjestelmien ja älytalojen toteuttamiskynnys madaltuu jatkuvasti, kun rajapintojen standardointi, Big Datan analysointi ja esineiden internet kehittyvät entisestään. Rakennukset niihin sisältyvine järjestelmineen oppivat ja kasvattavat älykkyyttään käyttäjien tavat huomioiden. Lisäksi jo lähitulevaisuudessa esimerkiksi energiamittarointijärjestelmää voidaan käyttää tarkoituksiin, joihin sitä ei vielä tällä hetkellä riittävästi hyödynnetä. Energian reaaliaikaisen hintatiedon hyödyntäminen kulutuksessa tulee ohjauksiksi tekijäksi. Tarkemman mittaroinnin avulla saatua tietoa voidaan hyödyntää esimerkiksi sähkönkulutuksen dynaamisessa ohjauksessa, jolloin merkittävimpiä sähkökuormia siirretään halvempien sähkötuntien kulutukseksi kalliiden tuntien sijaan. Samalla pystytään leikkaamaan sähkön huipputehoja, kun rakennusten muuntojoustavuus ja energian varastointimahdollisuudet paranevat. Samalla logiikalla voidaan ohjata myös kaukolämmön tuotantoa.

Rakennusten automaatio- ja anturijärjestelmät tulevat olemaan vaihtoehtona fyysisille tarkastuksille. EU:n tasolla kannustetaan sähköisen liikkuvuuden edellyttämän infrastruktuurin käyttöönottoon ja otetaan käyttöön älykkäitä ratkaisuja koskeva indikaattori,

jolla arvioidaan rakennuksen teknisiä valmiuksia toimia vuorovaikutuksessa asukkaiden sekä sähköverkon kanssa ja hoitaa tehokkaasti toimintojaan. Energiatehokkaammat rakennukset tarjoavat asukkailleen enemmän mukavuutta ja hyvinvointia sekä parantavat terveyttä vähentämällä huonosta sisäilmasta johtuvia sairauksia. Toimintojen keskiössä on rakennusautomaatio. Tällöin voidaan puhua aivan uudeltaisesta, parannelusta rakennusautomaation versiosta, rakennusautomaatio 2.0:sta.

Vaikka Suomi ja muut Pohjoismaat ovat olleet digitalisaation etujoukoissa, ne ovat tipuneet terävimmästä kärjestä konsulttiyritys Boston Consulting Groupin [78] selvityksen mukaan. Selvitystä varten haastateltiin 1 300:aa yritysjohtajaa Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa. Vastaajien joukkoon kuului myös 109 pohjoismaalaista yritysjohtajaa. Raportin mukaan Pohjoismaat, Suomi mukaan lukien, ovat jäämässä jälkeen muusta maailmasta. Raportissa todetaan, että Suomi kuului digitalisaation ensimmäisessä aallossa kärkijoukkoon. Tällöin rakennettiin ensimmäisen vaiheen verkkokauppoja ja nettipankkeja. Nyt esimerkiksi Yhdysvalloissa ja Kiinassa digitalisaatio on jo edennyt Pohjoismaita ja Suomea huomattavasti pidemmälle. Pohjoismaalaisilla yrityksillä on toimivia visioita ja strategioita, mutta varsinaiset aikaansaannokset jäävät reilusti kansainvälisen keskitason alapuolelle. Raportin mukaan Pohjoismaat ovat uuden digitaalisen liiketoiminnan kehittämisessä peräti huonoimmassa neljänneksessä. Muualla maailmassa yritykset hyödyntävät analytiikkaa ja automatisoivat työtehtäviä ja prosesseja vauhdilla. [78]

Jotta kehityksessä päästään eteenpäin, on rakennusalan huomioitava nykypäivän megatrendit, uudet teknologiat sekä niiden luomat valtavat mahdollisuudet. Tällöin rakennusautomaatio ja toimintojen automatisointi pitää nostaa rakennuksissa vieläkin keskeisempään rooliin. Ehkä vanhoilliseksi ja jäykäksi koettu suomalainen rakennusala voisi toimia digitalisaation suunnannäyttäjänä niin Suomessa kuin koko Pohjoismaissa. Se on kuitenkin varmaa, että ala tulee muuttumaan ja uudistumaan radikaalisti, mikä samalla kiristää entisestään kilpailua sekä muuttaa vakiintuneita kilpailuasetelmia. Ehkä tuleva murros laittaa nousu-uralle myös alan työn tuottavuudenkasvun, joka ei juurikaan ole kehittynyt viimeisen 40 vuoden aikana. [79]

## 7 Yhteenveto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, miten rakennusautomaatiota ja siihen liitettyjä sekä erillään olevia mittauksia voidaan hyödyntää rakennusten energiatehokkuuden parantamisessa, seurannassa, ennustettavuudessa sekä tehtyjen energiatehokkuustoimenpiteiden vaikutusten mitattavuudessa. Lisäksi työssä pohdittiin, mikä on toimivan, energiatehokkaan rakennuksen ja hyvien sisäolosuhteiden keskinäinen suhde toisiinsa.

Työn alkuosassa luotiin katsaus energiatehokkuutta ohjaaviin lakeihin, asetuksiin ja standardeihin sekä energiatehokkuuden merkitykseen kiinteistöjen arvonmuodostumisessa. Lisäksi luotiin yleiskatsaus rakennusautomaation perusrakenteeseen ja -toimintoihin sekä automaation laadun ja ylläpidon haasteisiin. Myös rakennusautomaation yleistä merkitystä rakennuksen energiatehokkaaseen ohjaukseen selvitettiin.

Työn keskiosassa käytiin läpi rakennusautomaation säätö- ja mittalaitteiden toimintaa sekä listattiin tämän hetken yleisimmät ohjelmalliset ominaisuudet. Yhdeksi keskeiseksi aiheeksi nousi se, mikä merkitys rakennuksen tarkemmalla mittaroinnilla sekä siitä saadun tiedon hyödyntämisellä on energiatehokkuuteen ja sisäolosuhteisiin. Samalla oleellisena haasteena esiin nousi kysymys; mitä varsinaisesti kannattaa mitata ja seurata, kun rakennuksen energiatehokkuutta lähdetään kartoittamaan ja parantamaan?

Työn loppuosassa perehdyttiin rakennusautomaation tulevaisuuteen ja automaation rooliin tulevaisuuden älykaupungeissa sekä käytiin läpi yksi nykypäivän älykäs sovellus, jota käytetään rakennusten lämmityksen ohjaamiseen kaukolämpökohteissa. Keskeisimmiksi tekijöiksi, jotka tulevat muokkaamaan rakennusautomaatiota, nousivat työssä käytettyjen lähteiden perusteella IoT:n ja Big Datan hyödyntäminen rakennusten ohjauksessa, optimoinnissa ja kulutusten ennustettavuudessa. Myös huipputehon rajoitus ja kulutusjoisto tulevat olemaan tärkeässä roolissa tulevaisuuden ratkaisuja mietittäessä.

Kaiken kaikkiaan voidaan todeta, että rakennusautomaation rooli rakennusten energiatehokkuuden parantamisessa sekä sen seurannassa ja ylläpidossa on ja tulee olemaan yhä keskeisemmässä roolissa. Tulevaisuuden kannalta ilman älykäästä, ennakoivaa automaatiota ei esimerkiksi energian kulutusjousto pystytä toteuttamaan tehokkaasti ja järkevästi. Sen lisäksi muun muassa kiristyvät energiatehokkuusvaatimukset ja kiinteis-

tönomistajien ja -käyttäjien tiukemmat vaatimukset edellyttävät entistä tarkempaa rakennusten mittarointia, jonka alati halpenevat ja energiatehokkaammat IoT-pohjaiset anturit osaltaan mahdollistavat. Samalla ne myös mahdollistavat tarkemman sisäolosuhteiden mittaamisen ja seurannan, jotka edesauttavat sisäilmaongelmiin liittyvien tapausten selvittämisessä ja ennakoimisessa. Kun tietoa kerätään koko ajan kiihtyvällä tahdilla ja koko ajan enemmän, korostuu myös tiedon luotettavuus ja sen merkittävyys. Tällöin joudutaan pohtimaan, mitä kaikkea on edes tarpeellista ja kannattavaa mitata, saati kerätä, sekä kuinka luotettavaa kerätty tieto on. Lisäksi näiden suurien tietomassojen, Big Datan käsittelyssä keskeiseen rooliin nousee tiedon louhinta ja sen analysointi. Algoritmit ja tekoäly ovat oleellisia tekijöitä suurten tietomassojen käsittelyssä sekä oikeiden asiayhteyksien löytämisessä. Toisaalta tulevaisuudessa ei riitä enää se, että tietoa osataan etsiä ja analysoida tehokkaasti, vaan sitä pitää pystyä hyödyntämään ja luomaan käytännön sovelluksia. Entistä mutkikkaammat automaatiojärjestelmät pilvipalveluineen sisältävät myös paljon erilaisia riskejä ja haavoittuvuuksia, jotka pitäisi pystyä ratkaisemaan. Tämän hetkisen kehityksen perusteella voidaan kuitenkin todeta se, että uusien teknologioiden ja megatrendien muokkaamassa maailmassa nämä uudet mahdollisuudet tuovat mukaan muutosta myös Suomessa vielä hyvin perinteisesti toimivalle rakennuslalle uusien palveluntarjoajien ja kiristyvän kilpailun myötä.

Tämä opinnäytetyö luo kattavan teoreettisen viitekehyksen rakennusautomaation toiminnasta, sen mahdollisista tulevaisuuden suuntauksista sekä roolista rakennusten kokonaisvaltaisessa energiatehokkuuden hallinnassa. Mahdollisena jatkotutkimuksena aiheesta voisi olla laajempi katsaus käytännön sovelluksiin, jotka jo hyödyntävät nykypäivän uusimpia, digitalisaation ja kehittyvän tekoälyn luomia mahdollisuuksia sekä niiden rooliin kiinteistöautomaatiomarkkinoilla. Toinen oleellinen jatkotutkimuksen aihe voisi olla tietoturvariskit sekä mahdolliset muut haavoittuvuudet, joille uudet, internetpohjaiset sovellukset ja palvelut vääjäämättä altistuvat.

## Lähteet

- 1 Energiatehokkuusvaatimusten huomioiminen rakennusten sähkö- ja tietoteknis-ten järjestelmien käytössä ja kunnossapidossa. 2016. ST 98.50. Helsinki: Sähkö-tieto ry.
- 2 Numminen, Johanna. 2017. Hiilidioksidin määrä ilmakehässä kasvaa ennätystah-tia – "Ilman nopeita leikkauksia lämpötila nousee vaarallisiin lukemiin". Verkkoai-neisto. Yle Uutiset. <<https://yle.fi/uutiset/3-9907624>> Julkaistu 30.10.2017. Luettu 6.11.2017.
- 3 Rakennusten automaation vaikutus energiatehokkuuteen. Perusteet ja opas. 2012. Espoo: Ympäristöministeriö.
- 4 Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi. Rakennusten energiatehokkuu-desta annetun direktiivin 2010/31/EU muuttamisesta 2016. Bryssel: Euroopan ko-missio.
- 5 Kauppinen, Jyrki. 2013. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatehok-kuuden parantamisesta korjaus- ja muutostöissä. Perustelumuiotio. Ympäristömi-nisteriö.
- 6 Energian hankinta ja kulutus. 2016, 4. neljännes. 2017. Helsinki: Tilastokeskus.
- 7 Toimintakertomus ja tilinpäätös 2016. 2017. Helsinki: TVO.
- 8 Mäkipelto, Tommi. 2017. Energiankäytön tehostaminen olemassa olevissa raken-nuksissa. Lease Green Oy. Helsinki: Rakennusten energiaseminaari 2017.
- 9 Pietiläinen, Matti. Asiantuntija kummeksuu: Hallitus ohittaa 3,5 miljardin säästö-mahdollisuuden. 2015. Verkkoaineisto. Keski-suomalainen. <<http://www.ksml.fi/ta-lous/Asiantuntija-kummeksuu-Hallitus-ohittaa-35-miljardin-s%C3%A4st%C3%A4st%C3%B6mahdollisuuden/370515>> Julkaistu 27.8.2015. Luettu 12.11.2017.
- 10 Neilimo, Kari. 2015. Kari Neilimo: Energiatehokkuudesta huipputuotot kiinteistö-ten omistajille ja miljardien säästöt Suomelle. Verkkoaineisto. Lease Green Oy. <<http://leasegreen.fi/aineisto/kari-neilimon-blogi-energiatehokkuus-parantaa-kiin-teistöjen-omistajien-tuottoja/>> Julkaistu 31.3.2015. Luettu 12.11.2017.
- 11 Kiinteistöjen valvomojärjestelmät. 2008. ST-käsikirja 22. Espoo: Sähkötieto ry.
- 12 Megatrendit 2017. 2017. Verkkoaineisto. Suomen Itsenäisyyden juhlarahasto Sitra. <<https://www.sitra.fi/aiheet/megatrendit/#megatrendit-2017>> Luettu 23.11.2017.

- 13 Nämä yhdeksän megatrendiä muuttavat maailmaa vuonna 2018 – Mistä aiheesta sinä haluaisit HS:n uuden kirjeenvaihtajan kirjoittavan? 2017. Verkkoaineisto. Helsingin Sanomat. <<https://www.hs.fi/ulkomaat/art-2000005322393.html>> Julkaistu 13.8.2017. Luettu 10.11.2017.
- 14 Rakennusautomaatiojärjestelmät. 2012. ST-käsikirja 17. Espoo: Sähkötieto ry.
- 15 Tele-, turva- ja RAU-urakointi käytännössä 2017. 2017. Artikkelikokoelma. Espoo: Henkilö- ja yritysarviointi SETI Oy.
- 16 Rakennusten energiatehokkuusstandardit. 2017. Helsinki: Suomen Standardisointiliitto SFS ry.
- 17 Wouters, Peter. 2017. Implementation of EPBD in the Member States. Belgian Building Institute. Helsinki: Rakennusten Energiaseminaari 2017.
- 18 Mäkinen, Pekka. 2017. FINVAC 2017. Ominais sähköteho rakentamismääräysten ja ekosuunnitteluasetuksen mukaan. FläktWoods Oy. Espoo.
- 19 Maankäyttö- ja rakennuslaki. 2017. Suomen säädöskokoelma 132/1999. Ympäristöministeriö.
- 20 Ympäristöministeriön asetukset rakennuksen energiatehokkuuden parantamisesta korjaus- ja muutostöissä. 2017. Ympäristöministeriön määräyskokoelma 4/13 ja 2/17. Ympäristöministeriö.
- 21 Suomen rakentamismääräyskokoelma. 2016. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <<http://www.ymparisto.fi/rakentamismaaraykset>> Julkaistu 29.12.2016. Luettu 7.11.2017.
- 22 Uudistuva energiatodistusasetus on lausuntokierroksella. 2017. Verkkoaineisto. Rakennuslehti- <<https://www.rakennuslehti.fi/2017/09/uudistuva-energiatodistusasetus-on-lausuntokierroksella/>> Julkaistu 26.9.2017. Luettu 6.11.2017.
- 23 FlnZEB-hanke. Lähes nollaenergiarakennuksen käsitteet, tavoitteet ja suuntaviivat kansallisella tasolla. Loppuraportti. 2015. Helsinki: Rakennustuotteiden Laatu Säätiö, TRT rahasto, Ympäristöministeriö ja Granlund Oy.
- 24 Rakennuskannan energiankulutus laskee nykytoimilla vain vähän lähivuosikymmeninä. 2016. Verkkoaineisto. Suomen ympäristökeskus SYKE. <[http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennuskannan\\_energiankulutus\\_laskee\\_ny\(40563\)](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennuskannan_energiankulutus_laskee_ny(40563))> Julkaistu 25.10.2016. Luettu 16.11.2016.
- 25 Rakennusten energiatehokkuus. 2017. ST-ohjeisto 15. Espoo: Sähkötieto 2017.

- 26 2017 GRESB results. 2017. Verkkoaineisto. GRESB. <<https://gresb.com/2017-real-estate-results/> Luettu 1.11.2017> Luettu 5.11.2017.
- 27 Korjausvelka. Verkkoaineisto. Rakennusteollisuus. <<https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Korjausrakentaminen1/Korjausvelka/>> Luettu 9.10.2017.
- 28 Kiinteistön hallintajärjestelmien peruskäsitteet ja terminologia. 2017. ST 709.00. Espoo: Sähkötieto ry.
- 29 Rakennusautomaatiojärjestelmän kuntotutkimusohje. 2017. ST 98.17. Espoo: Sähkötieto ry.
- 30 Rakennusautomaatiojärjestelmät. Käyttö, ylläpito ja huolto. 2017. ST-98.61. Espoo: Sähkötieto ry.
- 31 Rakennusautomaatiojärjestelmän hyödyntäminen. 2007. ST 710.10. Espoo: Sähkötieto ry.
- 32 Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Ohjeet 2012. 2013. D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Helsinki: Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto.
- 33 Laatu automaatioissa. Parhaat käytännöt. 2001. Suomen Automaatioseura ry.
- 34 Stiqzelius, Johan. 2013. Rakennusten energiatehokkuus. Rakennusautomaation, säädön vaikutus energiatehokkuuteen. KNX Finland ry.
- 35 Kangasrääsiö, Antti. 2010. Adaptiivisen säädön menetelmät. Kandidaatin työ. Espoo: Aalto-yliopisto.
- 36 Paiho Satu, Karjalainen Sami, Alanne Karu, Norvasuo Markku, Eriksson Lasse, Pöyhönen Sanna, Kaartinen Jani & Lehtovaara Jorma. 2002. Rakennusten uudet säätö- ja energianhallintaratkaisut. VTT tiedotteita 2134. Espoo: VTT.
- 37 Rakennusautomaatiolaitteiden yleisiä asennus- ja valintaohjeita. 2014. ST 711.13. Espoo: Sähkötieto ry.
- 38 Langattomien tiedonsiirtoverkostojen hyödyntäminen kiinteistön hallintajärjestelmissä. 2016. ST 701.57. Espoo: Sähkötieto ry.
- 39 Lehtinen, Toni. 2017. Seiniä nuuskiva pienoiskopteri voi mullistaa homevaurioiden seurannan, estää ihmisten sairastumisen ja vähentää kalliita remontteja. 2017. Verkkoaineisto. Helsingin Sanomat. <<https://www.hs.fi/kotimaa/art-2000005363330.html>> Julkaistu 11.9.2017. Luettu 7.11.

- 40 Ohjeita energiamittausten ja energianhallintajärjestelmien toteutukseen. 2015. ST 21.34. Espoo: Sähkötieto ry.
- 41 Rakennusten energiatehokkuusvaatimusten huomioonottaminen sähkö- ja tietoteknisten järjestelmien suunnittelussa. 2012. ST 21.32. Espoo: Sähkötieto ry.
- 42 Vihavainen, Timo. 2013. Rakennusten energiatehokkuuden kehittäminen energiahallintajärjestelmien avulla. Diplomityö. Espoo: Aalto-yliopisto.
- 43 Tuomaala, Pekka. 2017. Rakennusten energiatehokkuus 2.0. VTT. Helsinki: Rakennusten energiaseminaari 2017.
- 44 Siekki Tiina, Airaksinen Miimu, & Saari Arto. 2017. Effect of energy measures on the values of energy efficiency indicators in Finnish daycare and school building. *Energy and Buildings* 139: 124-132.
- 45 Kiinteistöjen IoT-markkinakatsaus. 2017. Verkkojulkaisu. Granlund Oy. <[https://issuu.com/granlundoy/docs/granlund\\_iot-raportti\\_2017\\_issuu](https://issuu.com/granlundoy/docs/granlund_iot-raportti_2017_issuu)> Julkaistu 17.5.2017. Luettu 10.11.2017.
- 46 WeWork. Yrityksen internetsivut. 2017. Verkkojulkaisu. <<https://www.wework.com/>> Luettu 12.11.2017.
- 47 Kiviluoma Juha & Helistö Niina. 2014. Selvitys tehoreservin tarpeesta vuosille 2015–2020. Tutkimusraportti VTT-R-06032-14. Espoo: VTT.
- 48 Heijo Juhani, Harsia Pirkko, Holttinen Hannele, Aalto Pami, Björkvist Tomas, Järventausta Pertti, Kaivo-oja Jari, Kojo Matti, Korpela Timo, Rautiainen Antti, Repo Sami, Ruostetsaari Ilkka & Sorri Jaakko. 2016. Tammikuun tehopiikki – mitä tapahtui 7.1.2016? Miten tehoa hallitaan paremmin jatkossa? EL-TRAN analyysi 7/2016. EL-TRAN.
- 49 Honkapuri, Samuli. Kysyntäjousto hyödyttää kaikkia sähkön käyttäjiä ja laskee sähkön hintaa. Verkkoaineisto. Smart Energy Transition. <<http://smartenergytransition.fi/fi/kysyntajousto-hyodyttaa-kaikkia-sahkon-kayttajia-ja-laskee-sahkon-hintaa/>> Luettu 15.11.2017.
- 50 Airaksinen Miimu & Vuolle M. 2013. Heating Energy and Peak-Power Demand in a Standard and Low Energy Building. *Energies*, Vol. 6: 235–250.
- 51 Ahn Jonghoon & Cho Soolyeon. 2017. Development of an intelligent building controller to mitigate indoor thermal dissatisfaction and peak energy demands in a district heating system. *Building and Environment* 124: 57–68.
- 52 Guelp Elisa, Barbero Giulia, Sciacovelli Adriano & Verda Vittorio. 2017. Peak shaving in district heating systems through optimal management. *Energy* 137: 706–714.



- 53 Koistinen, Antti. 2017. Taloyhtiö voisi myydä hukkalämpöään kaupungin verkkoon – Asiantuntijaryhmä avasi suuret kaukolämpöverkot kilpailulle. Verkkoaineisto. Yle Uutiset. <<https://yle.fi/uutiset/3-9946794>> Julkaistu 28.11.2017. Luettu 4.12.2017.
- 54 Kihl Merja & Mononen Ari. 2014. Isännöitsijän ´isoveli´ valvoo talotekniikan toimintaa. KITA kiinteistö & talotekniikka 8/2014. Helsinki: PubliCo Oy.
- 55 Xiao Fu & Fan Cheng. 2014. Data mining in building automation system for improving building operational performance. Energy and buildings 75: 109–118.
- 56 Fan Cheng, Xiao Fu & Yan Chengchu. 2015. A framework for knowledge discovery in massive building automation data and its application in building diagnostics. Automation in Construction 50: 81–90.
- 57 Miller Clayton, Zoltán Nagy & Schlueter Arno. 2015. Automated daily pattern filtering of measured building performance data. Automation in Construction 49: 1–17.
- 58 Fan Cheng, Xiao Fu, Madsen Henrik & Wang Dan. 2015. Temporal knowledge discovery in big BAS data for building energy management. Energy and Buildings 109: 75–89.
- 59 Linder Lucy, Vionnet Damien, Bacher Jean-Phillippe & Hennebert Jean. 2017. Big Building Data - a Big Data Platform for Smart Buildings. Energy Procedia 122: 589–594.
- 60 Internet of Things. Gartner IT Glossary. Verkkoaineisto. Gartner Inc. <<https://www.gartner.com/it-glossary/internet-of-things>>. Luettu 8.11.2017.
- 61 Halmetoja, Esa. 2016. Esineiden Internet ja sähköinen talotekniikka tuottavan työympäristön tekijöinä. Diplomityö. Espoo: Aalto-yliopisto.
- 62 Porter Michael E. & Heppelman James E. 2014. Verkkoaineisto. Harvard Business Review 11/2014. How Smart, Connected Products Are Transforming Competition. <<https://hbr.org/2014/11/how-smart-connected-products-are-transforming-competition>> Luettu 8.11.2017.
- 63 Sinha Rashmi Shrana, Wei Yiqiao & Hwang Seung-Hoon. 2017. A survey on LPWA technology LoRa and NB-IoT. ICT Express 3: 14–21.
- 64 Miksi IoT ei ole vielä lyönyt kunnolla läpi – ja miksi NB-IoT muuttaa kaiken? 2017. Verkkoaineisto. Kauppalehti, DNA Business. <<https://studio.kauppalehti.fi/dna-business/miksi-iot-ei-ole-viela-lyonyt-kunnolla-lapi-ja-miksi-nb-iot-muuttaa-kaiken>> Julkaistu 3.10.2017. Luettu 1.12.2017.

- 65 NB-IoT on Internetin seuraava vallankumous. 2017. Verkkoaineisto. DNA Business. < <https://www.dna.fi/yrityksille/blogi/-/blogs/nb-iot-on-internetin-seuraava-vallankumous>> Julkaistu 26.6.2017. Luettu 9.11.2017.
- 66 DNA tuo NB-IoT-tekniikan käyttöön. 2017. Verkkoaineisto. Uusiteknologia.fi. <<https://www.uusiteknologia.fi/2017/05/29/dna-tuo-nb-iot-tekniikan-kayttoon/>> Julkaistu 29.5.2017. Luettu 1.12.2017.
- 67 Farris I., Orsino A., Militano L., Iera A. & Araniti G. 2017. Federated IoT services leveraging 5G technologies at the edge. *Ad Hoc Networks* 68: 58–69.
- 68 Song Yonghua, Lin Jin, Tang Ming & Dong Shufeng. 2017. An Internet of Energy Things Based on Wireless LPWAN. *Engineering* 3: 460–466.
- 69 Plageras Andreas P., Psannis Kostas E., Stergiou Christos, Wang Haoxiang & Gupta B.B. 2017. Efficient IoT-based sensor BIG Data collection–processing and analysis in smart buildings. *Future Generation Computer Systems*.
- 70 Lilis Georgios, Conus Gilbert, Asadi Nastaran & Kayal Maher. 2016. Towards the next generation of intelligent building. An assessment study of current automation and future IoT based systems with a proposal for transitional design. *Sustainable Cities and Society* 28: 473–481.
- 71 Kaukolampo.fi. 2017. Verkkoaineisto. < <https://kaukolampo.fi/category/tuotanto/>> Luettu 20.2.2018
- 72 Leanheat Oy. Yrityksen internetsivut. 2017. Verkkoaineisto. <<http://www.leanheat.fi>> Luettu 20.2.2018.
- 73 Leanheat Cloud-pilvipalvelu. 2017. <<https://cloud.leanheat.fi>> Käytetty 20.2.2018.
- 74 IoT 2020 Business Report. The future of the Internet of Things: From sensor to business sense. 2016. Schneider Electric.
- 75 Hyödyt irti IoT:sta. 2016. Verkkoaineisto. Talotekniikka-Julkaisut Oy. <<https://talotekniikka-lehti.fi/hyodyt-irti-iotsta/>> Julkaistu 17.5.2016 Luettu 4.12.2017.
- 76 Schneider Electric esittelee uuteen kansainväliseen IoT 2020-tutkimukseen perustuvia ennusteita. 2016. Verkkajulkaisu. Lehdistöiedote. <<http://www.mynewsdesk.com/fi/schneider-electric-finland/pressreleases/schneider-electric-esittelee-uuteen-kansainvaliseen-iot-2020-tutkimukseen-perustuvia-ennusteita-1406211>> Julkaistu 16.5.2016. Luettu 4.12.2017.
- 77 Salminen, Kaisa. 2017. Älytalo rakentuu pala palalta. *Korjausrakentaminen* 3/2017. Helsinki: Rakennustieto Oy.

- 78 Kirvelä Santeri, Heikkilä Tatu & Lind Fredrik. Bigger, Bolder and Faster. 2017. The digital agenda for nordic companies.. The Boston Consulting Group.
- 79 Rakennusalalla työn tuottavuus ei ole kasvanut 40 vuodessa – onko allianssista tai leanista apua? 2017. Verkkoaineisto. Rakennuslehti. <<https://www.rakennuslehti.fi/2017/09/rakennusalalla-tyon-tuottavuus-ei-ole-kasvanut-40-vuodessa-onko-allianssista-tai-leanista-apua/>> Julkaistu 4.9.2017. Luettu 10.11.2017.

