

AALTO-YLIOPISTO

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta  
Elektroniikan laitos  
Valaistusyksikkö

Kari Hiltunen

Mittaus- ja valvontasuunnitelman laatiminen LEED-sertifikaatin vaatimusten mukaisesti

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 22.11.2010

Työn valvoja Professori Liisa Halonen

Työn ohjaaja DI Pekka Mairinoja

Tekijä: Kari Hiltunen

Työn nimi: Mittaus- ja  
valvontasuunnitelman laatiminen LEED-  
sertifikaatin vaatimusten mukaisesti

Sivumäärä: 68

Päivämäärä: 22.11.2010

Tiedekunta: Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Professuuri: S-118 Valaistustekniikka

Työn valvoja: Prof. Liisa Halonen

Työn ohjaaja: DI Pekka Mairinoja

Tiivistelmäteksti:

Työn tavoitteena oli kehittää yleinen malli mittaus- ja valvontasuunnitelman (M&V-suunnitelman) laatimiseen uudisrakennuksille. Työn yhteydessä laadittiin M&V-suunnitelma LEED-sertifioitavaan projektikohteeseen sertifikaatin vaatimusten mukaisesti.

M&V-suunnitelma koostuu kolmesta osa-alueesta: Energiasimuloinnista, energiatehokkuuden mittaroinnista sekä seurannasta ja raportoinnista. Energiasimulointien tarkoituksena on erilaisten suunnitteluratkaisujen arviointi ja kehittäminen energiatehokkuuden näkökulmasta. Tuloksena syntyvät rakennuksen suunnitteluratkaisun ja vertailutapauksen simuloitujen energiankulutuksen jakaumat. Kohteeseen suunnitellaan riittävän laaja mittaristo rakennuksen energiatehokkuuden todentamiseksi. Mittariston avulla puutteet rakennuksen ja järjestelmien toteutuksessa ja toiminnassa voidaan paikallistaa riittävällä tarkkuudella ja virhetilanteisiin puuttua nopeasti. M&V-jakson tuloksista koostetaan raportti, joka sisältää kuvauksen merkittävimmistä eroavaisuuksista energiankulutusarvion ja mittaustulosten välillä sekä ehdotuksen korjaavista toimenpiteistä.

M&V-suunnitelma on työkalu rakennuksen energiatehokkuuden kehittämiseen ja varmistamiseen suunnittelu- ja rakentamisvaiheessa sekä käytön aikana. Suunnitelman avulla varmistetaan hankkeen järjestelmällinen energiatehokkuusprosessi. Energiatehokkuustavoitteet voidaan saavuttaa kokonaiskustannuksista tinkimättä.

Avainsanat:

Energiasimulointi, Energiatehokkuusprosessi, LEED, Mittaus- ja valvontasuunnitelma, M&V-prosessi, M&V-suunnitelma

Author: Kari Hiltunen

Name of the thesis: Formulate a measurement and verification plan according to requirements of the LEED-certificate

Number of pages: 68

Date: 22.11.2010

Faculty: Faculty of electronics, communications and automation

Professorship: S-118 Illumination Engineering

Supervisor: Prof. Liisa Halonen

Instructor: M.Sc. Pekka Mairinoja

Abstract:

Purpose of the thesis was to develop a model to formulate measurement and verification plan (M&V-plan) to new constructions. In context of the thesis M&V-plan formulated to LEED-certification project according to requirements of the LEED-certificate.

M&V-plan is based on comparison between whole building energy simulation of reference and as design building and actual utility metering and submetering data. M&V-plan defines baseline energy use, identifies metering requirements and outlines specific methodologies associated with implementing the plan.

Simulation softwares enable to develop sufficient precise estimation of building's post-construction energy use during design phase. Actual energy use can be measured and verified during the operating period. The comparison should include energy end uses for all system levels for which metered data is available. The report of the operation period includes an analysis of the remarkable deviations between measured data and estimated energy consumption and also a process for corrective actions.

The M&V-process ensures that all systems are performing as specified and identifies any anomalies in equipment, operations or user habits. M&V-process encourages to better project engineering and leads to systematic energy efficient process during building's design, construction and operating period.

Keywords:

Energy efficiency process, Energy simulation, LEED, Measurement and verification plan, M&V-plan, M&V-process

## **Alkulause**

Haluan esittää kiitokseni Pöyry Building Services Oy:lle haastavasta ja mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta. Erityiskiitos kuuluu ohjaajalleni Pekka Mairinojalle sekä Timo Rintalalle asiantuntevasta ohjauksesta, kommenteista sekä neuvoista. Kiitän myös muita diplomityöhöni osallistuneita henkilöitä saamistani neuvoista ja vinkeistä.

Kiitän Professori Liisa Halosta työni valvomisesta sekä sisällön ja tyyliseikkojen kommentoinnista.

Lopuksi haluan kiittää perhettäni ja lähipiiriäni saamastani tuesta, joka on mahdollistanut opiskeluni Aalto-yliopiston teknillisessä korkeakoulussa.

Espoossa marraskuun 22 päivänä 2010

Kari Hiltunen

# Sisällysluettelo

Alkulause.....	4
Sisällysluettelo.....	5
Symboli ja lyhenneluettelo.....	7
1 Johdanto.....	9
2 Mittaus- ja valvontasuunnitelma.....	10
2.1 Vaatimukset.....	10
2.1.1 LEED-sertifikaatin asettamat vaatimukset.....	10
2.1.2 Katsaus BREEAM-sertifikaatin vastaaviin vaatimuksiin.....	12
2.1.3 Mittauksen ja seurannan asettamat vaatimukset suunnittelulle ja projektiryhmän toiminnalle.....	13
2.2 Toteutusvaihtoehdot.....	13
2.3 Hyödyt.....	16
2.3.1 Energiankulutuksen todentaminen.....	17
2.3.2 Muut hyödyt.....	17
2.3.3 Energy Service Company (ESCO).....	18
3 Energialaskenta ja -simulointi.....	21
3.1 Taustaa energialaskennasta ja -simuloinnista.....	21
3.2 Rakennuksen laskennallinen energiankulutus.....	22
3.2.1 Lämmitysenergia.....	22
3.2.2 Rakennuksen lämpöhäviöenergia.....	23
3.2.3 Lämmitysjärjestelmien lämpöhäviöenergia.....	24
3.2.4 Lämpökuormat.....	24
3.2.5 Jäähdytysenergia.....	25
3.2.6 Laitesähköenergia.....	25
3.2.7 Valaistus.....	25
3.2.8 Ilmanvaihto.....	26
3.3 Energiankulutukseen vaikuttavat muut merkittävät tekijät.....	26
3.4 Energiantuotanto.....	27
3.5 Energiansäästöt.....	28
3.5.1 Energian hinta.....	28
3.5.2 Korkokanta.....	29
3.5.3 Kuormien vaihtelu rakennuksen käyttöajanjaksolla.....	29
4 Mittarointi.....	30
4.1 Vaatimukset.....	30
4.2 Lämmitys.....	30
4.3 Jäähdytys.....	31
4.4 Ilmanvaihto.....	32
4.4.1 Ominais sähköteho.....	32
4.4.2 Lämmöntalteenotto.....	33
4.5 Käyttäjäsähkö.....	34
4.6 Valaistus.....	34
4.7 Sisäilmasto.....	35
4.7.1 Lämpöolot.....	35
4.7.2 Sisäilman laatu.....	36
4.7.3 Sisäilmastomittausten laajuus.....	36
4.8 Energiantuotanto.....	37
4.8.1 Aurinkosähköjärjestelmä.....	37
4.8.2 Maalämpöjärjestelmä.....	38
4.9 Veden kulutus.....	39
4.10 Muut mittaukset.....	39

4.10.1	Järjestelmien käyttöajat.....	39
4.10.2	Astepäiväluku .....	39
4.10.3	Sähkön laatu.....	40
4.10.4	NIALM - mittausjärjestelmä.....	40
5	Seuranta ja raportointi .....	41
5.1	Kiinteistöautomaatiojärjestelmän toimintaperiaate.....	41
5.1.1	Ohjaukset .....	43
5.1.2	Hälytykset .....	44
5.1.3	Säädöt.....	44
5.2	Energiankulutuksen ja olosuhteiden seuranta .....	44
5.2.1	Energiankulutuksen seuranta .....	44
5.2.2	Olosuhteiden seuranta.....	47
6	Toimintamallin kehitys.....	48
6.1	M&V-suunnitelman toteutuksen vaiheet.....	48
6.1.1	M&V-suunnitelman tavoitteet .....	50
6.1.2	Energiasimuloinnit.....	50
6.1.3	Mittaus- ja valvontasuunnitelma.....	51
6.1.4	Laitehyväksynnät .....	51
6.1.5	Toiminnanvarmistaminen .....	51
6.1.6	Raportointi .....	52
6.1.7	LEED-sertifikaatti.....	53
6.2	Kustannukset .....	54
6.3	Mallin sisältö .....	55
7	Projektikohteen M&V-suunnitelma .....	57
7.1	Kohde kuvaus .....	57
7.2	LEED-tavoitetaso ja M&V:n tavoitteet.....	58
7.3	Energiasimulointi .....	58
7.3.1	Lähtötiedot .....	58
7.3.2	Tulokset .....	59
7.4	Mittarointi.....	61
7.5	Mittaus- ja valvontajakson toimenpiteet .....	63
8	Yhteenveto.....	64
	Lähdeluettelo .....	66

## Symboli ja lyhenneluettelo

A	Pinta-ala (m <sup>2</sup> )
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, ASHRAE-standardi
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method, BREEAM-sertifikaatti
COP	Coefficient of performance, kylmä-/lämpökerroin
CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi
dm <sup>3</sup> /brm <sup>2</sup>	litra/bruttoneliometri
EA	Energy and Atmosphere, Energia ja ilmakehä
ESCO	Energy Service Company, Energiapalveluyritys
ESPC	Energy Savings Performance Contract, Energiansäästösopimus
FEMP	Federal Energy Management Program, Liittovaltion energiaohjelma
GBCI	Green Building Certification Institute
HCFC	Kloorifluorihilivety – yhdiste
H <sub>joh</sub>	Ominaislämpöväviö (W/K)
IDA	Indoor and Climate Energy, Simulointiohjelmisto
IFC	Industry Foundation Classes
IPMVP	International Performance Measurement & Verification Protocol
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design, LEED-sertifikaatti
LTO	Lämmöntalteenotto
M&V	Measurement and Verification, Mittaus ja valvonta
NIALM	Non-Intrusive Appliance Load Monitoring, NIALM-mittausjärjestelmä
n <sub>p</sub>	Poistoilman lämpötilahyötysuhde

$n_t$	Tuloilman lämpötilahyötysuhde
$n_{\text{vuotoilma}}$	Vuotoilmakerroin (1/h)
$n_{50}$	Ilmavuotoluku sisä- ja ulkoilman 50 Pascalin paine-erossa
$P_E$	Sähköteho (W)
$P_h$	Lämpöteho (W)
$q_v$	Ilmavirta (litra/sekunti)
RakMk	Rakentamismääräyskokoelma
SFP	Specific Fan Power, Ominais sähköteho (kW/(m <sup>3</sup> /s))
S <sub>17</sub>	Astepäiväluku, joka lasketaan + 17 c oletetun sisälämpötilan ja ulkolämpötilan vuorokausikeskiarvon erotuksen avulla
THD	Total harmonic distortion, kokonaissärö
$t_j$	Jäteilman lämpötila (°C tai K)
$t_p$	Poistoilman lämpötila (°C tai K)
True-RMS	True Root Mean Square
$t_u$	Ulkoilman lämpötila (°C tai K)
$t_{uLTO}$	Ulkoilman lämpötila lämmöntalteenottolaitteen lämmittämisen jälkeen (°C tai K)
U	Lämmönläpäisykerroin (W/m <sup>2</sup> K)
USGBC	United States Green Building Council
VOC	Volatile Organic Compounds
WE	Water Efficiency, Vesitehokkuus



# 1 Johdanto

Diplomityön tavoitteena on kehittää malli mittaus- ja valvontasuunnitelman (M&V-suunnitelma) laatimiseen uudisrakennuksille Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) – ympäristösertifikaatin vaatimukseen perustuen. Suunnitelman avulla varmistetaan, että rakennus toimii suunnitellulla tavalla, mahdollisimman energiatehokkaasti sisäilmaston laadulliset tekijät huomioiden sekä talotekniset järjestelmät on toteutettu suunnitelmien mukaisesti. Suunnitelma edesauttaa rakennuksen energiatehokkuustavoitteiden saavuttamista. Diplomityössä keskitytään koko rakennuksen kattavaan kalibroituun energiasimulaatioon. Yleisen mallin lisäksi M&V-suunnitelma laaditaan LEED-sertifioitavaan projektikohteeseen.

Viime vuosina keskustelu kasvihuonepäästöjen vähentämisestä ja energiatehokkaasta rakentamisesta on lisääntynyt. Euroopan Unioni (EU) on sitoutunut yksipuolisella sopimuksella vähentämään kasvihuonepäästöjä vähintään 20 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2020 mennessä (KOM(2007) 1). Rakennussektori on EU:n suurin energiankäyttäjä ja hiilidioksidipäästöjen lähde. Se aiheuttaa noin 40 % EU:n energian loppukulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen kokonaismäärästä (KOM(2008) 780). Alalla on huomattavia käyttämättömiä mahdollisuuksia kustannustehokkaisiin energiansäästöihin, jotka toteutuessaan merkitsisivät 11 % pienempää loppuenergiankulutusta vuonna 2020 (KOM(2008) 780). Energiatehokkuuden kehittäminen on hyvin ajankohtainen aihe rakennusalalla.

Merkittävänä työkaluna kasvihuonepäästöjen vähentämiseen ja energiatehokkaaseen rakentamiseen määräysten, verojen ja kannusteiden ohella ovat ympäristösertifikaatit, joiden tavoitteena on ohjata kohteen suunnittelua ja rakentamista kohti energiatehokkuustavoitteiden saavuttamista. Laskennallisia energiatodistuksia on laadittu jo useita vuosia. Ne toimivat työkaluna rakennusten välisessä energiatehokkuusvertailussa. Energiasimuloinnin avulla vastaavasti saadaan jo suunnitteluvaiheessa todellisempi arvio rakennuksen tulevasta energiankulutuksesta. Suunnitteluvaiheessa voidaan vertailla erilaisia ratkaisuja energiatehokkuuden näkökulmasta ja laskea niille esimerkiksi takaisinmaksuaika.

Vaikka suunnittelussa huomioidaan energiatehokkuustavoitteet, niiden toteutumista tulisi myös seurata rakennuksen käytön aikana. Saavutettiin suunnittelutavoitteet? Toimivatko järjestelmät oikein? Käytetäänkö niitä oikein? Rakennuksen käytönaikaista jatkuvaa toiminnanvarmistamista toteuttaa usea palvelualan yritys, mutta energiankulutuksen analysoinnissa ei uudisrakennuksen valmistuttua ole vielä hyvää vertailukohtaa. Kokonaiskulutusten lisäksi tulisi tarkastella järjestelmien osakulutuksia ja tehokkuussuureita, jotka antavat yksityiskohtaisemman arvion niiden teknisestä toimivuudesta.

Haasteen M&V-suunnitelman laadintaan aiheuttavat LEED-sertifikaatin asettamat vaatimukset, jotka antavat melko paljon liikkumavaraa suunnitelman laatijalle. Kirjallisuuslähteissä ei kuvata suunnitelman laadinnan prosessia kokonaisvaltaisesti, vaan ne keskittyvät toteutusvaihtoehdon valintaan ja energiasäästöjen määrittämiseen.

## 2 Mittaus- ja valvontasuunnitelma

Luvussa käsitellään kirjallisuudessa esitetyt vaatimukset M&V-suunnitelman sisällölle, toteutusvaihtoehdot ja vaihtoehdon valinta sekä hyödyt. Suunnitelma on aina kohdekohtainen ja siten edellä mainittujen osa-alueiden laajuus ja merkittävyys korostuvat eri tavalla eri kohteissa.

### 2.1 Vaatimukset

M&V-suunnitelma laaditaan rakennusten energiatehokkuusprosessin varmistamiseksi perustuen LEED-sertifikaatin asettamiin vaatimuksiin. Nämä vaatimukset esitellään yhteenveto-omaisesti luvussa 2.1.1 ja niitä käsitellään yksityiskohtaisemmin diplomityön muiden lukujen yhteydessä. Suunnitelma asettaa vastaavasti vaatimuksia talotekniselle suunnittelulle ja projektiryhmän toiminnalle. Lisäksi suunnitelmaa laadittaessa ja kehitettäessä on tärkeää tuntee muiden vastaavien ympäristösertifikaattien vaatimukset vastaaville energiatehokkuuden kehitystoimenpiteille.

M&V-suunnitelman yleiselle mallille asetettiin vaatimus, että sen avulla suunnitelma voidaan toteuttaa myös muille kuin LEED-sertifioitaville kohteille. Tämä vaikuttaa oleellisesti kohteen energiasimulointiin, joka on esitelty luvussa 3.

#### 2.1.1 LEED-sertifikaatin asettamat vaatimukset

LEED-ympäristöluokitus on United States Green Building Councilin (USGBC) kehittämä luokitusjärjestelmä. LEED-luokitusjärjestelmässä kiinteistölle annetaan pisteitä ympäristöystävällisyydestä kuudessa kategoriassa. Luokitusjärjestelmän maksimi pistemäärä on 100, sertifiointiin vaaditaan 40 pisteen lisäksi tiettyjen minimivaatimusten täyttymistä. Sertifikaatit on jaettu ryhmiin Sertifioitu, Hopea, Kulta ja Platina.

Diplomityö liittyy energiankäytön hallinta ja tehostamis (Energy and Atmosphere, EA) – kategoriiaan. Kategoriassa työn kannalta oleellisimpina minimivaatimuksina ovat rakennuksen energijärjestelmien käyttöönotto (EAp1) ja energiatehokkuuden minimitason saavuttaminen (EAp2). Kategorian pistekohdista energiatehokkuuden optimointi (EAc1), uusiutuvan energian käyttö (EAc2) sekä energijärjestelmien tehostettu käyttöönotto (EAc3) liittyvät läheisesti työn sisältöön. Energiatehokkuuden optimoinnin dokumentaatio toteutetaan energiasimuloinnilla ja se on käsitelty luvussa 3. M&V-suunnitelma on kategorian viides pistekohta (EAc5). (USGBC 2009)

Veden käytön hallinta ja tehostaminen on myös yksi LEED-sertifikaatin pisteytyskohta. Pisteitä voi ansaita vettä säästävällä kastelulla (WEc1.1–1.2), innovatiivisilla jätevesiteknologioilla (WEc2) sekä veden käytön vähentämisellä (WEc 3.1–3.2). (USGBC 2009)

LEED-sertifikaatti asettaa vaatimuksia M&V-suunnitelman sisällölle ja sen avulla voi ansaita 3 LEED-pistettä (USGBC 2009, NC 2009 Eac5). Vaatimukset ovat seuraavat:

- M&V-suunnitelman tulee perustua koko rakennuksen käsittävään kalibroituun simuloituun malliin (toteutusvaihtoehto D) tai yksittäisten laitteiden energian säästötoimenpiteisiin (toteutusvaihtoehto B) ja suunnitelma kehitetään ja toteutetaan International Performance Measurement & Verification Protocol:an (IPMVP) antamien ohjeiden mukaisesti (IPMVP 2003).
- Mittaus- ja valvontajakson on oltava vähintään yksi vuosi rakennuksen käyttöönotosta.
- Suunnitelmassa on esiteltävä prosessi korjaavista toimenpiteistä, jos M&V-suunnitelma osoittaa, että suunniteltuja energiansäästöjä ei ole saavutettu.

IPMVP esittelee M&V-suunnitelman konseptin. Se ei ota kantaa yksityiskohtaisiin toimenpiteisiin suunnitelman toteuttamisessa, mutta esittelee, mitä asioita suunnitelman on ainakin sisällettävä. Vaatimuksissa ei määritellä esimerkiksi suunnitelman formaattia, mittaroinnin laajuutta ja muiden vaatimusten toteutustapaa yksityiskohtaisesti. Taulukossa 1 on listattu IPMVP:n asettamat vaatimukset M&V-suunnitelman sisällölle (IPMVP 2003). Vaatimukset on jaettu neljään kategoriaan selkeyden vuoksi.

**Taulukko 1.** IPMVP:n asettamat vaatimukset M&V-suunnitelman sisällölle. (IPMVP 2003, 8-10)

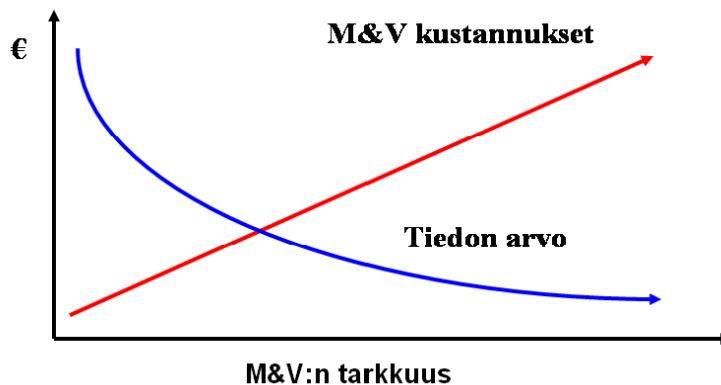
<p><b>Perusteet</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Mittauksen ja valvonnan tavoitteet, toteutustapa ja rajoitteet</li> <li>– Suunnitelman toteutusaikataulu</li> <li>– Suunnittelutavoite</li> </ul>
<p><b>Energiatehokkuus</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Merkittävimpien suunnitteluratkaisujen kuvaus</li> <li>– Pitkäaikaisten säästöjen arvioinnin perusteet ja oletukset</li> <li>– Vertailutason dokumentointi ja merkittävien oletusten kuvaus</li> <li>– Säästöjen arvioinnissa käytettyjen laskentamallien, työkalujen ja oletusten käyttö sekä niiden rajoitteet</li> <li>– Laskentamalliin tehdyt erityiskysymysten käsittelytapa</li> <li>– Perusteet esimerkiksi asetetun määräystason valinnalle, määräykset ja suunnitteluohjeet</li> </ul>
<p><b>Seuranta</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Toteutuman seurannan mittarit, mittarityypit, mittatarkkuus ja kalibrointi</li> <li>– Menettelyt puuttuvien mittatietojen täydentämisessä tai laskennallisessa määrittämisessä</li> <li>– Käyttöön liittyvien parametrien seuranta ja keruutapa sisältäen käyttöajat, säädäntä, järjestelmien käyttöajan ja ohjauksen vaikutuksen</li> <li>– Simulointimallin kalibroinnin menettelyt, kalibroivat tekijät ja arvojen mittaustapa</li> <li>– Arvioitu suunnitelman kokonaistarkkuus ja merkittävimpien epävarmuusalueiden kuvaus</li> <li>– Seurantajakson ajallinen pituus</li> <li>– Laadunvalvonnan prosessi ja laadunvalvonnan parametrit</li> </ul>
<p><b>Raportointi</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Raportoinnin formaatti</li> <li>– Laittehyväksyntöjen raportointi</li> <li>– Vastaanotossa tehtyjen mittausten raportointi</li> <li>– Takuuajan seurannan raportointi</li> </ul>

Kuten taulukosta 1 huomataan, osa vaatimuksista on selkeämpiä ja osa vastaavasti tulkinnanvaraisempia. Vaatimusten on annettava suunnitelman laatijalle liikkumavaraa, sillä suunnitelma on aina kohdekohtainen ja jokainen kohde on uniikki. LEED New Construction Reference Guide määrittelee kuusi osa-alueita, jotka vaikuttavat oleellisesti mittauksen ja valvonnan laajuuteen ja tarkkuuteen (USGBC 2009, 318):

- Mittauspisteiden lukumäärä ja tyyppi
- Mittaustoimintojen ajallinen kesto ja tarkkuus
- Jatkuvasti mitattavien tai määritettävien muuttujien lukumäärä ja monimutkaisuus
- Olemassa olevan tiedonkeruujärjestelmän käytettävyys
- Rakennusajan jälkeen M&V:n liittyvien yksityiskohtien määrittämisen taso
- Raportoinnille ja analysoinnille asetettu tarkkuus- ja luotettavuustaso

M&V:n kustannusten arvioitu suuruus ilmaistaan kirjallisuuslähteissä usein prosentuaalisena osuutena vuosittaisista säästöistä. Ylläpitokustannusten suuruudeksi Federal Energy Management Program (FEMP) on arvioinut noin 3-15 % vuosittaisista säästöistä (U.S. Department of Energy 2004, osa 4). Yhdysvaltojen Liittovaltion energiaprojekteissa vastaava arvio on 1-10 % (M&V Guidelines 2008, 5-9). Arvioista ei kuitenkaan selviä, millaiset kustannukset niihin on sisällytetty.

M&V-suunnitelmaa laadittaessa on pyrittävä optimoimaan hankittavan tiedon määrä ja tarkkuus suhteessa niistä saatavaan lisäarvoon. Kuvassa 1 on havainnollistettu M&V:n kustannuksia ja tiedon arvoa suhteessa M&V:n tarkkuuteen. Kustannusten noustessa M&V:n tarkkuus paranee ja virhemarginaali pienenee. Vastaavasti toteutettaessa hyvin yksityiskohtaista mittausta ja seurantaa, saatavan tiedon suhteellinen arvo laskee.



Kuva 1. M&V:n kustannusten ja tiedon arvon suhde M&V:n tarkkuuteen. (Mukaiiltu viitteen M&V Guidelines 2008 kuvasta säästöjen epävarmuuden suhde M&V:n kustannuksiin, 5-9)

### 2.1.2 Katsaus BREEAM-sertifikaatin vastaaviin vaatimuksiin

BRE Environmental Assessment Method (BREEAM) – toimistosertifikaatin maksimipistemäärä on 100 pistettä, joista 19 pistettä liittyvät uudisrakennuksen energiankäyttöön (Ene). Sertifikaatin kohta Ene-2 asettaa yksityiskohtaisia vaatimuksia rakennuksen energiankäytön alamittauksille. Kohdasta ansaittava pistemäärä on ainoastaan yksi piste, mutta se on saavutettava, jos kohteelle haetaan vähintään Erittäin hyvä – tason sertifikaatti. (BRE Global 2008).

Alamittausjärjestelmän on käsitettävä tilojen lämmitys, lämmin käyttövesi, kosteus, jäähditys, merkittävimmät tuulettimet, valaistus, käyttäjäsähkö sekä muut merkittävät energiaa kuluttavat järjestelmät (esim. hissit liukuportaat). Valaistus ja käyttäjäsähkö voidaan mitata samalla mittarilla, mikäli mittaus toteutetaan kerroskohtaisesti. (BRE Global 2008, Ene-2)

Suunnitteluvaiheessa alamittausjärjestelyt osoitetaan teknisten piirustusten tai yksityiskohtaisten dokumenttien avulla, joista on selvittävä seuraavat tiedot: energiaa kuluttava järjestelmä, mittaustapa, mittarityyppi ja – sijainti. Lisäksi on osoitettava, että kiinteistöautomaatiojärjestelmällä voidaan toteuttaa energiaseurantaa. Rakennuksen valmistuttua vaaditaan lisäksi arvioijan loppukatselmus ja valokuvatodiste, jotka varmistavat yksittäisten alamittareiden tai kiinteistöautomaatiojärjestelmän toiminnan ja sijainnin. (BRE Global 2008, Ene-2)

Lisäksi voidaan ansaita yksi piste alamittaamalla energiankulutus vuokralaisittain sekä suuret energiakuormat erikseen (Ene-3). Yhden vuokralaisen rakennuksissa kyseenomainen piste voidaan ansaita mittaamalla energiankulutus esimerkiksi osastoittain. Piirustuksiin on kirjattava vuokralaisten tai osastojen alueet ja mittareiden sijainnit sekä laadittava yksityiskohtaiset dokumentit, joista varmistuu mittausjärjestelyt sekä mittarityypit. (BRE Global 2008, Ene-3)

Muut BREEAM-toimistosertifikaatin energiankäytön pistekohdat liittyvät hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen (Ene-1, 15 pistettä), energiatehokkaaseen ulkovalaistukseen (Ene-4, 1 piste), matalaan tai nollahiiliteknologiaan (Ene-5, 3 pistettä) sekä energiatehokkaisiin hisseihin (Ene-8, 2 pistettä) ja liukuportaisiin (Ene-9, 1 piste). Pistekohtien Ene-6 ja Ene-7 sisältöä ei vielä ole määritetty. (BRE Global 2008)

### 2.1.3 Mittauksen ja seurannan asettamat vaatimukset suunnittelulle ja projektiryhmän toiminnalle

Taloteknisessä suunnittelussa on huomioitava energiatehokkuuden ja kulutuksen mittarointi. Laitteiden ja järjestelmien tehokkuus- ja kulutustietoja on kyettävä mittaamaan riittävän kustannustehokkaasti. Mittaroinnin asettamista vaatimuksista taloteknisellesuunnittelulle kerrotaan yksityiskohtaisesti luvussa 4. Lisäksi rakennukseen on toteutettava riittävän laaja kiinteistöautomaatiojärjestelmä tehokkaan seurannan varmistamiseksi.

Suunnitteluratkaisun energiasimuloinnin toteuttaminen vaatii projektiin osallistuvien sidosryhmien välistä tiivistä tiedonvälitystä. Suunnittelijoiden ja urakoitsijoiden on ilmoitettava energianhallinnasta vastaavalle taholle laitteiden ja järjestelmien ominaisuuksia ja pidettävä suunnitelman laatija ajan tasalla mahdollisista muutoksista.

## 2.2 Toteutusvaihtoehdot

IPMVP:n mukaisesti M&V-suunnitelman toteutusvaihtoehtoja on neljä erilaista, joista vaihtoehdot A ja B soveltuvat laite- tai järjestelmätasoiseen suunnitelmaan ja vaihtoehdot C ja D koko rakennuksen energiankulutusta tarkastelemaan suunnitelmaan. Suunnitelman toteuttaminen vaihtoehtojen C tai D mukaisesti sisältää tietenkin myös järjestelmäkohtaisen tarkastelun. Seuraavassa esitellään uudisrakennuksen M&V suunnitelman eri toteutusvaihtoehtojen ominaispiirteet (taulukko 2) ja toteutusvaihtoehdon valinnan prosessikuvaus (kuva 2). Tämä diplomityö keskittyy erityisesti vaihtoehto D:n, kalibroidun tietokonesimulaation tarkasteluun. Se on vaihtoehtoista laajin ja kustannuksiltaan merkittävin.

Taulukko 2. Uudisrakennuksen M&V-suunnitelman toteutusvaihtoehtojen yleiskuvaus. (Mukailtu IPMVP taulukosta 1, 2003, 11)

M&V toteutusvaihtoehto	Perustason määrittäminen	Tyypillinen sovellus
<b>A) Osittain mitattu jälkiasennettu laite tai järjestelmä</b>  Säästöt määritetään avainparametrien lyhytaikaisilla tai jatkuvilla mittauksilla.	Lasketaan oletetun energiatehokkuuden mukaisesti rakentamisen jälkeisissä olosuhteissa.	Valaistusjärjestelmä, jonka energiankulutus jaksoittaisesti mitataan.
<b>B) Jälkiasennettu laite tai järjestelmä</b>  Säästöt määritetään kaikkien oleellisten energiankäytön ja toiminnallisten parametrien mittauksella.	Lasketaan oletetun energiatehokkuuden mukaisesti rakentamisen jälkeisissä olosuhteissa.	Vaihtuvanopeuksien moottori, jonka energiankulutus mitataan.

M&V toteutusvaihtoehto	Perustason määrittäminen	Tyypillinen sovellus
<b>C) Koko rakennus</b>  Säästöt määritetään oleellisten energiankäytön mittausten ja/tai alamittausten avulla.	Määritetään samanlaisen rakennuksen mitatun energiankulutuksen avulla.	Uudisrakennus, joka sisältää energiatehokkaita ratkaisuja.
<b>D) Kalibroitu simulaatio</b>  Säästöt määritetään oleellisten energiankäytön mittausten ja/tai alamittausten tai mitatuilla arvoilla kalibroidun mallin avulla.	Muodostetaan koko rakennuksen kattava energiasimulaatio M&V-jakson toiminnallisten ehtojen perusteella.	Uudisrakennus. (Käytetään esim. suorituskykyyn pohjautuvia sopimuksia energiatehokkuuden hallinnassa)

**Toteutusvaihtoehto A:ssa** laitteen avainparametrit energiankulutuksen kannalta mitataan ja muut voidaan määrätä, jos niistä aiheutuvan virheen vaikutus raportoituihin säästöihin ei ole merkittävä. Se on käyttökelpoisiin jatkuville ja/tai ennustettaville kuormille, joita ovat esimerkiksi valaistusjärjestelmät ja kiinteä nopeuksiset moottorit. Mittauksen tarvitsee käsittää esimerkiksi valaistusjärjestelmässä ainoastaan energiankulutuksen mittausta. Jos voidaan olettaa, että parametri ei tule muuttumaan, mittauksia suoritetaan välittömästi laitteen asennuksen jälkeen ja lisäksi tarkastusmittauksia tietyin väliajoin. Vastaavasti päivittäin tai tunneittain muuttuvat parametrit saattavat vaatia jatkuvaa mittausta. Vaihtoehto A on edullinen toteuttaa. (IPMVP 2003, 13–15)

Pohdittaessa mitattavia parametrejä, tulee huomioida suunnitelman päämäärä. Esimerkiksi jos tarkoituksena on määrittää säästöt perustuen laitteen taattuun suorituskykyyn riittää, kun mitataan ainoastaan suorituskykyyn liittyvät parametrit.

**Toteutusvaihtoehto B:n** säästöjen määrittäminen on sama kuin vaihtoehto A:n, mutta siinä ei sallita parametrien määräämistä. Kaikki energiankäytön ja toiminnan kannalta oleelliset parametrit on mitattava joko jatkuvina tai jaksottaisina mittauksina. Tämän vuoksi epävarmuus säästöjen määrittämisessä on pienempi, mutta kustannukset ovat suuremmat. Vaihtoehto B on käyttökelpoisiin vaihtuville kuormille kuten muuttuva nopeuksisille moottoreille. Perustaso on pystyttävä myös luotettavasti laskemaan. (IPMVP 2003, 15–16)

**Toteutusvaihtoehto C:ssä** mittarointi käsittää koko rakennuksen energiankulutuksen. Perustaso määritetään fyysisesti ja toiminnallisesti samanlaisten rakennusten energiankulutuksesta. Vaatimuksiin sisältyvät muun muassa sijainnin ja ilmaston, käyttötarkoituksen ja käyttöaikataulun, laajuuden sekä järjestelmien toiminnan ja ohjauksen samankaltaisuus. Määrittämisessä ei siis huomioida suunnittelun tuloksena syntyneitä tehokkaampia ratkaisuja. Vaihtoehto C on käyttökelpoisiin projekteille, joissa vertailupohja on olemassa ja virhemarginaalit ovat kohtuulliset sekä on olemassa tarve rakennustasoiseen mittarointiin järjestelmätasoisesta sijasta, mutta budjetti on hyvin rajoittunut. Kustannuksiin vaikuttavat eniten perustason määrittäminen ja projektilta vaadittu säästöjen määrittämisen tarkkuus. (IPMVP 2003, 16–18)

**Toteutusvaihtoehto D:ssä** rakennuksen energiankulutuksesta toteutetaan tietokonesimulaatio, yleensä tuntitasoinen. Simulointi rakennetaan suunnittelutietojen perusteella ja kalibroidaan raportoinnin yhteydessä mitatuilla parametreilla. Simuloinnissa huomioidaan muun muassa ilmaston ja toiminnallisten ominaisuuksien vaikutus energiankulutukseen. Simulaation onnistuneen toteutuksen kannalta erityisen

tärkeää on suunnitteluratkaisun yksityiskohtainen määrittäminen ja sen toiminnallinen tunteminen. Suunnitteluratkaisun simuloinnille toteutetaan myös vertailusimulaatio, jolloin arviointi energiatehokkuusnäkökulmasta tehostuu.

Myös toteutusvaihtoehto D:ssä kaikkia parametrejä ei voi tai kannata mitata, vaan osa joudutaan määräämään. Kyseenomaiset parametrit on dokumentoitava huolella, jotta ne niiden vaikutus voidaan huomioida tulosten analysointivaiheessa. Mittauksien jakso on sama kuin muissa vaihtoehdoissa, rakennuksen käyttöönoton yhteydessä ja tarpeen mukaisin väliajoin. Huomioitavaa on, että jatkuvissa mittauksissa tulokset on keskiarvostettava tuntitasoisiksi, jotta ne ovat linjassa simulointiohjelmista saatavan tiedon kanssa. (IPMVP 2003, 18–21)

IPMVP esittää kaksi vaihtoehtoista tapaa säästöjen todentamiseen. Vaihtoehdossa 1 rakennuksen kalibroitu simulointi perustason energiankulutusta verrataan kalibroidun suunnitteluratkaisun simulointimallin kulutukseen ja vaihtoehdossa 2 mitattuun kulutukseen. Simulointimallin perustason energiankulutus kalibroidaan vastaamaan samoja rakennuksen ja järjestelmien käyttöaikoja, säätietoja ja muita toiminnallisia arvoja. (IPMVP 2003, 22–23)

$$\text{Energiansäästöt} = \text{Kalibroitu perustason energiankulutus} - \text{Kalibroidun suunnitteluratkaisun mallin energiankulutus} \quad (1)$$

$$\text{Energiansäästöt} = \text{Kalibroitu perustason energiankulutus} - \text{Mitattu energiankulutus} \quad (2)$$

Valintaan vaikuttaa suunnitelman tavoitteet. Vaihtoehto 1 minimoi simulaatiomallista johtuvan virheen vaikutuksen energiansäästöihin. Se ei automaattisesti huomioi laitteen tai järjestelmän suorituskyvyn alenemista, vaan malli täytyy kalibroida uudelleen tietyin aikavälein. Myös rakennuksen laitteiden ja järjestelmien toiminnallisia parametrejä usein säädetään ensimmäisten vuosien aikana. Vaihtoehto 2 vaatii vastaavasti simulaatiolta virheettömyyttä ja mahdollisten simulaatiovirheiden tunnistamista ja huomioimista energiansäästöjen virhemarginaalissa. (IPMVP 2003, 22–23)

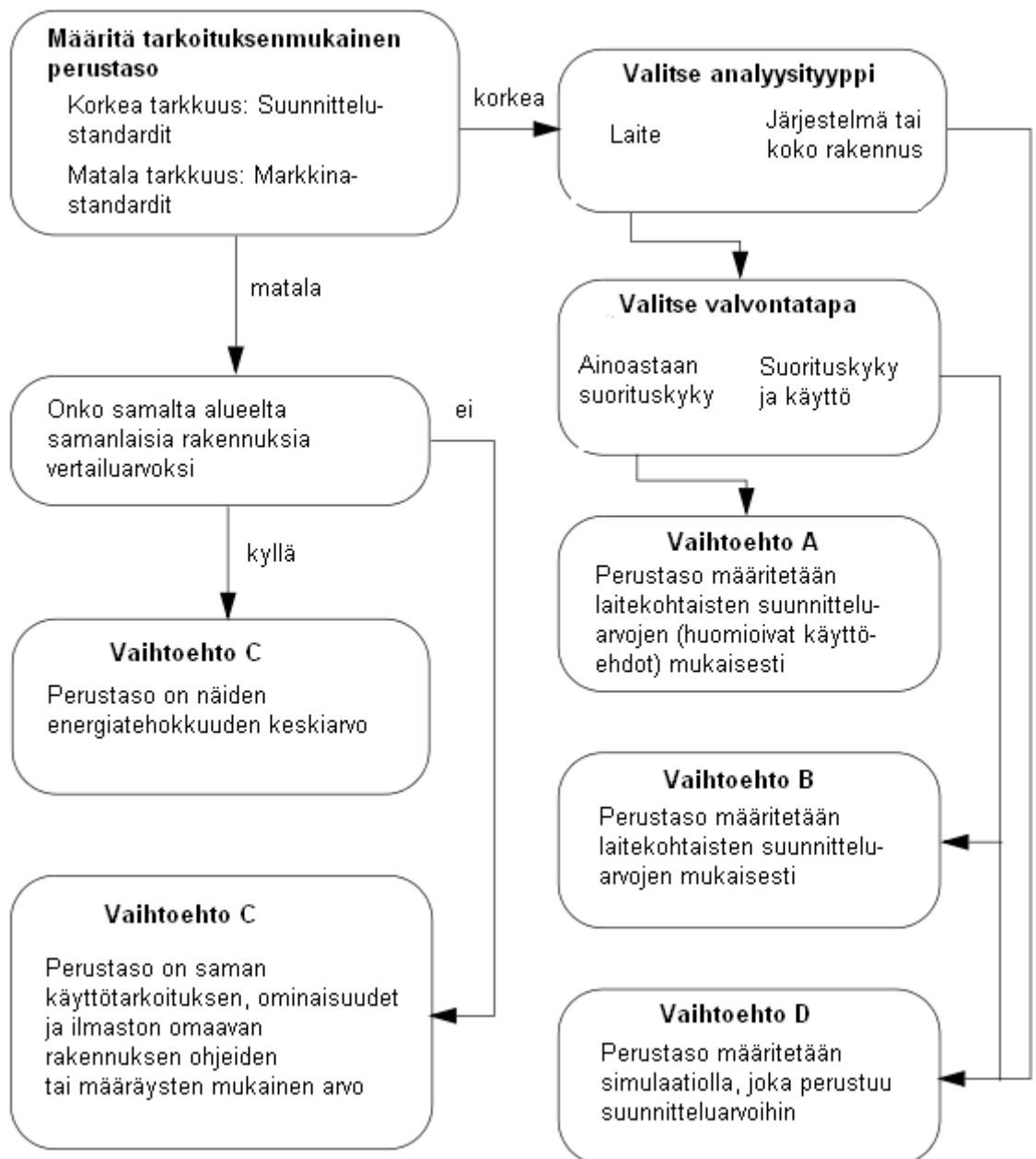
LEED NC (New Construction) 2009 mukaisissa hankkeissa M&V-suunnitelmassa energiasäästöjen määrittämisessä on käytettävä vaihtoehto 2:tä. Vastaavasti LEED CS (Core & Shell) 2009 hankkeissa vaihtoehto 1:tä. (USGBC 2009, 315). Säästöjen määrittäminen oheisten vaihtoehtojen mukaisesti edesauttaa rakennusten kansainvälistä energiatehokkuusvertailua.

Ongelman säästöjen määrittämisessä aiheuttaa useimmille kiinteistön omistajille kulutuksen vertaus ”perustason kulutukseen”. Suomessa LEED-hankkeissa käytettävä ASHRAE-standardi voi olla vieras käsite ja tämän vuoksi vertailutasona epäluonteva. Jos vertailutaso perustuisi esimerkiksi Rakennusmääräyskokoelman (RakMk) minimiarvoihin, tuloksesta syntyisi havainnollisempi.

Vaihtoehto rakennuksen ja järjestelmien toiminnan- ja käytönvarmistamisen kannalta olisi verrata rakennuksen kalibroitu suunnitteluratkaisun energiankulutusta mitattuun kulutukseen. Tällöin puutteet toiminnassa voitaisiin paikallistaa ja virhetilanteisiin puuttua. Järjestelmien toteutuksen mahdolliset puutteet myös ilmenisivät. Ongelma kyseisessä vertailussa on sama kuin vaihtoehdossa 2 eli simulointimallin tarkkuus.

Toteutusvaihtoehto D:n kustannuksiin vaikuttavat merkittävästi rakennuksen laajuus ja monimuotoisuus, vaadittu säästöjen määrityksen tarkkuus, alamittausjärjestelmän laajuus sekä simulointiohjelman käytettävyyden, monipuolisuuden ja monimutkaisuuden (IPMVP 2003).

Kuvassa 2 on esitetty M&V-suunnitelman toteutusvaihtoehtojen valinnan prosessikuvaus uudisrakennuksille. Toteutusvaihtoehdon valintaan vaikuttavat muun muassa projektin konteksti, olosuhteet, resurssit ja tavoitteet.



Kuva 2. Prosessikuvaus uudisrakennuksen M&V-suunnitelman toteutusvaihtoehdon valinnasta. (Mukailtu viitteen IPMVP 2003 kuvasta 1, 12)

### 2.3 Hyödyt

Järjestelmällinen energiatehokkuusprosessi ohjaa kohti ympäristöystävällisempää ja vähäpäästöisempää rakentamista sekä kiinteistön käyttöä. Se myös osaltaan kasvattaa julkista keskustelua ja ymmärrystä energiatehokkuuden työkaluista.

M&V-suunnitelman hyödyt liittyvät energiankulutuksen ja tehokkuuden laskennalliseen määrittämiseen sekä todentamiseen. Näiden avulla saadaan paljon hyödyllistä tietoa liittyen investointeihin, laitteiden suorituskkyyn ja käyttöön. Lisäksi energiankulutuksen mittaaminen mahdollistaa projekteissa erilaisten suorituskkyyn pohjautuvien palkkiomallien käytön (Energy savings Performance Contract, ESPC).



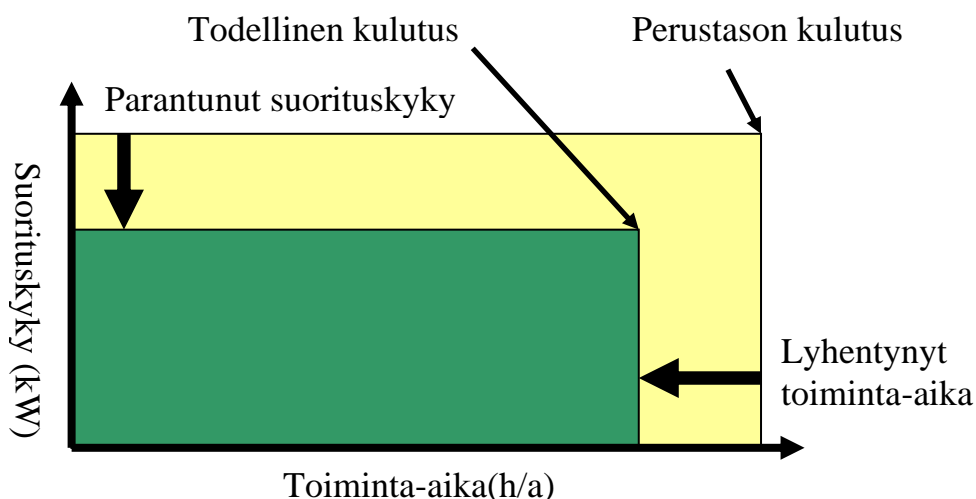
### 2.3.1 Energiankulutuksen todentaminen

M&V-suunnitelman avulla voidaan arvioida ja todentaa rakennuksen energiansäästöt. Energiansäästöt voidaan jakaa yhtälöissä (1) ja (2) esitetyn lisäksi myös yhtälöiden (3) ja (4) mukaisesti arvioituihin energiansäästöihin ja toteutuneisiin energiansäästöihin.

Arvioidut energiansäästöt = Perustason energiankulutus – Suunnitteluratkaisun energiankulutus (3)

Toteutuneet energiansäästöt = Kalibroitu perustason energiankulutus – Toteutunut energiankulutus (4)

Perustason energiankulutuksella tarkoitetaan uudisrakentamisessa vastaavan saman käyttötarkoituksen omaavan rakennuksen energiankulutusta. Se voidaan laskea tapauskohtaisesti perustuen esimerkiksi ASHRAE:n tai RakMk:n mukaisiin ohjearvoihin. Vastaavasti peruskorjauskohteissa perustasolla tarkoitetaan muutoksia ja korjauksia edeltävää rakennuksen energiankulutusta. Suunniteltu rakennuksen energiankulutus pohjautuu energiasimuloinnissa käytettyihin lähtötietoihin. Seurantavaiheessa verrataan vastaavasti perustason energiankulutusta toteutuneeseen kulutukseen ja näin voidaan todentaa rakennuksen energiansäästöt. Kuvassa 3 on havainnollistettu rakennuksen tehokkaamman energiankäytön aiheuttamia energiansäästöjä. Suorakulmioiden pinta-alat kuvaavat rakennuksen energiantarvetta.



Kuva 3. Rakennuksen tehokkaamman energiankäytön vaikutukset (M&V Guidelines 2008, 2-3).

On tärkeää muistaa, että M&V-suunnitelma ei takaa energiansäästöjä, mutta sen tehtävä on edesauttaa ja todentaa energiatehokkuustavoitteiden saavuttaminen. Säästöjen määrittämiseen sisältyy aina myös epävarmuustekijöitä, joita aiheuttavat muun muassa virheet mittauksissa, mallintamisessa ja näytteenotossa sekä liiallinen oletusten yksinkertaistaminen. Epävarmuustekijöitä ei voida täysin eliminoida, mutta niiden vaikutusta voidaan vähentää ja ne tulee huomioida myös laskelmissa. Suunnitelmassa on määriteltävä prosessi liittyen puuttuvien mittatietojen täydentämiseen ja laskennallisten suureiden määrittämiseen sekä arvioitu kokonaistarkkuus. (IPMVP 2003, 8-10)

### 2.3.2 Muut hyödyt

Rakennus-, järjestelmä ja laitekohtaisten kulutusarvioiden huomioiminen rakennuksen hanke- ja luonnossuunnitteluvaiheessa edesauttaa kokonaiskustannusajattelumallia. Energiatehokkaampien laitteiden ja järjestelmien takaisinmaksuajalle voidaan laskea arvio suunnitelmista ja todentaa se seurantajakson aikana. Suunnitteluratkaisun

energiankulutusarvion laatiminen edesauttaa vaihtoehtoisten ratkaisujen kehittämistä ja arvioimista energiakustannusten ja – tehokkuuden suhteen. Kulutuksen ennustettavuus, energiakustannusten budjetointi ja riskienhallinta helpottuvat.

M&V-suunnitelman avulla voidaan varmistua, että rakennus täyttää sille asetetut vaatimukset energiatehokkuuden suhteen. Suunnitellut järjestelmät ja laitteet toimivat oikein, niitä käytetään oikein sekä ne täyttävät valmistajan takaamat tekniset vaatimukset ja säilyttävät suorituskykynsä myös takuuajana.

Laitteiden ja järjestelmien järjestelmällinen kunnossapito säilyttää paremmin niiden suorituskyvyn. Kunnossapito voidaan jakaa kunnonvalvontaan, huoltoon (ennakoivia toimenpiteitä ja vikadiagnostiikkaa) ja korjaukseen. Kunnonvalvonnalla pyritään laitteiden ja järjestelmien vikaantumisen havaitsemaan jo ennen kuin vika johtaa merkittävään suorituskyvyn alenemiseen. Mitä aikaisemmassa vaiheessa vika havaitaan, sitä pienemmät kustannukset siitä aiheutuvat. Aktiivisen energiankulutuksen ja -tehokkuuden seurannan avulla kunnonvalvonta tehostuu ja puutteet havaitaan ja paikallistetaan nopeasti. Kunnonvalvonnassa tulee käyttää lisäksi subjektiivisia havaintoja sekä tarpeenvaatiessa erillisiä kunnonvalvonnanmittauksia. Näitä voivat olla esimerkiksi lämpötila-, värähtely, paine- ja sähköisten suureiden mittaukset.

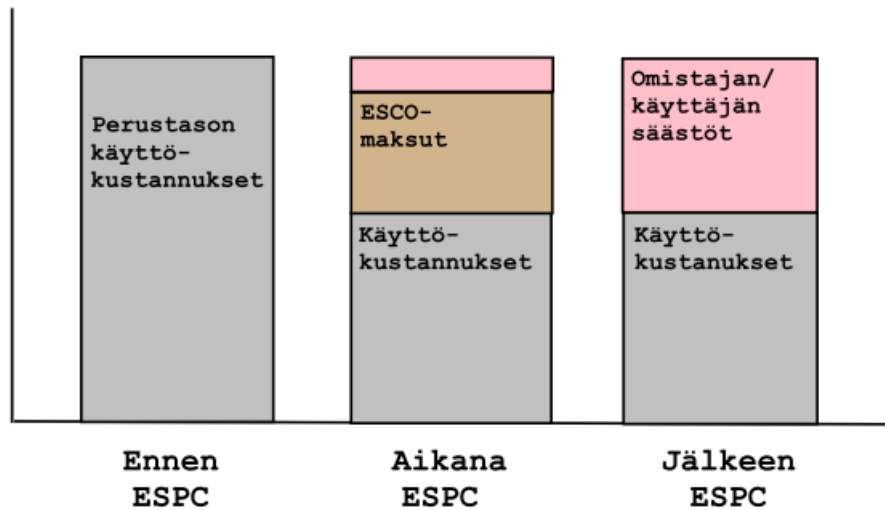
Rakennusten verotusarvo määräytyy jälleenhankinta-arvon ja siitä tehtävien ikälennusten perusteella. Esimerkiksi toimistorakennuksen jälleenhankinta-arvo määräytyy bruttopinta-alaan perustuen. Neliömetrille annetaan vuosittain perusarvo, jota korjataan rakennuksen ominaisuuksien perusteella lisäarvoilla ja alennuksilla. Perusarvonkorjauksia toimistorakennukselle ovat keksimääräinen kerrokorkeus, rakennuksen muoto, ilmastointiratkaisu, varasto- ja paikoituspinta-ala sekä hissikuilujen ala. (Valtiovarainministeriön asetus rakennusten jälleenhankinta-arvon perusteista 2009). Ympäristöministeriö on pohtinut kiinteistöveron porrastamista energiatehokkuuden ja lämmitystavan perusteella (Ympäristöministeriön raportti 22/2009). Raportin mukaan kiinteistöverotuksen porrastaminen voisi perustua energiatehokkuusluokkaan, laskennalliseen energiatehokkuuslukuun tai yksittäisiin toimenpiteisiin.

### **2.3.3 Energy Service Company (ESCO)**

Energy Service Company (ESCO) toiminta perustuu ulkopuolisen energiapalveluntoimittajan asiakkaalle toteuttamiin energiansäästöinvestointeihin ja –toimenpiteisiin. Toiminnan kustannukset maksetaan alentuneesta energiankulutuksesta aiheutuneilla säästöillä. ESCO toiminta on hyvä keino saada energiansäästöinvestointeja toteutumaan, erityisesti tilanteissa, joissa käyttäjien mahdollisuudet rahoittaa energiansäästötoimenpiteitään ovat vähäiset. Hankeen laajuus on oltava riittävä kattamaan sopimuksen ja rahoituksen järjestämisen kustannukset.

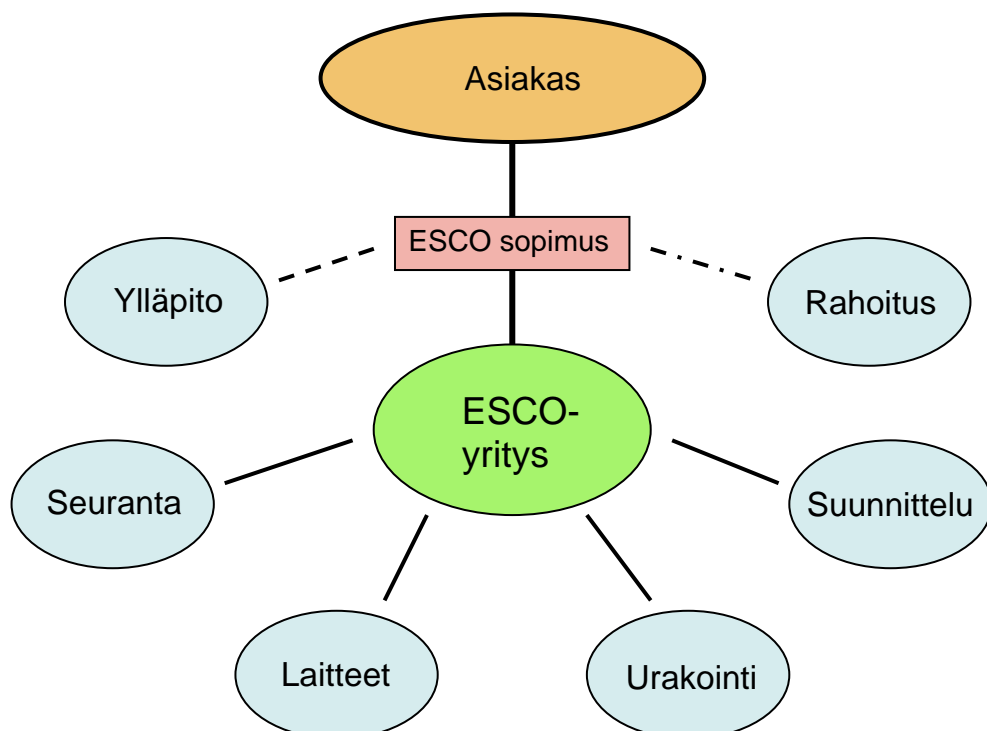
ESCO toiminta sai alkunsa 1980-luvulla Yhdysvalloissa, Kanadassa ja Ranskassa (Vehviläinen et al. 2009). Nykyisin toiminta on levinnyt ympäri maailman. ESCO toiminnan tavoitteena on myös rahoittaa uusiutuvien energianlähteiden käytön järjestelmiä, ympäristönsuojelua ja edistää tehokasta veden käyttöä (M&V Guidelines 2008, 1-1 – 1-3).

Kuvassa 4 on havainnollistettu suorituskykyyn pohjautuvan energiansäästösopimuksen (Energy savings Performance Contract, ESPC) taloudellisia vaikutuksia. Palveluntarjoaja takaa ennaltsovitun mukaiset säästöt käyttö- ja ylläpitokustannuksissa ja niiden on oltava suuremmat kuin maksut, jotka hankkeesta aiheutuvat omistajalle. Sopimusjakson aikana suurin osa säästöistä käyttö- ja ylläpitokustannuksissa maksetaan palveluntarjoajalle, mutta sopimusjakson jälkeen tuleva hyöty koituu kokonaisuudessaan omistajalle. (M&V Guidelines 2008, 1-1 – 1-3). ESCO-hankkeen vaarana on, että käyttö- ja ylläpitokustannukset nousevat hitaasti sopimusjakson jälkeen.



Kuva 4. Suoritusperusteisen sopimuksen vaikutukset kustannuksiin. (M&V Guidelines 2008, 1-2)

ESCO-hankkeissa energiansäästöpalveluntarjoaja vastaa hankkeen suunnittelusta, toteutuksesta ja toimivuudesta. Tehtäviin sisältyvät muun muassa energiaselvitykset, rakentamisen johtaminen, työvoima, laitteet ja tarvikkeet, mittaaminen ja tulosten dokumentointi sekä mahdollisesti myös ylläpito. Rahoituksesta voi vastata ESCO-toimija, asiakas tai molemmat osapuolet yhdessä. Kuvassa 5 on havainnollistettu ESCO-hankkeen osapuolia. ESCO-toimija voi myös ulkoistaa osan toiminnoistaan. (Motiva 2007)



Kuva 5. ESCO hankkeen osapuolet. (Mukaiilu viitteen Motiva 2007 kuvasta 1)

ESCO toiminnan sovellusalueita on laajasti sekä teollisuudessa että julkisella sektorilla. Toiminnan rahoittamiseksi on erityisiä rahastoja muun muassa Britanniassa, Saksassa, Tanskassa ja Unkarissa. Toimintaa edistetään erilaisin tukimuodoin kuten edullisin

lainoin, verohelpotuksin sekä tutkimus- ja kehitysrahoituksella. Ohjelmassa rakennuksia kootaan tavallisesti ryppäiksi, jotka käsittävät kymmeniä rakennuksia, hallinnointikulujen pienentämiseksi. Saksassa hankkeissa on saavutettu tyypillisesti 25–35 % energiansäästöjä vanhan rakennuskannan vuoksi. Myös Yhdysvalloissa ESCO-toiminnalla on saavutettu merkittäviä säästöjä, sillä rakennuskanta käsittää rakennuksia, joissa ei ole ollenkaan esimerkiksi valaistuksenohjausjärjestelmiä. (Vehviläinen et al. 2009, 137–142)

ESCO konseptia sovelletaan eri maissa hieman eri tavoin, mikä johtuu osin paikallisten olosuhteiden eroavaisuudesta ja osin siitä, kuinka kehittyntä ESCO-toiminta kyseenomaisessa maassa on. Yhdysvallat on ollut ESCO-projektien edellä kävijä, ja on sitä edelleen. Federal Energy Management Program (FEMP) julkaisi Yhdysvalloissa vuonna 1995 olemassa olevien liittovaltion rakennusten ESPC:n liittyvät sopimussäännöt (ESPC Procedures and Methods 1995). Vuonna 2008 ESCO-toiminnan arvo Yhdysvalloissa oli noin 4,1 miljardia dollaria (Satchwell et al 2010, viii). Toiminnan kasvuvauhti vuosina 2004–2006 oli 20 % vuodessa, vuosina 2006–2008 7 % ja arvio vuosille 2009–2011 on 26 % vuodessa (Hopper et al 2007, v-vi; Satchwell et al 2010, viii). Suurimmat syyt nopealle kasvun elpymiselle arvioidaan olevan energiatehokkuusohjelmien tukien lisääntyminen sekä asiakkaiden lisääntynyt aktiivisuus ympäristöasioita kohtaan.

Suomessa ESCO-toiminnan edistäminen on osa Suomen kansallista energiansäästöohjelmaa. Kauppa- ja teollisuusministeriöltä on mahdollista saada investointitukea ESCO-hankkeisiin. Motiva on laatinut toteutettaviin ESCO-hankkeisiin sopimusohjelmamallin, joka vastaa rakennusurakassa urakkaohjelmaa (Heimonen et al. 2007, liite 2).

### 3 Energialaskenta ja -simulointi

M&V-suunnitelmaa laadittaessa lähtötietoina toimivat energialaskennasta peräisin olevat rakennuksen energiankulutusta mallintavat tiedot, joiden avulla toteutetaan rakennuksen alustava energiankulutussimulaatio. Suunnitteluratkaisun simulaatiota verrataan vertailutason simulaatioon, jolloin rakennuksen ja taloteknisten järjestelmien energiatehokkuusominaisuudet korostuvat. Vertailuarvot perustuvat LEED-hankkeissa AHSRAE-standardin menetelmän G mukaisesti minimiarvoihin (ASHRAE 90.1–2007). Energiankulutuksen arvio päivittyy ja tarkentuu projektin edetessä. M&V suunnitelmassa on esitettävä arvio rakennuksen energiankulutuksesta ja odotettavissa olevista säästöistä (IPMVP 2003).

#### 3.1 Taustaa energialaskennasta ja -simuloinnista

Rakentamismääräysten mukaisuuden osoittaminen on tehtävä rakennuslupaa haettaessa. Hakemukseen on liitettävä liitteeksi rakennuksen energiaselvitys. Se on päivitettävä ja pääsuunnittelijan (arkkitehti) on varmennettava se ennen rakennuksen käyttöönottoa. Energiaselvityksessä tulisi ilmetä ainakin seuraavat asiat (RakMk D3 2010, 13):

- rakennuksen lämpöhäviöiden määräysten mukaisuus
- ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho
- rakennuksen lämmitysteho sisältäen käyttöveden- ja tilojen lämmitysjärjestelmän
- arvio kesäaikaisesta huonelämpötilasta ja jäähdytystehon tarpeesta
- rakennuksen arvioitu energiankulutus ja ostoenergian tarve
- rakennuksen laskennallinen energiatodistus

Energiaselvitys eroaa M&V-suunnitelman toteutusvaihtoehdon D energiasimuloinnista. Energiaselvityksen tavoitteena on helpottaa rakennusten keskinäistä energiatehokkuusvertailua (Ympäristöministeriö Energiatodistusopas 2007, 2009). Tämän vuoksi energiatodistus lasketaan esimerkiksi aina samoilla säätiedoilla, riippumatta missä paikkakunnalla rakennus sijaitsee. Energiaselvityksen laskennallinen energiankulutus voi poiketa huomattavasti todellisesta kulutuksesta, sillä laskennassa on myös monia muita epävarmuustekijöitä: ilmanvaihtomäärät (muuttuva tilavuusvirta), laitteiden todelliset hyötysuhteet käyttötilanteessa, rakennuksen käyttöajat, -tavat ja käyttäjämäärät sekä vedenkulutuksen arvio (Ympäristöministeriö Energiatodistusopas 2007, 2009).

Energiasimuloinnin avulla saavutetaan tarkempi arvio rakennuksen tulevasta energiankulutuksesta. Energiasimuloinnista saatavia tietoja voidaan käyttää hyväksi investointien kannattavuuslaskelmissa ja elinkaarikustannusanalyysissä. Monille osajärjestelmille on tärkeää tehdä yksityiskohtaisemmat kokonaiskustannusanalyysit. Julkisissa hankinnoissa on noudatettava hankintalakia, jonka mukaisesti valintaperusteena voidaan käyttää kokonaistaloudellisesti edullisinta ratkaisua (30.3.2007/348). Tämä edistää energiatehokkaiden ratkaisujen hankintaa.

LEED-sertifioinnin saavuttaakseen rakennuksen on täytettävä sertifikaatin asettamat energiatehokkuuden minimivaatimukset (USGBC 2009, EAp1-3). Energiasimulointiin liittyvä minimivaatimus on, että energiakustannukset ovat uudisrakennuksessa vähintään 10 % pienemmät kuin vertailutason energiakustannukset (EAp2: Minimum Energy Performance). Simuloitu energiankulutus dokumentoidaan ja verrataan standardin (ASHRAE 90.1–2007, appendix G) menetelmän G minimivaatimusten mukaisesti simuloituun perustason.

Rakennuksen energiatehokkuuden optimointi (EAc1: Optimize Energy Performance) on merkittävin LEED-sertifikaatin pisteytysohjeista. Koko rakennuksen energiankulutuksen simuloinnilla voi ansaita 19 pistettä uudisrakennushankkeissa, mikä vastaa lähes 20 % LEED-pisteytysmenetelmän kokonaispisteistä (100 peruspistettä + 10

lisäpistettä). Pisteytys alkaa 12 % energiakustannussäästöistä, jolla ansaitsee yhden pisteen. Tämän jälkeen jokaiseen lisäpisteeseen vaaditaan 2 %:n energiakustannussäästö. Maksimipisteet 19 saavutetaan siis 48 %:n energiakustannussäästöillä. (USGBC 2009)

Rakennuksen energiankulutusta voidaan mallintaa erilaisilla simulointityökaluilla, esimerkkinä mainittakoon Indoor and Climate Energy (IDA) -ohjelma. Useimpien simulointiohjelmistojen avulla voidaan laskea esimerkiksi sisäilmaston tila (mm. lämpöolot, ilman laatu, suhteellinen kosteus), mitoittaa lämmitys- ja jäähdytys tehontarpeet sekä simuloida valitun suunnitteluratkaisun energiankulutus. Ohjelmien laajuus nähdään usein myös niiden varjopuolena, käyttöliittymä saattaa olla raskas, parametrejä voi olla hyvin runsaasti ja simuloinnin toteutus voi olla hyvin aikaa vievää. Tämän vuoksi ei aina ole mielekäästä toteuttaa simulointia pieniin kohteisiin. Simuloinnin tekijän on usein osattava määrätä joitakin parametrejä. Niiden tulee ensisijaisesti perustua määräyksiin ja ohjeisiin. On erityisen tärkeää mainita ja dokumentoida kyseenomaiset parametrit ja oletukset, joita simuloinnissa on käytetty. Markkinoille on viime aikoina tullut myös kaupallisia suunnittelutoimistojen kehittämiä vaihtoehtoisia simulointiohjelmiä, joilla on pyritty yksinkertaistamaan ja suoraviivaistamaan rakennusten energiankulutussimulointeja.

## 3.2 Rakennuksen laskennallinen energiankulutus

Rakennuksen energiankulutus voidaan jakaa lämmityksen-, jäähdytyksen-, laitesähkön-, valaistuksen ja ilmanvaihdon energiankulutukseen. Suomessa rakennusten lämmitys on merkittävin energiaa kuluttava osa rakennuksen energiataaseesta. Lämmityksen energiankulutukseen vaikuttavat oleellisesti lämpöhäviöt, jotka voidaan jakaa rakennuksen- ja lämmitysjärjestelmien lämpöhäviöihin, sekä sisäiset lämpökuormat. Sen vuoksi ne ovat käsitelty omissa alaluvuissaan. Luvussa 3.2 on esitetty perusteet energiaselvityksen ja energiasimuloinnin laadintaan sekä lämpöhäviöiden laskentaan.

Simuloinnissa ohjelma tavallisesti laskee rakennuksen energiankulutuksen dynaamisella mallilla tunnin aika-askeleella koko vuodelle. Simuloinnissa huomioidaan rakennuksen sisäiset ja ulkoiset lämpökuormat, jotka vaikuttavat taloteknistenjärjestelmien toimintaan. Lähtötiedot perustuvat laitetoimittajilta ja eri alojen suunnittelijoilta saataviin rakennuksen ja järjestelmien teknisiin ominaisuuksiin. Rakennuksen geometrisen IFC-mallin muodostaa tavallisesti arkkitehti, mutta tämä voi olla myös energiasimuloinneista vastaavan tahon vastuulla. Rakennuksen käyttövaiheessa hankittavat tai käytöstäpoistettavat laitteet on huomioitava myös sähkön- ja lämmöntarpeen mitoituksessa ja arvioinnissa.

### 3.2.1 Lämmitysenergia

Rakennuksen lämmitysenergiantarve koostuu tilojen lämmitysenergiasta ja lämpimän käyttöveden lämmitysenergiasta. Ne lasketaan nettolämmitysenergiantarpeen, häviöiden ja lämmöntalteenotolla hyödynnettävän energian avulla. Tilojen nettolämmitysenergiantarve lasketaan rakenteiden läpi johtuvan lämpöenergian, vuotoilman ja ilmanvaihdon lämmityksen tarvitseman energian sekä hyödynnettävien lämpökuormien lämpöenergioiden avulla (RakMk D5 2007, 16–17).

Käyttöveden lämmityksen tarvitsema lämpöenergia lasketaan käyttöveden kulutuksen ja lämpötilaeron avulla. Lämpötilaerona tavallisesti käytetään 50 °C:sta. Lämpimän käyttöveden kulutusta arvioidaan tavallisesti rakennuksen ominaiskulutuksen mukaan. Esimerkiksi toimistorakennuksen lämpimän käyttöveden ominaiskulutus vuodessa on 100 dm<sup>3</sup>/brm<sup>2</sup>. (RakMk D5 2007, 26–27, 55)

### 3.2.2 Rakennuksen lämpöhäviöenergia

Rakennuksen lämpöhäviö määritetään vaipan, vuotoilman ja ilmanvaihdon yhteenlaskettuna lämpöhäviönä. Rakennuksen laskennallinen lämpöhäviö saa olla enintään yhtä suuri kuin rakennukselle määritetty vertailulämpöhäviö. Lämpöhäviöenergiat lasketaan ominaislämpöhäviöiden, sisä- ja ulkoilman lämpötilaerotuksen sekä tarkasteltavan ajanjakson pituuden avulla.

**Vaipan ominaislämpöhäviö** lasketaan yhtälön (5) mukaisesti:

$$\Sigma H_{\text{joht}} = \Sigma(U_{\text{ulkoseinä}} A_{\text{ulkoseinä}}) + \Sigma(U_{\text{yläpohja}} A_{\text{yläpohja}}) + \Sigma(U_{\text{alapohja}} A_{\text{alapohja}}) + \Sigma(U_{\text{ikkuna}} A_{\text{ikkuna}}) + \Sigma(U_{\text{ovi}} A_{\text{ovi}}) \quad (5)$$

$H_{\text{joht}}$  = rakennusosien yhteenlaskettu ominaislämpöhäviö, W/K

$U$  = rakennusosan lämmönläpäisykerroin, W/(m<sup>2</sup>K)

$A$  = rakennusosan pinta-ala, m<sup>2</sup>.

Rakennuksen lämpöhäviöiden rajoittamisesta on säännöksiä rakentamismääräyskokoelman osan D3 lisäksi osissa C3 ja D2. Rakentamismääräyskokoelman osan C3 kohdassa 3.2 on esitetty rakennusosakohtaisia lämmönläpäisykertoimia ( $U$ -arvo) ja ikkunapinta-alan vertailuarvoja. Määräykset ovat tiukentuneet kaikilta osa-alueilta vuoden 2010 alusta alkaen. (RakMk D3 2010, 10)

Energiasimuloinnissa vertailutapauksessa voidaan käyttää ASHRAE-standardin mukaisia vertailuarvoja (ASHRAE 90.1–2007, 25). Suunnitteluratkaisussa käytetään vastaavasti suunniteltuja rakennusosakohtaisia  $U$ -arvoja.

**Vuotoilman ominaislämpöhäviön** merkittävyyteen vaikuttaa vuotoilmavirran suuruus. Vuotoilmavirralla vaipan pinta-alaa kohden ( $q_v/A$ ) esitetään suurimmat sallitut arvot eri tiivisyysluokissa rakentamismääräyskokoelman osassa D2 (2010, 16). Vuotoilmavirta määritetään vuotoilmakertoimen avulla. Mikäli rakennuksen vaipan ilmavuotoluku 50 Pa:n paine-erolla kertaa tunnissa ( $n_{50}$  1/h) tunnetaan, käytetään vuotoilmakertoimena lukua  $n_{50}/25$ . Vuotoilman lämpöhäviön laskennallinen menettely esitetään yksityiskohtaisemmin RakMk:n osan D5 yhtälöissä 4.6–4.8 (2007, 20–21). (RakMk D3 2010, 11–12)

Energiasimuloinnissa ilmavuotoluku arvioidaan ja rakennuksen ilmapitävyys osoitetaan käyttöönoton yhteydessä mittaamalla ( $n_{50}$  1/h). Rakennuksen ilmapitävyyden mittaaminen suoritetaan yleensä painekoemenetelmällä, joka on esitelty standardissa (SFS-EN 13829). Toimistorakennuksissa hyvää ilmapitävyyttä kuvaavat ilmavuotoluvut 0,5–1,5 (RakMk D5 2007, 21).

Jos rakennuksen ilmapitävyyttä ei mitata tai osoiteta muulla menettelyllä (esim. talotyypikohtainen ilmapitävyyden laadunvarmistusmenetelmä), käytetään rakennuksen lämpöhäviön laskennassa rakennuksen vuotoilmakertoimena arvoa  $n_{\text{vuotoilma}} = 0,16$  1/h, joka vastaa ilmanvuotolukua  $n_{50} = 4,0$  1/h. Rakennuksen vertailulämpöhäviön laskennassa käytetään rakennuksen vuotoilmakertoimena arvoa  $n_{\text{vuotoilma}} = 0,08$  1/h, mikä vastaa ilmavuotolukua  $n_{50} = 2,0$  1/h. (RakMk D3 2010, 11–12)

**Ilmanvaihdon ominaislämpöhäviö** voidaan laskea tarvittaessa erikseen jokaiselle ilmanvaihtokoneelle. Vertailulämpöhäviön ja suunnitteluratkaisun lämpöhäviön laskennassa käytetään samoja ilmavirtoja ja käyntiaikoja (RakMk D3 2010, 12). Ilmanvaihdon lämpöhäviön eroon suunnittelu- ja vertailutapauksessa vaikuttaa ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde  $n_a$ , joka on lämmöntalteenottolaitteistolla vuodessa talteenotettavan energian suhde ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsemaan energiaan ilman lämmöntalteenottoa. Vuosihyötysuhde antaa käsityksen rakennuksen ilmanvaihdossa säästettävästä energiasta.

Vertailulämpöhäviön laskennassa käytetään ilmanvaihdon lämmöntalteenoton (LTO) vuosihyötysuhteena arvoa 0,45 (RakMk D3 2010, 12). Suunnitteluratkaisun lämpöhäviön laskennassa käytetään valmistajan ilmoittamaa laitteen varmistettua ilmanvaihdon lämmöntalteenoton vuosihyötysuhdetta. Ellei valmistajan tietoa ole saatavilla, käytetään poistoilman vuosihyötysuhteena 60 % tuloilman lämpötilahyötysuhteesta. Jos tuloilman varmennettua lämpötilahyötysuhdetta ei ole laitevalmistajalta saatavissa, käytetään rakentamismääräyskokoelman D5 taulukon 4.4 mukaisia arvoja. (RakMk D5 2007, 22–23). Ilmanvaihtojärjestelmän energiasimulointi on käsitelty luvussa 3.2.8.

### 3.2.3 Lämmitysjärjestelmien lämpöhäviöenergia

Lämmitysjärjestelmän lämpöhäviöenergiat ovat usein pieniä suhteessa rakennuksen lämpöhäviöenergiaan (RakMk D5 2007, 28–32). Rakennuksen tilojen lämmitysjärjestelmän lämpöhäviöenergiat määritetään RakMk osan D5 yhtälön 6.1 ja kohtien 6.1.3 - 6.1.6 avulla. Taulukossa 6.1 esitetään lämmönkehityksen-, lämmönjakelun-, luovutuksen- ja säädöstä johtuvan lämpöhäviöenergian vuosittaiset arvot brm<sup>2</sup>:ä kohden. Nämä jaetaan eri kuukausille alaviitteissä 2 ja 3 esitetyissä suhteissa. Kuvasta 6.1 voidaan määrittellä varaajan lämpöhäviötehot, joiden avulla lasketaan varaajan lämpöhäviöenergiat, jos valmistajan tietoja ei ole käytettävissä. (2007, 28–30)

Lämpimän käyttöveden lämmitysjärjestelmän lämpöhäviöenergia määritetään RakMk osan D5 yhtälön 6.2 ja kohtien 6.2.3 - 6.2.7 avulla. Lämpöhäviöitä syntyy lämmönkehityslaitteissa, varaajissa ja kiertojohdoissa. Lämmönkehityslaitteiden lämpöhäviöenergiat sisältyvät yleensä tilojen lämmityksen kehityshäviöihin. Varaajan arvioitu lämpöhäviöteho voidaan määrittää likimääräisesti kuvasta 6.2 ja kiertojohdon ominaislämpöhäviöenergia taulukosta 6.2, ellei valmistajan tietoja ole käytettävissä. Nämä lämpöhäviöenergiat jaetaan eri kuukausille niiden pituuksien suhteessa.

### 3.2.4 Lämpökuormat

Rakennuksen lämpökuormat koostuvat pääosin valaistuksen, ihmisten ja auringon säteilyn luovuttamasta energiasta. Lämpökuormia voidaan hyödyntää ainoastaan silloin, kun esiintyy lämmitystarvetta ja säätölaitteet vähentävät muuta lämmöntuottoa vastaavalla määrällä. Hyödyntämisteeseen vaikuttavat lämpökuormaenergioiden ja lämpöhäviöenergioiden suhde sekä rakennuksen aikavakio. (RakMk D5 2007, 47–49). Useimmat simulointiohjelmat laskevat lämpökuormat RakMk:n ohjearvojen mukaisesti automaattisesti asetetun käyttöaikaprofilin ja laskentasaan avulla.

Henkilöiden luovuttamana lämpöenergiana energiaselvityksessä voidaan käyttää RakMk:n osan D5 taulukon 8.1 arvoja, jos tarkempia tietoja ei ole käytettävissä. Tällöin esimerkiksi toimistorakennuksessa henkilöiden luovuttama ominaislämpöenergiana käytetään arvoa 10 kWh/brm<sup>2</sup> vuodessa. Jos vastaavasti henkilömäärästä ja oleskeluajasta on olemassa riittävän tarkka arvio, lasketaan lämpöenergia kohtien 8.1.2–8.1.4 mukaisesti. (2007, 39–40)

Lämmitysjärjestelmien lämpöhäviöenergiasta lämpökuormaksi tuleva osuus lasketaan RakMk:n osan D5 kohtien 8.2.1 ja 8.2.2 mukaisesti. Valaistuksesta ja sähkölaitteista vapautuvana lämpökuormaenergiana laskelmissa käytetään kohdan 8.3.1 mukaisesti 100 % valaistuksen sähköenergiasta, 50 % koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmän sähköenergiasta ja 60 % muiden laitteiden sähköenergiasta. Ikkunoiden kautta rakennukseen tuleva auringon säteilyenergia voidaan tarvittaessa laskea RakMk osan D5 yhtälön 8.6 mukaisesti kuukausittain. Auringon kokonaissäteilyenergiona energiaselvityksessä käytetään ilmansuunnittain ja kuukausittain RakMk osan D5 liitteen 1 taulukon L1.4 arvoja. (2007, 41–46)



### 3.2.5 Jäähdytysenergia

Jäähdytysenergiankulutus määritetään jäähdytysenergian tarpeen ja hyötysuhteen avulla. Tavallisesti jäähdytystarvetta rakennuksessa esiintyy kesäkuukausina, mutta myös talvikuukausina saattaa esiintyä tarvetta esimerkiksi suurten ATK-konesalien jäähdytykseen.

Hyötysuhde huomioi muun muassa järjestelmän putkistojen ja varaajan kylmähäviöt. Jäähdytysjärjestelmän hyötysuhteena energiaselvityksessä käytetään arvoa 0,7, ellei tarkempia tietoja ole saatavilla. Jäähdytysenergian tarve lasketaan RakMk:n osan D5 liitteessä 2 olevan yhtälön mukaisesti (L2.2). Jäähdytysenergiankulutuksen laskennassa lämpökuormat ja muut lähtötiedot ovat samat kuin lämmitysenergiankulutuksen laskennassa. (2007, 17, 71)

Jos energiasimuloinnin vertailutapaus perustuu ASHRAE-standardiin, käytetään järjestelmän kylmäkertoimen (Coefficient of performance, COP) taulukon 6.8.1A-6.8.1G minimiarvoja (ASHRAE 90.1–2007, 43–49). Kylmäkertoimen arvo valitaan taulukosta suunnitellun jäähdytysratkaisun ja kokonaissähkötehon perusteella. Vuoden 2010 alusta alkaen simuloinnissa on käytettävä taulukossa esitettyjä korkeampia kylmäkertoimen minimiarvoja.

### 3.2.6 Laitesähköenergia

Laitesähköllä yleisesti tarkoitetaan valaistuksen, ilmanvaihdon ja muiden laitteiden yhteenlaskettua sähkönkulutusta lukuun ottamatta lämmitystä ja jäähdytystä (RakMk D5 2007, 33). Tässä työssä kuitenkin valaistus ja ilmanvaihto on eritelty laitesähköstä ja laitesähköllä tarkoitetaan ainoastaan muiden laitteiden kulutusta. ASHRAE-standardin mukaisesti energiasimuloinnissa laitesähkön tulee vastata vähintään 25 % vertailutapausten energiakustannuksista ja se on sama kummassakin laskentatapauksessa (ASHRAE 90.1–2007).

Energialaskennassa voidaan käyttää RakMk:n osan D5 taulukon 7.1 ominaissähköenergiankulutuksia, mikäli tarkempia tietoja ei ole saatavilla. (2007, 33). Kohdassa 7.4 esitellään toimistorakennuksen tyypillisiä laitekohtaisia sähköenergiankulutuksia (2007, 37–38).

### 3.2.7 Valaistus

Valaistuksen sähkönkulutus lasketaan tilakohtaisesti valaistustarpeen ja valaistusratkaisun perusteella RakMk:n osan D5 yhtälön 7.2 mukaisesti seuraavien suureiden tulona: valaistavan tilan kokonaissähköteho huonepinta-alaa kohden, huonepinta-ala, käyttöaika ja ohjauskerroin. Kokonaissähköteho voidaan laskea yhtälön 7.3 mukaisesti käyttäen taulukossa 7.3 olevia tyypillisiä valonlähteiden valotehokkuuksia ja valaistusvoimakkuuden suunnitteluarvoja tai standardin mukaisia ohjearvoja (SFS-EN 12464-1). Taulukossa 7.2 on esitetty rakennuksen valaistuksen tyypillisiä käyttöaikoja rakennustyyppikohtaisesti jaoteltuna. Kohdassa 7.2.2 on esitetty laskennassa käytettäviä ohjaustavasta riippuvia korjauskertoimia. (2007, 33–35) Vertailutapausten simuloinnissa voidaan käyttää myös ASHRAE-standardin taulukon 9.6.1 mukaisia tilakohtaisia kokonaissähkötehon vakioarvoja ja ohjauskertoimia (ASHRAE 90.1–2007, s.63).

Suunnittelutapausten kokonaissähkötehon arvot saadaan tavallisesti sähkösuunnittelijalta. Tiloissa, joiden valaistusta ei ole energiasimulointivaiheessa vielä suunniteltu, käytetään vertailutaso arvoja. Tiloissa, joihin tulevat valaistusratkaisut ovat vuokralaisten päätettävissä, käytetään ASHRAE-standardin mukaista vakioarvoa (ASHRAE 90.1–2007, 63).

### 3.2.8 Ilmanvaihto

Puhaltimien ja ilmanvaihtokoneiden sähkönkulutus lasketaan suunnitellun ominaissähkötehon (SFP), ilmavirran ja käyntiajan tulona RakMk:n osan D5 yhtälön 7.4 mukaisesti (2007, 36). SFP-luvun avulla ennalta määritellään suunniteltavan kohteen ominaissähkötehon tavoitetaso. Tällöin varmistutaan siitä, että suunnittelu- ja toteutusprosessi johtavat halutun tasoiseen lopputulokseen. Ominaissähköteho määritetään yhtälön (6) mukaisesti. SFP-luku ilmaisee, kuinka paljon sähkötehoa rakennuksen ilmanvaihto tarvitsee yhden ilmakeuution siirtämiseen sekunnissa. Ominaissähkötehoon vaikuttavat ilmanvaihtojärjestelmän kokonaispainehäviö ja kokonaishyötysuhde. (LVI-Talotekniikkateollisuus 2009)

$$SFP = P_E / q_v \quad (6)$$

$P_E$  = verkosta ottama teho

$q_v$  = suunniteltu ilmavirta (litraa/sekunnissa)

Koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho RakMk:n osan D2 mukaisesti saa olla enintään 2,5 kW/(m<sup>3</sup>/s), mutta tästä arvosta voidaan poiketa, jos rakennuksen sisäilmaston hallinta tätä edellyttää (2010, 23). Jos vertailutason simulointi perustuu RakMk:n mukaisiin ohjearvoihin, käytetään ilmanvaihtokoneiden ominaissähkötehon laskennassa kyseenomaista suurinta sallittua arvoa.

Puhaltimille ja ilmanvaihtokoneille simuloinnissa syötetään kokonaispainehäviö ja kokonaishyötysuhde sekä mahdollisesta säädöstä aiheutuva tehon lasku prosentteina ilmavirran prosentuaalisen laskun seurauksena. ASHRAE-standardin 90.1–2007 mukainen lisäpainehäviö on määritetty taulukossa 6.5.3.1.1B (40). Tietyissä laiteratkaisuissa on käytettävä lisäpainehäviönä laitevalmistajan arvoja. Standardin mukaiset moottorin hyötysuhdearvot löytyvät viitteen taulukosta 10.8 (65).

Sisäilmanolosuhteet vaikuttavat merkittävästi energiankulutukseen. Simuloinnissa mitoitetaan tilojen talvi- ja kesäajan lämpöolot sekä minimi ja maksimi ilmavirrat. Ilmavirtojen mitoituksella on vaikutusta myös sisäilman laatuun.

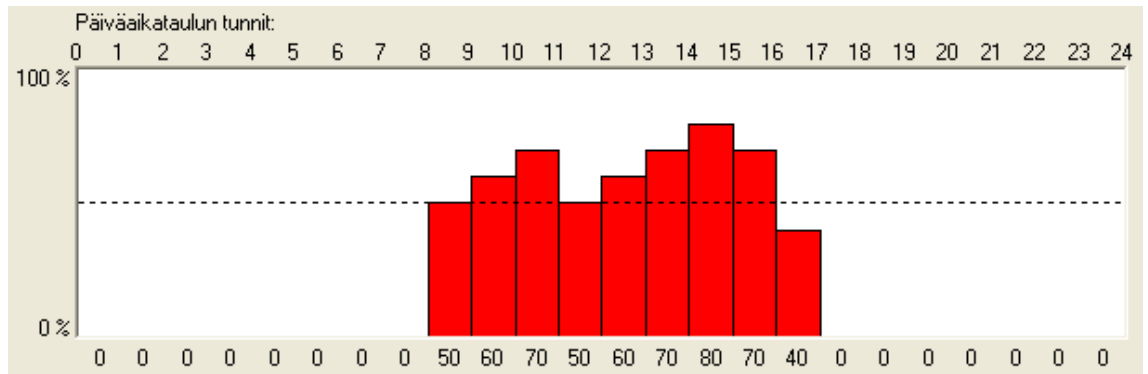
Jos ilmanvaihtojärjestelmä on varustettu lämmöntalteenotolla (LTO), niin simulointimalliin on syötettävä valmistajan ilmoittama laitteen tuloilman lämpötilasuhteet mitoitustilanteessa, kun tulo- ja poistoilmavirran välinen suhde on 1. Laskentamalli ottaa huomioon jäätyminen eston lämmöntalteenoton hyötysuhteeseen. Malli laskee vuotuiset arvot tulo- ja poistoilman lämpötilasuhteelle sekä energiahyötysuhteen asetetun laskentasään ja käyntiaikaprofiilin mukaisesti. Jos energiasimuloinnin vertailutapaus perustuu ASHRAE-standardiin, käytetään tuloilman lämpötilasuhteena arvoa 0,50 (ASHRAE 90.1–2007).

### 3.3 Energiankulutukseen vaikuttavat muut merkittävät tekijät

Energiankulutusarviota laskettaessa simulointimallissa käytetään kohteen sijaintipaikkakunnan testivuoden säätä. Laskentasään lämmityksen astepäiväluvut voidaan tulostaa useimmista simulointiohjelmista vuorokauden tarkkuudella. Astepäivälukuihin liittyvää tilastotietoa julkaisee muun muassa Ilmatieteenlaitos. Myös RakMk:n osan D5 liitteestä 1 on julkaistu energiankulutuksen laskennassa käytettävät säätiedot (2007, 56–68). Rakennuksen energiankulutus lasketaan energiatodistusta varten Ympäristöministeriön asetuksen mukaisesti aina säävyöhyke III (Jyväskylä-Luonetjärvi) säätiedoilla (RakMk D5 2007, liite 1). Tämä mahdollistaa eri puolella Suomea sijaitsevien rakennusten energiatehokkuusvertailun.

Rakennuksen tilojen henkilö- ja laitekuormina energiasimuloinnissa käytetään ohjelmiston valmiita profiileja, joista valitaan kyseenomaiseen tilaan ja laitteeseen parhaiten sopiva vaihtoehto. Ohjelmiston tuntitasoisen keskimääräisen käyttöasteen arvio perustuu tilastotietoon käyttöasteista. Kuvassa 6 on simulointiohjelma

RIUSKA:sta tulostettu tuntitasoinen käyttöaikaprofiili, joka voi soveltua hyvin esimerkiksi toimistohuoneen henkilö- ja laitekuormien arviointiin (RIUSKA 4.6.26). Kuvan 6 profiili perustuu tilan klo 8-17 väliseen käyttöaikaan, 80 %:n maksimikuormaan ja 61 %:n keskimääräiseen käyttöasteeseen.



Kuva 6. Tuntitasoinen tilan kuormien käyttöaikaprofiili (max.0,80, ka.0,61) (RIUSKA 4.6.26)

Esimerkiksi käytävien tai avotoimistojen henkilö- ja laitekuormia voi kuvata hyvin myös kuvan 6 profiili, mutta valaistus on päällä kokoajan ma-pe klo 8-17 välillä. Tällöin valaistuksen käyttöasteeksi on asetettava 100 %. Toimistohuoneiden valaistuksen ohjauksessa voidaan myös käyttää esimerkiksi vakiovalonsäätöä, joka on huomioitava käyttöprofiilissa ohjauskertoimen (RakMk, ASHRAE 90.1–2007) avulla.

### 3.4 Energiantuotanto

Energiantarpeesta puhuttaessa on tärkeää jakaa rakennuksen energiantarve ja ostoenergiantarve itsenäisiksi kokonaisuuksiksi, jotta väärinkäsityksiltä vältytään. Osa energiaa tuottavista järjestelmistä voi myös merkittävästi kuluttaa energiaa. Rakennuksen energiantarvetta mallintaessa havaitaan energiatehokkuuteen vaikuttavat ominaisuudet hyvin. Vastaavasti ostoenergiantarve kuvaa rakennuksen vuosittaisia energiakustannuksia. Energiakustannusten osuus toimistorakennuksen ylläpitokustannuksista on tyypillisesti noin 50 %.

Energiantuotantoa voivat olla muun muassa maalämpö-, kalliojäähdytys-, aurinkopaneeli-, tuuli- ja vesivoimajärjestelmät. Myös aurinkolämmön käyttäminen rakennuksen lämpöenergiantuotannossa aurinkolämpökeräimien avulla on mahdollista. Rakennuskohtaisen tuulivoimalan rakentamista rajoittaa rakenteisiin aiheutuva rasitus, tuuliolot sekä esteettiset vaikutukset.

Energiantuotannon vaikutuksia voidaan arvioida valmistajilta saatavien tietojen mukaisesti erilaisten tehokkuuslukujen avulla. Tärkeää on kalibroida simulointi vastaamaan mittausten mukaisia arvoja rakennuksen käyttöönoton jälkeen. Valmistajien ilmoittamiin keskimääräisiin tuottoarvioihin sisältyy usein myös merkittäviä oletuksia.

Rakennusten energiantuotannon voidaan arvioida tulevaisuudessa lisääntyvän, sillä EU:n asettaman veloitteen mukaan uusiutuvan energian osuus Suomen energianloppukulutuksesta tulee olla vähintään 38 % vuonna 2020 (2009/28/EY). Tämä tarkoittaa noin 38 TWh:n muutostarvetta (Pekkarinen 2010). Muun muassa lämpöpumppujen avulla tuotetun energian osuus pyritään nostamaan vuoden 2005 2 TWh:n tasosta vuoteen 2020 mennessä 8 TWh:iin sekä aurinkolämpö- ja sähköjärjestelmien tukea jatketaan energiatuella nykyisen käytännön mukaisesti vuoteen 2020 asti (Pekkarinen 2010).

### 3.5 Energiansäästöt

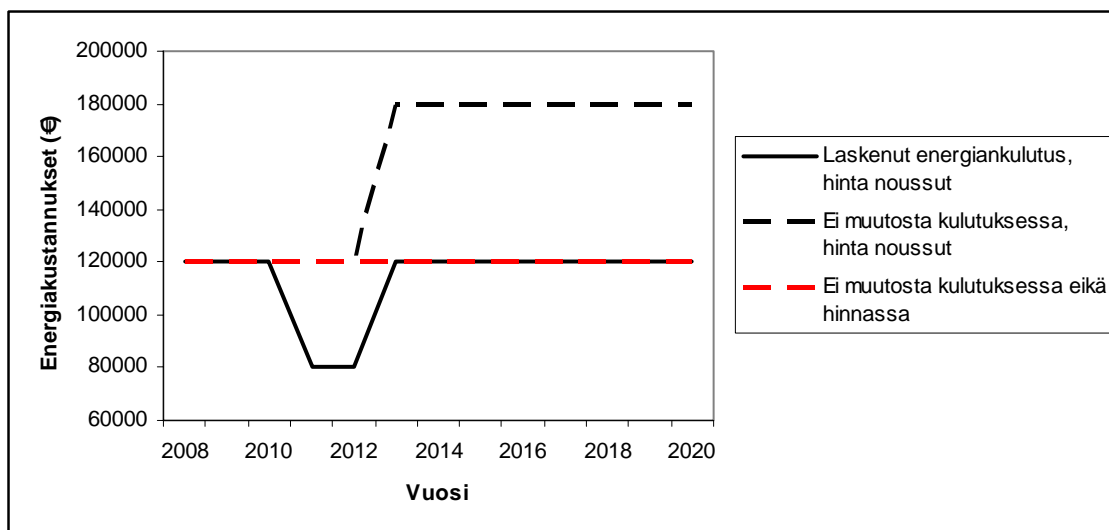
Energiansäästöjä arvioitaessa ja todentaessa on huomioitava myös muita tekijöitä, jotka liittyvät esimerkiksi energian hintaan, korkokantaan sekä kuormien vaihteluun rakennuksen käyttöajanjaksolla. Edellä mainitut asiat on huomioitava etenkin suorituskykyyn pohjautuvissa energiansäästö sopimuksissa (ESPC) ja niihin liittyvissä vastuukysymysten käsittelyssä. ESCO hankkeissa on lisäksi huomioitava myös myöhästymisien aiheuttamat menetykset, käyttö- ja ylläpitokustannukset sekä pehmeämmät arvot kuten luottamus mittauksen ja valvonnan suorittavaan osapuoleen ja projektiin osallistuvien osapuolten kiinnostuksen taso projektia kohtaan (M&V Guidelines 2008, 3-3).

IPMVP:n mukaisesti M&V-suunnitelmaan on kirjattava arvio suunnitelman kokonaistarkkuudesta (IPMVP 2003). Merkittävimmän poikkeaman aiheuttaa energiasimulointi. Virhemarginaalia voidaan pienentää käyttämällä enemmän voimavaroja mallin kalibrointiin. Poikkeaman suuruus on haastava arvioida ilman käytännön mittaustuloksia.

#### 3.5.1 Energian hinta

Energian hinta vaikuttaa oleellisesti rakennuksen energiakustannuksiin. Energian hinnanmuutos saattaa vaikuttaa energiansäästöihin siten, että odotettu euromääräinen säästö katoaakin, vaikka todellisuudessa säästöjä energiankulutuksessa tulee. Hinnan muutos tulee huomioida varsinkin pitemmissä suorituspohjaisissa sopimuksissa, joissa palkkio perustuu energiansäästöihin. M&V-suunnitelmassa voidaan arvioida myös euromääräisiä vaikutuksia. Tällöin energianhinnana käytetään kyseen omaiselle ajanhetkelle ominaista energian keskihintaa. Raportoinnin yhteydessä tärkeää on energianhinnan muutoksen huomioiminen myös vertailutapauksessa.

Kuvassa 7 energian hinta nousee vuodessa 50 % vuoden 2012 puolivälistä alkaen. Musta suora kuvaa tilannetta, jossa energiankulutus on laskenut vuoden aikana kolmanneksen ja katkoviivalla piirretty suora vastaavasti kuvaa tilannetta, jossa kulutuksessa ei ole tapahtunut muutosta.



Kuva 7. Energian hinnanmuutoksen vaikutus energiakustannuksiin. (Mukaiiltu viitteestä U.S Department of Energy 2004, osa 2)

Kuvasta 7 havaitaan, että esimerkkitapauksessa laskeneen kulutuksen ja energian hinnan korotuksen johdosta (mustasuora) energiakustannukset säilyvät ennallaan. Vastaavasti tapauksessa, jossa ei tapahtunut muutosta kulutuksessa, energiakustannukset nousivat 60 000 €

### **3.5.2 Korkokanta**

Korkokanta vaikuttaa energiansäästöjen arvioimiseen pitkällä aikavälillä ja se tulee huomioida kannattavuuslaskelmia tehdessä diskonttaamalla euromäärät tiettyyn ajanhetkeen arvioidun laskentakorkokannan mukaan. Sen vaikutuksen merkittävyys johtuu inflaation tai deflaation suuruudesta.

### **3.5.3 Kuormien vaihtelu rakennuksen käyttöajanjaksolla**

Kuormien vaihtelut vaikuttavat merkittävästi energiankulutukseen. Säästöjen määrittämisessä on huomioitava omistajan tai käyttäjän tekemät kuormien muutokset rakennuksen käytön aikana, rakennuksen laajuuden ja käyttötarkoituksen muutokset sekä käyttäjästä johtuvat järjestelmien säätöjen muutokset. Suorituskykyyn pohjautuvissa sopimuksissa vastuukysymysten käsittelyssä on esimerkiksi selvitettävä, miten hyöty realisoidaan osapuolten kesken, jos sekä kuorma, että säästöt pienentyvät tai vastaavasti molemmat kasvavat. (U.S. Department of Energy 2004)

## 4 Mittarointi

Seuraavissa alaluvuissa mittarointi on käsitelty sektoreittain lämmityksen, jäädytyksen, ilmanvaihdon, käyttäjäsähkön, valaistuksen, sisäilmaston, energiantuotannon sekä veden kulutus- ja tehokkuusmittauksina. Mittauksista on esitelty ainoastaan oleelliset. Kohteen mittarointisuunnitelma on aina uniikki ja energiatehokkuuden mallintamisessa voidaan tarvita myös muita kuin seuraavissa alaluvuissa käsiteltäviä mittauksia. Mittaukset voidaan yleisesti jakaa rakennuksen vastaanoton yhteydessä suoritettaviin, ennalta sovitun väliajoin tai pistokokein suoritettaviin sekä jatkuviin mittauksiin.

### 4.1 Vaatimukset

IPMVP:n mukaisesti uudisrakennuksissa sellaisia parametrejä, joiden ei oleteta muuttuvan, ei tarvitse mitata kuin asennuksen jälkeen ja sovitun väliajoin uudestaan. Vastaavasti parametrejä, jotka muuttuvat päivittäin tai tunneittain, on mitattava jatkuvasti. Harkinnan mukaan mittausväli on kyettävä ilmoittamaan. Mittausdata jatkuvista mittauksista on keskiarvostettava tunnin aika-asteleelle, jotta se on vertailukelpoinen simuloidun mallin kanssa. (IPMVP 2003, 19–20). Mittaukset voivat liittyä esimerkiksi lämpötilaan, kosteuteen, virtauksiin, paineeseen, käyttöaikoihin sekä sähkö- ja lämpöenergiaan. Määrittääkseen energiansäästöt suotavalla tarkkuudella, hyvä mittauskäyttöä tulee perustua näiden suureiden mittaukseen. (IPMVP 2002, 5.1–5.3)

Energiankulutuksen perusmittauksia kiinteistöissä ovat sähkön ja lämmön kokonaiskulutus. Osakulutusten mittaroinnilla saadaan tarkemmin selville, mihin energiaa kuluu ja näin energiankulutuksen ongelmatilanteiden ratkaisu nopeutuu. Suurimman ongelman sähkön alamittausjärjestelmälle asettaa laitteiden ryhmittely sähkökeskuksissa. Etenkin olemassa olevissa kiinteistöissä ilmenee usein ongelmia alamittauksen toteutuksessa, sillä sähkösuunnittelussa ei ole huomioitu tätä tarvetta. Tällöin osakulutusten mittarointi vaatii huomattavan työmäärän tai vaihtoehtoisesti huomattavan lukumäärän mittareita.

Kulutuksen alamittaukset eivät yleensä riitä yksinään selittämään järjestelmien toimivuutta, vaan tarvitaan myös tehokkuutta kuvaavia mittauksia. Tehokkuusparametrien seuranta ilmaisee usein järjestelmän teknisistä tai rakennuksen ominaisuusongelmista enemmän. Poikkeavuudet tarkoituksen mukaisesta toiminnasta voidaan havaita ja niihin voidaan puuttua nopeammin. Tehokkuusparametrien seurannan avulla myös laitetoimittajien ja urakoitsijoiden työn takuun seuranta tehostuu. Sähkötietykorteista puuttuu tehokkuusparametrien seuranta.

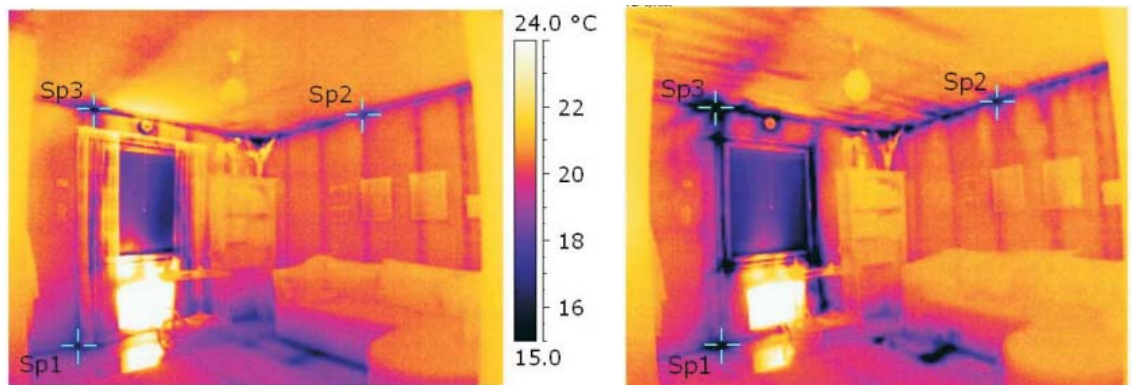
### 4.2 Lämmitys

Toimistorakennusten tavallisimpana lämmitysmuotona käytetään kaukolämpöä. Kaukolämmön osuus uudistoimistorakentamisessa vuonna 2007 oli noin 97 % (Nuutinen 2008). Kaukolämmön kulutuksen mittauksesta vastaa tavallisesti paikallinen energiayhtiö. Se asentaa asiakkaan lämmönjakohuoneeseen mittausjärjestelmän, joka sisältää virtaus- ja lämpötila-anturit sekä lämpömääränlaskimen. Virtausanturi mittaa kiertävän kaukolämpövesimäärän. Lämpötila-anturit mittaavat kiinteistöön tulevan ja sieltä palaavan veden lämpötiloja. Lämpömääränlaskin laskee kulutetun lämpömäärän ominaislämpökapasiteetin avulla. Laatumuunnoksen avulla luvusta saadaan vertailukelpoinen. Mittausjärjestelmä on liitettävä kiinteistöautomaatiojärjestelmään.

Kaukolämmön kokonaishinta muodostuu perus- ja energiamaksuista. Perusmaksu määräytyy tilausvesivirrasta, joka lasketaan kylmimpään aikaan lämmittämiseen tarvittavasta suurimmasta lämmitystehosta. Energimaksu määräytyy käytetyn lämpöenergiämäärän mukaan. Perusmaksun hinnoitteluperuste vaihtelee merkittävästi energiayhtiöiden välillä. Väärin mitoitettu tilausvesivirta voi aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia kuukausittain. (Helsingin Energia, Vantaan Energia, Vattenfall)

Lauhdelämpöä voidaan käyttää teollisuus- ja liikerakennuksissa myös merkittävänä lämmitys- tai jäähdytysmuotona. Laitteista tai prosesseista vapautuvan lämpöenergian mittaamiselle ei kuitenkaan esiinny usein tarvetta. Vapautuva lämpöenergia voidaan arvioida riittävällä tarkkuudella rakennuksen lämmitys-/jäähdytysenergiatarvetta määrittäessä. Jos lauhdelämmön analysoinnille esiintyy syystä tai toisesta tarvetta, voidaan arvio toteuttaa laitteiden käyttöaikojen ja teknisten tietojen perusteella.

Ilmavuodot vaikuttavat oleellisesti rakennusten lämmitysenergiatarpeeseen. Rakennusten ulkovaipan ilmanpitävyys mitataan käyttöönoton yhteydessä standardissa (SFS-EN 13829) määritetyllä tavalla tiiviysmittauksella. Mittauksessa ulko- ja sisätilan välille aiheutetaan 50 Pa:n alipaine ja mitataan paine-eron ylläpitämiseen tarvittava ilmamäärä. Mitattu ilmamäärä jaetaan tutkittavan tilan ilmatilavuudella, jolloin tuloksena saadaan ilmavuotoluku n50 [1/h] (vaihtoa tunnissa). Ilmavuotokohdat voidaan paikallistaa lämpökameralla ja merkkisavuun. Pintalämpötilat alentuvat kohdissa, joiden ilmanpitävyydessä on puutteita (kuva 8).



Kuva 8. Vasemmanpuoleinen kuva on otettu normaali paineolosuhteissa, oikeanpuoleinen 50 Pa:n alipaineessa. (LVI 01–10450, 2009, 12)

### 4.3 Jäähdytys

Kaukojäähdytyksellä voidaan korvata kiinteistöjen jäähdytykseen perinteisesti käytetty koneellinen jäähdytysjärjestelmä, jossa jäähdytysaineena käytetään usein ympäristölle haitallisia HCFC-yhdisteitä. Kaukojäähdytysenergiaa tuotetaan absorptiotekniikalla, kylmästä (meri)vedestä (vapaajäähdytys) tai puhdistetusta jätevedestä lämpöpumppulaitoksessa. Kaukojäähdytys perustuu veden jakeluun putkiston välityksellä rakennuksille ilmastoinnin jäähdytykseen. Toimintaperiaate on verrattavissa kaukolämmitykseen sillä poikkeuksella, että kaukojäähdytyksessä asiakkaalta siirretään ylimääräinen lämpö energiayrityksen kaukojäähdytysveteen. (LVI 34–10442, 2009)

Kaukojäähdytysmahdollisuus on tarjolla Helsingin lisäksi vasta muutamassa (Turku, Lahti, Vierumäki) kaupungissa. Helsingin Energian kaukojäähdytyskohteiden yhteenlaskettua liityntäteho on noin 100 MW (Helsingin Energia 2010). Kaukojäähdytyksen kulutus on mitattavissa samalla tavalla kuin kaukolämmön kulutus ja mittaamisesta vastaa energiayhtiö.

Tavanomaisen jäähdytinjärjestelmän tehokkuuden mittaaminen koostuu pumppujen, kompressorien, lauhduttimien ja höyrystimien ottaman sähkötehon sekä järjestelmän tuottaman lämpötehon mittaamisesta. Näistä muodostuvaa suuretta kutsutaan lämpö-/kylmäkertoimeksi (Coefficient of performance, COP). Se määritellään yhtälön (7) mukaisesti (SFS-EN 14511–1, 2.25, 2.29, 2.32):

$$\text{COP} = P_h / P_E \quad (7)$$

$P_h$  = Järjestelmän tuottama lämpöteho (W)

$P_E$  = Järjestelmän ottama sähköteho (W)

Sähkötehon mittausta toteutetaan mittaamalla hetkellinen kolmivaiheteho joko laite tai keskuskohtaisesti. Syöttöjohtoon asennetaan kiinteämittari, joka kerää mittaustiedon ja lähettää sen sopivaa tiedonsiirtoväylää (m-bus tai modbus) pitkin mittaustiedon keruuyksikköön. Lämpöteho voidaan mitata meno- ja paluuveden lämpötilaeron ja virtausmittarin avulla.

Tavanomaisia jäähdytysratkaisuja ovat tuloilman jäähdytys (jäähdytys ja ilmanvaihto on yhdistetty), paikallisjäähdytys (puhallin konvektori ja – höyrystin, jäähdytys palkki tai – katto), integroidut järjestelmät (yhdistetty huonekohtainen jäähdytetty tuloilma ja jäähdytyspalkki), veden jäähdytyskoneistot ja kylmäkompressorit sekä kostutusjäähdytys. Järjestelmien toimintaperiaatteet on kuvattu Rakennustietokortissa RT 56–10592 (1996).

## 4.4 Ilmanvaihto

Ilmanvaihdon energiatehokkuuteen vaikuttavat oleellisesti järjestelmien käyttöajat. Koneellisten ilmanvaihtojärjestelmien käyttöä ohjataan yleensä vähintään aikaohjauksella. Kuitenkin on ollut havaittavissa kiinteistöjä, joissa energiankulutus on ollut huomattavan suuri ja energiaselvityksen perusteella ilmanvaihtojärjestelmän käyttöaika on ollut kiinteistön käyttöaikaan suhteutettuna tarpeettoman pitkä, jopa ympärivuorokautinen. Tämä on ollut seurausta kiinteistön ylläpidosta vastaavan henkilön tai käyttäjien toimista. Käyttöaikojen mittauksella voidaan saavuttaa merkittäviä etuja.

RakMk:n osan D2 mukaisesti ennen rakennuksen käyttöönottoa ilmanvaihtojärjestelmän tiiviys on tarkastettava ja tarvittaessa mitattava, ilmavirrat on mitattava ja säädettävä, ominaissähköteho on mitattava ja järjestelmän toiminta sekä puhtaus on todettava suunnitelman mukaiseksi. Selvitykset näistä on liitettävä rakennustyön tarkastuspöytäkirjaan. Tiiviys mitataan standardin (SFS 3542) mukaisella tiivyskokeella yleensä koko ilmanvaihtojärjestelmälle lukuun ottamatta RakMk:n osan D2 kohdissa 5.1.1.2–5.1.1.4 mainittuja poikkeuksia. (2010, luku 5). Sisäilmastoon liittyvät mittaukset käsitellään luvussa 4.6.

### 4.4.1 Ominaissähköteho

Ominaissähköteho (SFP) kuvaa ilmanvaihtojärjestelmän sähkötehokkuutta. SFP:n mittaamiseen tarvitaan puhallinkohtaisesti mitattu ilmavirta ( $q_v$ ) ja verkosta otettu sähköteho ( $P_E$ ) luvun 3.2.8 yhtälön (6) mukaisesti.

Ilmavirran mittaaminen voidaan toteuttaa tavallisesti puhaltimeen valmiiksi integroidun kiinteän ilmavirran mittausturinin avulla. Lämmön talteenotolla varustetussa ilmankäsittelykoneessa jäteilman lämpötila voi poiketa merkittävästi poistoilman lämpötilasta. Tämän vuoksi mittauksessa on huomioitava lämpötilasta johtuva korjauskerroin. Taajuusmuuttajan avulla puhaltimen nopeus säädetään siten, että mitoitusilmavirta saavutetaan. Sähkötehon mittausta suoritetaan tässä pisteessä. (LVI-talotekniikkateollisuus 2009, 18)

Hetkellisen kolmivaihetehon mittausta konekohtaisesti voidaan suorittaa käyttämällä esimerkiksi pihtityyppistä mittaria, joka ei vaadi johtimien irrottamista. Mittaus suoritetaan aina taajuusmuuttajan tulopuolelta, ei koskaan taajuusmuuttajan lähtöpuolelta, muuttajan ja moottorin välistä. Mittalaitteen pitää olla sellainen, että se mittaa samanaikaisesti virran ja jännitteen sekä laskee verkosta otettavan sähkötehon. Mittarin mittaustavan pitää olla ns. true-RMS, jolloin se pystyy ottamaan huomioon taajuusmuuttajan aiheuttamat poikkeamat sähkövirran siniaalloon, vaikka mittaus suoritetaankin taajuusmuuttajan tulopuolelta. Kuvassa 9 on esitetty sähkötehon kertamittauksiin hyvin sopiva pihtimittari. (LVI-talotekniikkateollisuus 2009, 18–19)





Kuva 9. Pihtimittari mallia Metrix MX 240. (LVI-talotekniikkateollisuus 2009, 19)

Sähkötehon mittaukseen soveltuva pihtimittalaite voi olla ainoastaan yhden vaiheen tehon mittaamiseen soveltuva tai siinä voi olla kolmivaihetehon mittausadapteri. Molemmilla voi mitata kolmivaihetehoa. Yksivaihemittalaitteella tarvitaan aina kaksi tai kolme erillistä mittausta kolmivaihetehon määrittämiseksi riippuen mitattavan kuorman kytkennästä. Jatkuva ilmanvaihtokoneen sähkötehon mittaus edellyttää syöttöjohtoon asennettavaa kiinteää mittaria, joka kerää mittaustiedon ja lähettää sen sopivaa tiedonsiirtoväylää (m-bus tai modbus) pitkin mittaustiedon keruuyksikköön.

Vastaanoton yhteydessä tehtävä mitoitusilanteen SFP mittaus toteutetaan puhtailla suodattimilla. Likaiset suodattimet pienentävät ilmamääriä. Suodattimien vaihto perustuu useissa kiinteistöissä suodattimien aiheuttaman painehäviön mittauksiin. Myös niiden takapinnan tummuuden arviointi soveltuu suodattimen kuormittuneisuuden mittariksi. Ilmanvaihtojärjestelmä tarvitsee toimiakseen energiatehokkaasti ja hyvän sisäilman taatakseen säännöllistä puhdistusta ja huoltoa. Ilmamäärällä on vaikutus sisäilman laatuun, mutta myös energiatehokkuuteen. (LVI-talotekniikkateollisuus 2009)

#### 4.4.2 Lämmöntalteenotto

Lämmöntalteenoton (LTO) hyötysuhteella tarkoitetaan joko laitteen lämpötilahyötysuhdetta tai ilmanvaihdon LTO:n vuosihyötysuhdetta. Kyseessä on kaksi eri käsitettä, joita myös käytetään eri tarkoituksiin. Ilmanvaihdon lämmöntalteenottolaitteen kykyä ottaa poistoilmasta lämpöä talteen voidaan kuvata tuloilman- ja poistoilman lämpötilahyötysuhteella. Poistoilman lämpötilahyötysuhde ( $n_p$ ) määritetään yhtälön (8) ja tuloilman lämpötilahyötysuhde ( $n_t$ ) yhtälön (9) mukaisesti (Ympäristöministeriö moniste 122, 2003, 14):

$$n_p = (t_p - t_j) / (t_p - t_u) \quad (8)$$

$$n_t = (t_{uLTO} - t_u) / (t_p - t_u) \quad (9)$$

$n_p$  = Poistoilman lämpötilahyötysuhde

$n_t$  = Tuloilman lämpötilahyötysuhde

$t_p$  = Poistoilman lämpötila (huoneilma)

$t_j$  = Jäteilman lämpötila (huoneilma lämmöntalteenoton jälkeen)

$t_u$  = Ulkoilman lämpötila (tuloilma)

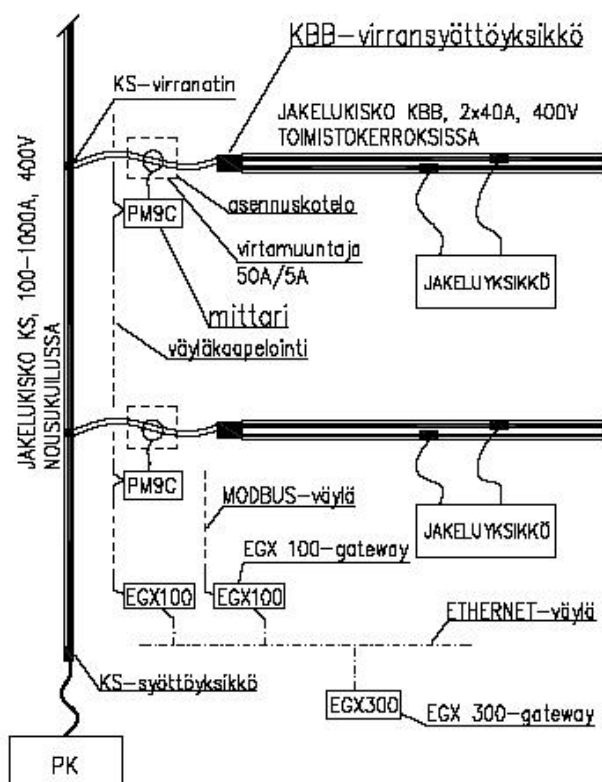
$t_{uLTO}$  = Ulkoilman lämpötila lämmöntalteenottolaitteen lämmittämisen jälkeen

LTO-laitteen vuosihyötysuhde kuvaa laitteen energiatehokkuutta. Se lasketaan simuloinnissa vuoden jokaiselle tunnille tuloilman lämpötilahyötysuhteesta ja luku keskiarvoistetaan. Ilmanvaihtojärjestelmän LTO-vuosihyötysuhde lasketaan yksittäisten koneiden vuosihyötysuhteiden summan avulla. Mittaamalla laitteen tuloilman lämpötilahyötysuhde konekohtaisesti, voidaan määrittää ilmanvaihtojärjestelmän vuosihyötysuhde, jos koneiden tulo- ja poistoilmavirrat ovat yhtä suuret.

## 4.5 Käyttäjäsähkö

Sähkönkulutuksen mittarointi voidaan toteuttaa virtakiskosta tai perinteisesti sähkökeskuksesta. Ongelman perinteisessä menetelmässä aiheuttaa se, että kulutuksen jatkuva alamittaus vaatii käytännössä aina mittarin jokaista ryhmäsyöttöä kohden. Tällöin sähkönkulutuksen laaja alamittaus ei usein ole taloudellisesti kannattavaa.

Virtakiskojakelussa käytetään nousujohtojen asemasta yhtä tai useampaa virtakiskoa. Rakennuksen pääkeskuksesta tulee syöttökaapeli nousuvirtakiskoon, jossa on erillinen syöttöyksikkö. Nousuvirtakiskoilta virta otetaan erillisellä virranottimella kerroksien virtakiskoille, joiden syöttöyksikköön kaapeli liitetään. Nousuvirtakiskon ja jakelukiskon välille asennetaan virtamuunnin. Kerroksien virtakiskoilta jakelu edelleen kulutuspaikalle toteutetaan jakelukotelon kautta, joka sisältää tarvittavat vikavirtasuojakytkimet. Virtakiskojakelun yleiskuvaus on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Virtakiskojakelujärjestelmän yleiskuvaus sisältäen sähkönkulutuksen mittaroinnin. (Stenman 2010, 35)

Alamittausjärjestelmän vaatima virtamittari asennetaan nousukiskon ja jakelukiskon väliin. Modbus-väylän avulla mittarit liitetään yhdyskäytävään, josta edelleen Ethernet-väylään, josta mittausinformaation siirtyy edelleen kiinteistöautomaatiojärjestelmään.

Virtakiskojakelun etuihin kerros-, järjestelmä- ja tilakohtaisen kulutusmittauksen lisäksi lukeutuvat muun muassa sähköasennusten nopeutuminen ja asennusten muuntojoustavuus. Viimeksi mainittu palvelee etenkin kiinteistön käyttäjiä ja omistajaa. Lisäksi pitkät nousukaapelit jäävät pois, pääkeskukset pienenevät, kaapelihyllyt vähenevät ja kevenevät sekä palokuormitukset pienenevät kaapeleiden vähentyessä. (ST 51.14)

## 4.6 Valaistus

Valaistuksen kuluttamaa energiaa alamitataan yksinkertaisimmillaan, jos rakennuksen sähkönjakelu on toteutettu luvussa 4.4 kuvatun virtakiskojakelun mukaisesti. Tällöin kytetään valaistuksen sähkönsyötöt omaan kiskoon. Rakennuksessa saattaa esiintyä

tarvetta myös valaistuksen kulutuksen alamittauksiin esimerkiksi kerroksittain ja vuokralaisittain jaoteltuna.

Valaistuksen energiankulutusta voidaan pienentää valaistuksen päälläolon optimoinnilla. Valaistusjärjestelmät toimistorakennuksissa on usein ainakin aika-ohjattuja. Valvontaa toteuttaa valvonta-alakeskus, josta tieto voidaan siirtää tiedonsiirtoväylän (m-bus tai modbus) avulla kiinteistöautomaatiojärjestelmään.

Valaistukselle asetetaan suunnittelussa laadullisia vaatimuksia, jotka perustuvat merkittävilta osin standardiin SFS-EN 12464-1 (2003). Niiden vaatimusten toteutumista melko harvoin mitataan tai seurataan rakennuksen vastaanoton tai käytön aikana muuten kuin subjektiivisten havaintojen perusteella. Mittausten avulla voidaan selvittää myös, milloin lamppujen vaihto, valaisimien puhdistaminen tai valaistusparannukset ovat tarpeen. Valaistusmittaukset on tehtävä kalustetussa tilassa, jotta valonjakautuminen tilassa voidaan selvittää. Laadulliset mittaukset ovat käytännössä valaistusvoimakkuusmittauksia, jotka sisältävät myös ohjausjärjestelmän toimivuustarkastelun. Kaikki standardissa (SFS-EN 12464-1) esitetyt valaistusvoimakkuusarvot ovat huoltoarvoja, jonka alle määrätyn alueen keskimääräinen valaistusvoimakkuus ei saa laskea ennen valaisinhuoltoa.

Valaistuksen ohjauksessa esimerkiksi toimistohuoneissa käytetään usein myös läsnäolo- ja vakiovalonsäätöohjausta. Vakiovalonsäädöllä toimivien valaisinjärjestelmien ohjaus perustuu päivänvaloa mittaaviin valoantureihin, joiden ohjeiden mukaan valonlähteitä säädetään. Toimivuustarkastelun mittausten on sisällettävä riittävä määrä mittauspisteitä (Aalto 2010) ja mittaustuloksien tarkastelussa on huomioitava myös valaistusvoimakkuuksien tasaisuus. Valaistusvoimakkuusmittari tulee tarpeen vaatiessa kalibroida ennen mittausta ja tulosten tarkastelussa on huomioitava myös mittausrvirhe, joka on tavallisesti laitteesta riippuen noin 5 % (Aalto 2010).

Valaistusvoimakkuuden selvittämisen lisäksi on usein syytä tutkia tilan luminanssijakaumaa, onko se suunnitellun mukainen ja täyttääkö se annetut suositukset tai määräykset. Luminanssit määräytyvät pinnan heijastussuhteen ja valaistusvoimakkuuden perusteella. (SFS-EN 12464-1). Luminanssijakauman mallintaminen onnistuu hyvin esimerkiksi videofotometrin avulla. Pintojen luminansseja voidaan mitata luminanssimittarin tai likimääräisesti valaistusvoimakkuusmittarin avulla (Aalto 2010).

## **4.7 Sisäilmasto**

Sisäilmastoon liittyvät parametrit vaikuttavat epäsuorasti rakennuksen energiatehokkuuteen. Useita järjestelmiä säädetään sisäilmaston perusteella ja sillä on merkittävä vaikutus etenkin viihtyvyyteen. Sisäilmalla on myös terveydellisiä vaikutuksia, joita ei tässä työssä tarkemmin käsitellä.

Tilakohtaiset tulo- ja poistoilmamäärät sekä sisäilman ja ulkoilman välinen paine-ero on mitattava vastaanoton yhteydessä. Näin varmistetaan ilmanvaihtojärjestelmän tehokkaasta ja tarkoituksen mukaisesta toiminnasta. Tilakohtaisten ilmamäärien mittausta voidaan toteuttaa ilmamäärämittarin avulla ja paine-eromittaus sähköisellä paine-eromittarilla tai nestemanometrillä. Paine-eromittauksessa on selvitettävä paine-eron suuruus ja suunta. Rakennuksen painesuhteet riippuvat poiston ja sisäänpuhalluksen säädöistä. Ilma virtaa aina korkeammasta paineesta matalamman paineen suuntaan ja tämän vuoksi esimerkiksi lämpimiä sisätiloja ei tule ilmanvaihtoteknisesti ylipaineistaa.

### **4.7.1 Lämpöolot**

Lämpöolojen mittauksia voidaan suorittaa kerta, pisto tai jatkuvatoimisina mittauksina. Mittaukset voivat olla esimerkiksi veto-, pallo-, ilman lämpötila-, pintalämpötila-, lämpövirtalevy- ja tiiviysmittauksia. Myös lämpökuvaus on yksi vaihtoehto lämpöolojen todentamiseen.

Ilman liikenopeus voidaan mitata anemometrillä. Liikenopeuden tulee olla suuntariippumaton. Se määritetään kolmen minuutin keskiarvolukuna. Huonetiloissa, joissa esiintyy voimakasta lämpösäteilyä tai alhaisia tai korkeita pintalämpötiloja, voidaan ilman lämpötilan sijaan mitata operatiivinen lämpötila pallolämpömittarin avulla. Huoneilman kosteus voidaan mitata esimerkiksi psykrometrillä, hiushygrometrillä tai sähköisten mittalaitteiden avulla. Sähköisiä mittalaitteita käytetään usein jatkuvissa (kosteuden) mittauksissa. Niiden heikkoutena on mittatarkkuus. Mittaus tehdään yleensä yhdestä pisteestä. Lämpövirtalevymittausten avulla voidaan määrittää rakenteen läpi kulkeva lämpövirta. (SFS 5511)

#### 4.7.2 Sisäilman laatu

Hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>) pitoisuuksien mittaaminen sisäilmasta toteutetaan yleensä jatkuvana mittauksena. Sisäilman kohonnut CO<sub>2</sub>-pitoisuus on merkki ilmanvaihdon riittämättömyydestä. CO<sub>2</sub> ja muiden kemiallisten aineiden (esim. haihtuva Volatile Organic Compounds, VOC) pitoisuuksien mittaus voidaan toteuttaa antureiden avulla, joiden avulla voidaan vastaavasti ohjata tilojen ilmavirtaa ilmanlaatuun perustuen (esim. Siemens QPM21 sarjan mallit). Anturit asennetaan ilmakehään.

Mineraalikulujen pitoisuuksien ja kertymisen mittaaminen sekä formaldehydipitoisuuden mittaaminen vaatii laboratorioanalysointia. Tämän vuoksi näitä suoritetaan ainoastaan tarpeen vaatiessa tai pistokokeen omaisesti. (Pietiläinen et al. 2007)

Äänenpainetaso ohjearvot tarkoittavat sitä melun tasoa, jolle sisätiloissa oleskeleva henkilö saisi enintään altistua. Rakennusten teknisten laitteiden aiheuttaman melun keskiäänitason on oltava alle ohjearvojen. Ohjearvot löytyvät RakMk:n osasta D2 (2010, liite 1 taulukko 2). Melutaso mittaukselle ei kuitenkaan ole annettu yksiselitteisiä mittausohjeita, sillä ajalliset ja paikalliset arvot sekä meluhaittojen ja melutasojen väliset riippuvuudet vaihtelevat tapauskohtaisesti.

#### 4.7.3 Sisäilmastomittausten laajuus

Standardin (SFS 5511) asettamat sisäilmastomittausten laajuus vastaanoton yhteydessä on esitetty taulukossa 3. Tietty osa rakennuksen huonetiloista valitaan satunnaisotoksella siten, että saadaan käsitys koko rakennuksen toimivuudesta ja suunnitelmienmukaisuudesta. Otoksen suuruus määritellään tapauskohtaisesti suunnitellun sisäilmaston luokitustason, rakennustyyppin ja tilojen käyttötarkoituksen mukaan. Lämpöolosuhteet mitataan pääasiassa työskenntely- ja oleskelutiloista 1,1 metrin korkeudelta lattiasta. (SFS 5511)

Taulukko 3. Sisäilmastomittausten laajuus. Taulukko on mukailtu standardin SFS 5511 (1989, 2) ja viitteen Pietiläinen et al. 2007 (151) mukaisesti.

LAATULUOKKA	S1	S2	S3
Huoneilman lämpötila 1)	100	40	20
Ilman nopeus (veto)	100	40	20
Pintojen lämpötilat	o	o	o
Operatiivinen lämpötila	z	z	z
Huoneilman kosteus	10	10	o
Huoneilman laatu (pitoisuudet)	o	o	o
Huonekohtainen tuloilmavirta 2)	100	100	100
Huonekohtainen poistoilmavirta 2)	100	100	100
Äänitaso huoneessa (SFS 5517) 3)	30	20	10
Painesuhteet (paine-ero ja suunta)	30	20	10
Ääneneristävyys	z	z	z
Tuloilman lämpötila	z	z	z

o = Mitataan vain, jos erikseen sovitaan.

z = Mitataan, jos on ilmeiset syyt epäillä, että suunnitelmat/vaativukset eivät toteudu.

- 1) Lämmönjaon perussäädön yhteydessä tehdään kaikkien huoneiden lämpötilojen mittaus.
- 2) Ilmavirtojen perussäädön yhteydessä mitataan kaikkien huoneiden tulo- ja poistoilmavirrat sekä koko laitoksen ilmavirrat.
- 3) Kun huonetilat ovat lähinnä samantyyppisiä tiloja, joiden äänitaso on sama. Muussa tapauksessa otos valitaan suuremmaksi.

Taulukon luvut tarkoittavat otoksen suuruutta prosentteina mitattavista tiloista. Lisätietoa sisäilmastoluokituksista löytyy kortista LVI 05–10440, Sisäilmastoluokitus 2008. Hyväksyttävät poikkeamat sisäilmaolosuhteissa ja muissa mitoitusarvoissa esitetään RakMk:n osassa D2 (2010). Poikkeamat sisältävät mittaustuloksen poikkeamat ja mittauserävarmuuden.

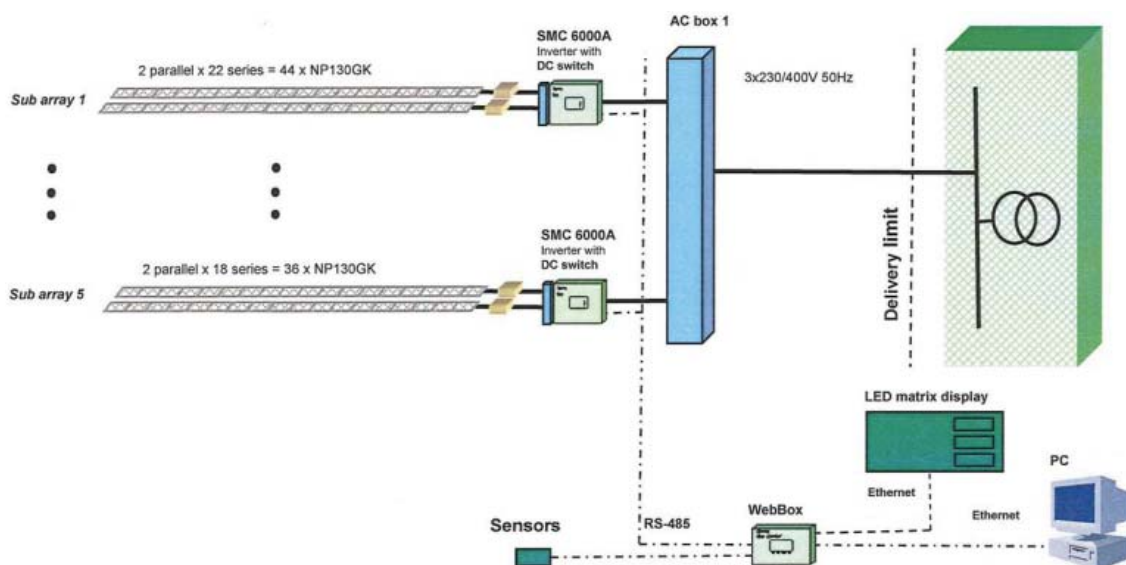
## 4.8 Energiantuotanto

Kiinteistössä voi olla myös energiantuotantojärjestelmiä. Uusiutuvien energianlähteiden käyttö lisääntyy tulevaisuudessa ja siihen pohjautuvien järjestelmien toteutus myös toimistorakennuksiin tulee entistä ajankohtaisemmaksi. Yleisimpiä uusiutuviin energianlähteisiin perustuvia ratkaisuja kiinteistöissä ovat maalämpö- ja aurinkosähköjärjestelmät. Seuraavissa luvuissa esitellään näiden järjestelmien toiminnan yleiskuvaus sekä energiatehokkuuden kannalta oleellimmat mittauseräparametrit ja mittausten toteutustekniikka.

Lämmityksessä voidaan käyttää myös auringon lämpöenergiaa aurinkokeräimen avulla. Järjestelmä sisältää aurinkokeräimen (levy tai vakuumi) lämpöenergian talteenottoon, nestettä lämmön siirtämiseen ja varaajaa lämmön varastointiin. Tavallisimpia käyttökohteita ovat käyttöveden lämmitys ja aurinkokeräimen yhdistäminen vesikiertoiseen lattialämmitykseen. Järjestelmän tehokkuutta voidaan mitata säteilymäärän ja nesteen lämpötilan avulla.

### 4.8.1 Aurinkosähköjärjestelmä

Toimistorakennuksissa sähkönkulutus on yleensä huipussaan päiväaikaan, jolloin esimerkiksi aurinkosähkön tuotto on parhaimmillaan. Seuraavassa esitellään aurinkopaneelijärjestelmän yleiskuvaus (kuva 11) ja tehokkuuden mittauseräparametrit.



Kuva 11. Aurinkopaneelijärjestelmän yleiskuvaus. (Naps Systems Oy 2010)

Piistä valmistetut aurinkopaneelit muuttavat auringon säteilyenergian sähköenergiaksi. Aurinkopaneelit ovat tasavirtalähteitä, joita voi kytkeä rinnan ja sarjaan tarvittavan jännitteen ja virran saavuttamiseksi. Järjestelmän käyttöjännite on tavallisesti 12 V, joten siihen tulee kytkeä vaihtosuuntaaja (invertteri). Sähkö voidaan johtaa verkkoon, kulutuslaitteille ja varastoitavaksi akustoon. Järjestelmään voidaan liittää webbox, joka kerää ja säilyttää mittasensoreilta tulevan tiedon. Tietoa voidaan käsitellä päätelaitteen avulla, joka ottaa yhteyden webboxiin.

Usein sähköverkko tasaa tuotannon ja kulutuksen ja toimii energian ”varastona”. Kiinteistön kulutuspisteet ottavat kaiken mahdollisen energian auringosta ja lisätarpeet verkosta ja lisäksi mahdollinen ylimääräinen energiantuotanto syötetään verkkoon. Kun aurinkoenergiaa ei ole saatavissa, tarvittava sähkö ostetaan verkosta. Jos sähköenergiaa siirretään verkkoon, on siirrosta tehtävä verkkopalvelusopimus ja sähkönlaadun vastata standardin (SFS-EN 50160) asettamia vaatimuksia. Sähkön laadun mittauksesta vastaa verkkoyhtiö.

Järjestelmän hyötysuhdetta kuvaa hyvin säteilytehon ja paneelien tuottaman sähkötehon suhde. Auringon säteilyanturina voidaan käyttää pyranometriä, joka mittaa säteilyn intensiteettiä ( $W/m^2$ ). Varustamalla anturi varjostusrenkaalla, voidaan mitata myös hajasäteilyn määrää. Hyötysuhde ei ole vakio, vaan se muuttuu säteilymäärän mukaisesti. Mitattua järjestelmän hyötysuhdetta verrataan valmistajan ilmoittamaan hyötysuhteeseen, joka on laskettu kyseisenomaisen säävyöhykkeen, asennuspaikan korkeuden merenpinnasta ja arvioidun optimisuuntauksen mukaisesti. Merkittävästi pienempi mitattu hyötysuhde kuvaa puutteita järjestelmän teknisissä ominaisuuksissa tai asennuksessa.

Merkittävin sähköntuottoon liittyvä tekijä järjestelmässä on paneelien optimikallistuskulma. Optimisuuntausta kohteessa voidaan tutkia mittauspaneelien tai pyranometriä avulla. Asentamalla yksi mittauspaneeli samansuuntaisesti pääpaneelien kanssa, voidaan määrittää mittauspaneelin suhde pääpaneelisiin. Tämän jälkeen asennetaan muut mittauspaneelit eri ilmansuuntiin ja kallistuskulmiin ja järjestelmän sähköntuottoa voidaan tutkia mittauspaneelista mitatun tehon avulla (Viitanen et al. 2010).

Laitteen valmistaja ilmoittaa tavallisesti optimikallistuskulman ja sen perusteella lasketun järjestelmän sähköntuottoarvion. Optimisuuntauksen tutkiminen on siten enemmän laitevalmistajan tehtävä. Kiinteistön omistajaa kiinnostaa, tuottaako järjestelmä valmistajan takaaman sähköntuoton. Sähköntuoton mittauksen lisäksi on kuitenkin mitattava säteilyn määrä, jotta varmistutaan sään vaikutuksista sähköntuottoon.

Vastaanottotarkastuksen yhteydessä tarkistetaan, vastaako paneelien suuntaus valmistajan ilmoittamaa optimikulmaa. Paneelien kallistuskulmaa voidaan säätää myös eri vuodenaikoina esimerkiksi moottorin avulla. Tällöin kohteen sijaintipaikkakunnan optimikallistuskulmat tulee merkitä esimerkiksi kuukausittain jaoteltuna kiinteistöautomaatiojärjestelmään. Järjestelmän sähköenergian mittaus edellyttää kaksisuuntaisen mittauksen, jos osa sähköenergiasta syötetään verkkoon ja osa kulutukseen.

#### **4.8.2 Maalämpöjärjestelmä**

Maalämpöjärjestelmä koostuu pintamaahan, kallioon tai veteen sijoitetusta putkistosta (lämmönkeruupiiri), jonka sisällä kiertävää nestettä ympäröivä maaperä lämmittää. Maalämpö on aurinkoenergiaa, joka on varastoitunut maa- ja kallioperään tai vesistöihin auringonpaisteen, lämpimän ilman tai sateiden avulla. Kiertäessään putkistossa neste kerää lämpöenergiaa ympäröivästä maa-aineksesta. Keruupiirin nesteestä saatava lämpö höyrystää lämpöpumpussa kiertävän kylmäaineen. Höyrystyneen kylmäaineen painetta nostetaan kompressorilla, jolloin myös sen lämpötila nousee. Kylmäaine lauhtuu lämpöpumpun lauhttimessa jälleen nesteeksi, jolloin se luovuttaa lämpöä lämmönjakoverkkoon. Kesäaikainen jäähdytys toimii vastaavalla periaatteella.

Toimiakseen tehokkaasti keruupiiri on mitoitettava oikein ja käytettävä alhaisten lämpötilojen lämmönjakojärjestelmiä kuten ilmalämmitystä. (RT 50–10755, 2001)

Maalämpöjärjestelmän tehokkuuden mittaaminen koostuu pumppujen kompressorien ottaman sähkötehon sekä järjestelmän tuottaman lämpötehon mittaamisesta. Mittausjärjestely on kuvattu luvussa 4.2. Valmistajien ilmoittamat COP-arvot ovat usein vuotuisia keskiarvokertoimia (RT 50–10755, 2001). Lämmitykseen ja jäähdytykseen tarkoitetuista, sähkökäyttöisellä kompressorilla toimivista huoneilmastointikoneista, nestejäähdyttimistä ja lämpöpumpuista löytyy lisätietoa standardista SFS-EN 14511. Standardi sisältää tarkempaa tietoa määritelmistä, testausolosuhteista ja -menetelmistä sekä vaatimuksista.

## **4.9 Veden kulutus**

Rakennuksen veden kokonaiskulutuksen mittaamisesta vastaa yleensä paikallinen vesiyhtiö. Päävesimittarilta kulutustieto tulee siirtää kiinteistöautomaatiojärjestelmään. Veden kokonaiskulutuksen vähentämisellä vähennetään myös kasvihuonepäästöihin kuuluvia metaanipäästöjä, joita syntyy jäteveden käsittelyn yhteydessä. Veden kulutuksen rajoittamisen seurauksena puhtaan veden tuottamiseen käytettävä energia pienenee.

Veden kokonaiskulutuksen lisäksi tulisi mitata lämpimän käyttöveden kulutus, sillä se vaikuttaa suoraan lämmitysenergiankulutukseen. Myös tilakohtaisista kulutustiedoista on hyötyä. Toimistorakennuksissa esimerkiksi keittiön vedenkulutus on usein hyödyllistä alimitata. Tilan vuokralaisena on usein eri yritys. Tällöin kiinteistön omistaja voi laskuttaa vuokralaista todellisen kulutuksen mukaisesti. Tilakohtaisella mittauksella voidaan myös erottaa esimerkiksi sisä- ja ulkovedenkulutus. Asuinrakennuksissa huoneistokohtaisen mittauksen suurin etu liittyy laskutuksen oikeudenmukaisuuteen asukkaiden kesken.

Rakennuksen vastaanoton yhteydessä on hyödyllistä toteuttaa vesikalustemittaus, jotta varmistetaan veden jakelujärjestelmän ja vesikalusteiden asennusten ja säätöjen suunnitelmanmukaisesta toiminnasta. Mittauksiin voidaan sisällyttää esimerkiksi wc-istuimien, urinaalien, allashanojen, suihkujen sekä keittiön hanojen vesimäärien mittaukset. Laitevalmistaja on ilmoittanut kalusteiden kulutuksen ohjearvot. Mittauksen yksikkönä käytetään yleensä  $\text{dm}^3/\text{huuhdeltu}$  tai  $\text{dm}^3/\text{minuutti}$ .

## **4.10 Muut mittaukset**

### **4.10.1 Järjestelmien käyttöajat**

Taloteknisten järjestelmien käyttöaikojen optimoinnilla voidaan vaikuttaa merkittävästi rakennuksen energiankulutukseen. Useimpien laitteiden ja järjestelmien käyttöaikoja seurataan valvonta-alakeskuksen tai laitteeseen integroidun käyntiaikalaskurin avulla. Tieto siirretään tiedonsiirtoväylän (m-bus tai modbus) avulla kiinteistöautomaatiojärjestelmään. Käyntiaikojen seuranta tulee toteuttaa ainakin merkittävimpien valaistusryhmien ja ilmanvaihtokoneiden osalta.

### **4.10.2 Astepäiväluku**

Astepäiväluvun (lämmitystarveluku) avulla korjataan toteutuneita lämmitysenergian kulutuksia, jotta voidaan verrata toisiinsa saman rakennuksen eri kuukausien tai vuosien kulutuksia ja eri kunnissa olevien rakennusten ominaiskulutuksia. Astepäiväluvun käyttö rakennuksen lämmitystarpeen arvioinnissa perustuu siihen, että rakennuksen energiankulutus on likipitään verrannollinen sisä- ja ulkolämpötilojen erotukseen. (Ilmatieteenlaitos 2010)

Astepäiväluku saadaan laskemalla yhteen kuukauden päivittäisten sisä- ja ulkolämpötilojen erotus. Yleisimmin käytetään astepäivälukua  $S_{17}$ , joka lasketaan

+17°C:ksi oletetun sisälämpötilan ja ulkolämpötilan vuorokausikeskiarvon erotuksen perusteella. Kuukauden astepäiväluku on vuorokautisten astepäivälukujen summa ja vuoden astepäiväluku on vastaavasti kuukausittaisten astepäivälukujen summa. Astepäiväluvun laskennassa ei oteta huomioon päiviä, joiden keskilämpötila on keväällä yli +10 °C ja syksyllä yli +12 °C. Tällöin oletetaan, että kiinteistöjen lämmitys lopetetaan ja aloitetaan päivittäin ulkolämpötilan ylittäessä tai alittaessa mainitut rajat. (Ilmatieteenlaitos 2010). Usean paikkakunnan astepäiväluvun saa myös tilattu ulkopuoliselta taholta, mutta mittaus vaatii ainoastaan lämpötilamittarin ja laskenta voidaan suorittaa kiinteistöautomaatiojärjestelmän päätelaitteen avulla.

#### **4.10.3 Sähkön laatu**

Sähkön laadun mittauksessa tavallisimpia monitoroitavia suureita ovat vaihejännitteet, virrat, kokonaissärö (THD), tasajännitekomponentin itseisarvot, jännitteen epäsymmetria, taajuus sekä jännitteen- ja virran harmoniset yliaallot (SFS-EN 50160). Sähkön laadun mittauksesta vastaa tavallisesti kuitenkin verkkoyhtiö.

#### **4.10.4 NIALM - mittausjärjestelmä**

Non-Intrusive Appliance Load Monitoring (NIALM) - mittausjärjestelmä perustuu laitteiden sähköisten toimintatilojen muutosten (sähköiset sormenjäljet) rekisteröintiin sähkökeskuksesta käsin yhdestä mittauspisteestä ja analysointi laitekohtaisen sähkökulutuksen selvittämiseksi. Sähkökeskuksen syöttöjohtoihin kytketään mittalaite, joka rekisteröi riittävän suurella taajuudella pätö- ja loistehojen (jännitteet ja virrat) arvot aina silloin, kun ne muuttuvat asetettujen raja-arvojen ulkopuolelle. Arvoja reaaliaikaisesti analysoimalla tunnistetaan kehitettyjen algoritmien avulla laitteiden päälle- ja poiskytkennät sekä tehotilasta toiseen siirtymiset. Tiedoista piirretään laitteille kuormituskäyriä, jotka kertovat tehonmuutoksen suuruuden ajan funktiona. Tehonmuutospareja käytetään erottamaan laitteet toisistaan. NIALM:sta edelleen kehitetyssä PQ-NIALM (Power Quality) mittausjärjestelmässä seurataan edellisten lisäksi sähkön laatusuureita. (Pihala 2002)

NIALM soveltuu paremmin olemassa olevien rakennusten sähkölaitteiden ajallisen sähkökulutuksen analysointiin. Menetelmän avulla saadut mittaustulokset eivät ole tarkkoja, mutta useimpiin käytännön sovelluksiin riittäviä. Menetelmä on yksinkertainen ja edullinen verrattuna perinteiseen sähkökulutuksen laitekohtaiseen mittaukseen.

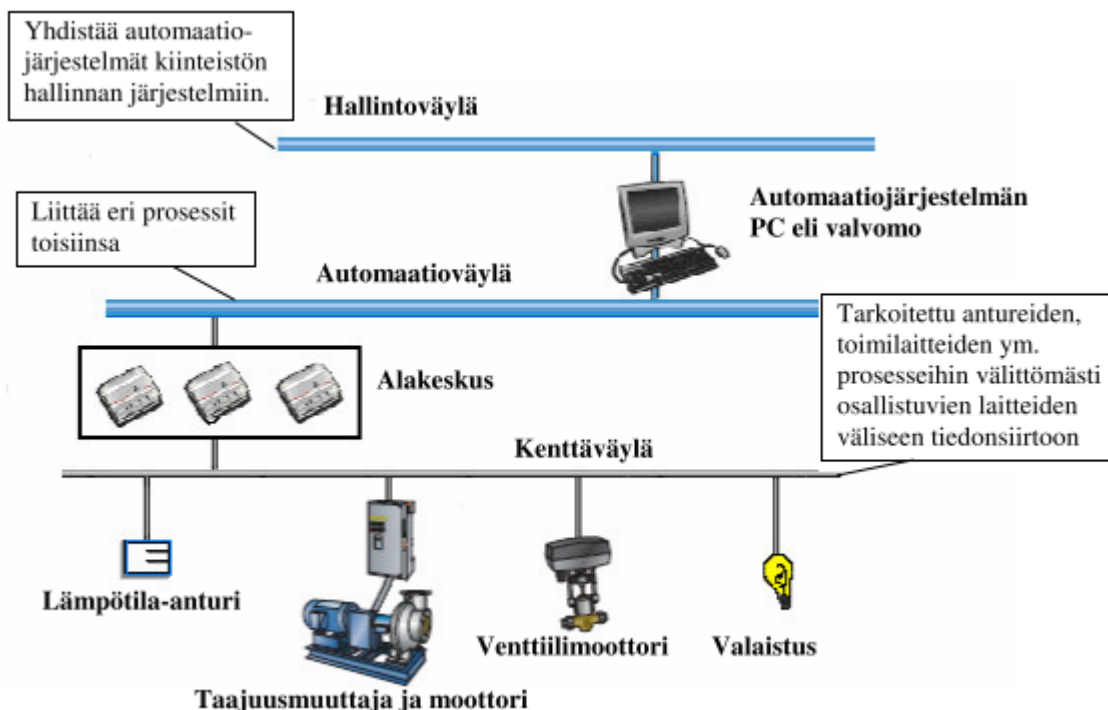


## 5 Seuranta ja raportointi

Eri puolilla Suomea tehdyissä energiakatselmuksissa on tullut esille, että samanlaisissa olosuhteissa, tekniikaltaan ja käyttöasteeltaan samanlaisissa rakennuksissa, on merkittäviä keskinäisiä kulutuseroja. Ne johtuvat kiinteistöjen käytöstä, ylläpidosta sekä kulutusten ja olosuhteiden seurannasta. Huollon ja ylläpidon parantamisen jälkeen paljon energiaa kuluttavien kiinteistöjen kulutukset ovat laskeneet vertailutasolle. Kiinteistöautomaatiojärjestelmällä ohjataan ja valvotaan kiinteistön talotekniikan toimintaa siten, että tavoitellut työskentelyolosuhteet saavutetaan mahdollisimman pienellä energiankulutuksella. (ST 98.50, 2010). Kiinteistön käyttö ja huolto tulee järjestää niin, että määräysten mukaisesti suunniteltu energiatalous ja sisäilmasto-olosuhteet voidaan säilyttää (Maanrakennuslaki 153 §; RakMk D5 2007). Luvussa kuvataan kiinteistöautomaatiojärjestelmän toimintaperiaate sekä energiankulutuksen ja olosuhteiden seuranta.

### 5.1 Kiinteistöautomaatiojärjestelmän toimintaperiaate

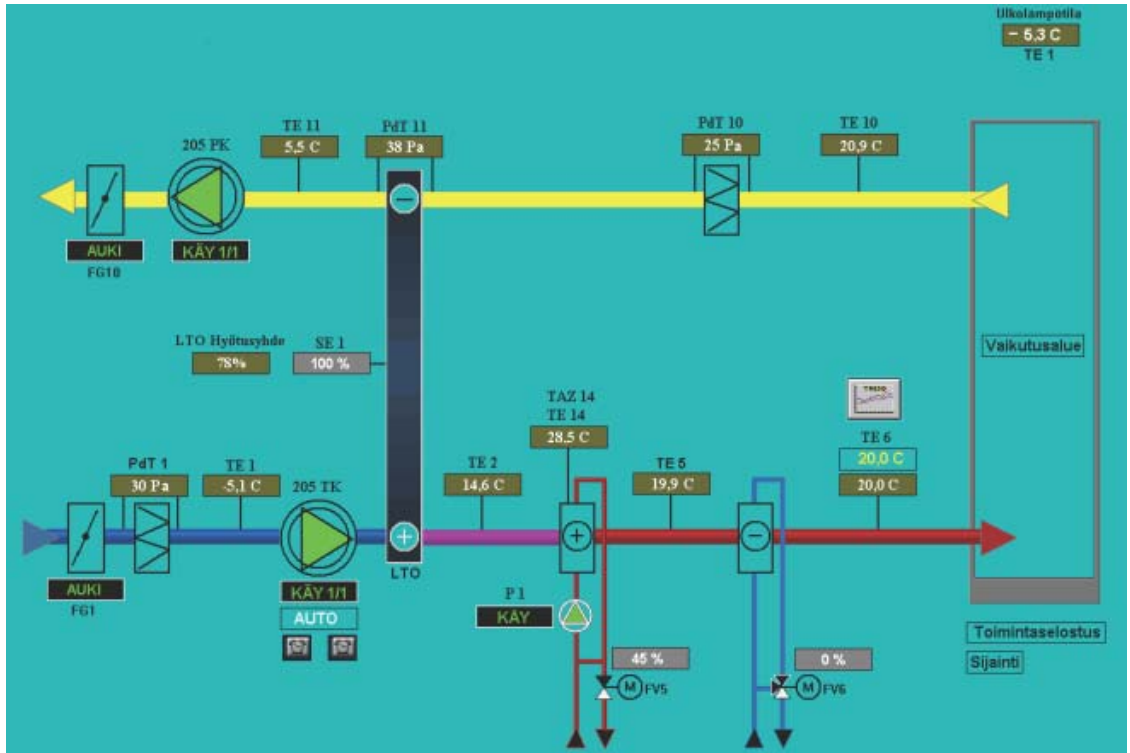
Kiinteistöautomaatiojärjestelmä on kiinteistön käytöstä ja huollosta vastaavan kiinteistöorganisaation keskeinen työkalu. Kiinteistöautomaation hierarkia on mallinnettu kuvassa 12. Kenttäväylä on tarkoitettu erilaisten mitta-anturireiden, toimilaitteiden ja muiden prosesseihin välittömästi osallistuvien laitteiden väliseen tiedonsiirtoon. Prosessien tila- ja mittaustiedot välitetään kenttäväylältä alakeskukseen, joka ohjaa niiden toimintaa. Alakeskuksen ja kenttäväylän välinen fyysinen rajapinta toteutetaan standardien mukaisilla I/O-pisteillä (Input/Output) tai digitaalisella tiedonsiirrolla. Alakeskusten välinen tiedonsiirto tapahtuu automaatioväylän välityksellä ja se liittyy alakeskukset valvomoon. Hallintoväylän avulla automaatiojärjestelmän valvomo yhdistetään kiinteistöautomaatiojärjestelmään. (Pakanen 2008)



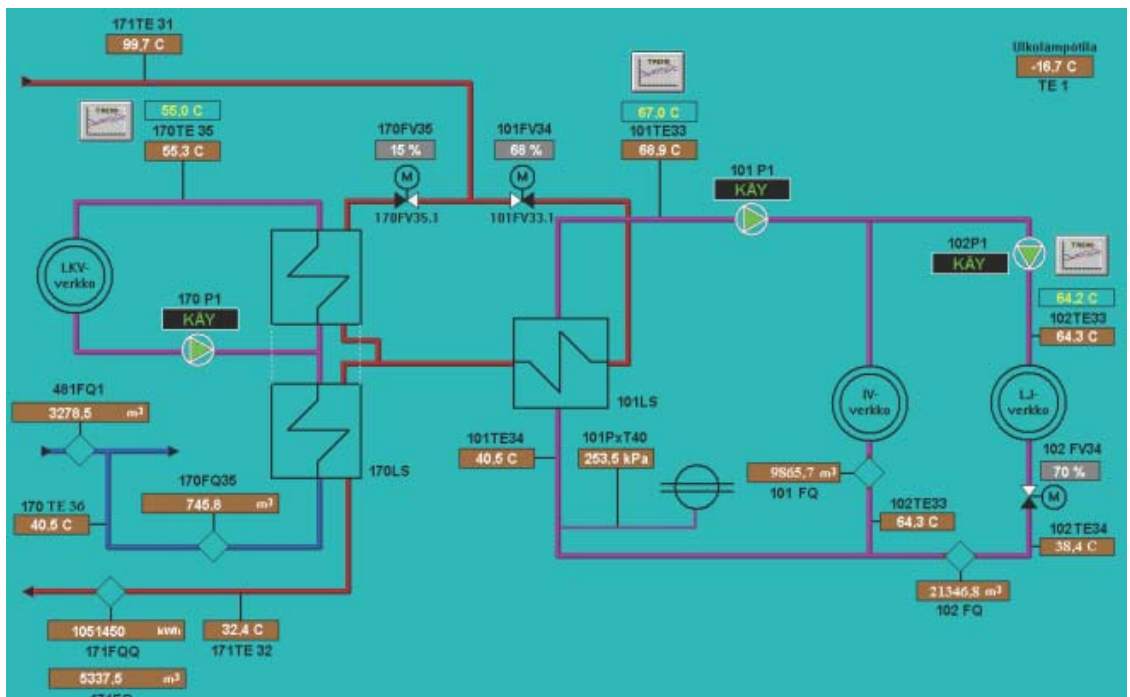
Kuva 12. Kiinteistöautomaatiojärjestelmän hierarkia. (Pakanen 2008)

Nykyaikaiset kiinteistöautomaatiojärjestelmät toimivat usein selain-pohjaisesti. Tällöin kiinteistövalvomot siirtyvät konsulttien ja huolto-organisaatioiden ulottuville etävalvomoina, jolloin voidaan analysoida ja säätää kiinteistöjen järjestelmiä tehokkaasti ja keskitetysti.

Kuvassa 13 on ilmanvaihtokoneen grafiikkakaavio. Esimerkkikaaviossa näkyy prosessien toiminta-arvot ja voimassa olevat hälytykset. Kaaviot voi linkittää esimerkiksi huoltokirjaohjelmistoon, energiankulutustietoihin ja toimintaselostuksiin. Lämmitysjärjestelmän grafiikkakaavioon (kuva 14) on lisätty kulutustiedot. (ST 98.50, 2010, 2-3)



Kuva 13. Ilmanvaihtokoneen grafiikkakaavio. (ST 98.50, 2010)



Kuva 14. Lämmitysjärjestelmän grafiikkakaavio. (ST 98.50, 2010)

### 5.1.1 Ohjaukset

Tavallisimpia ohjauksia ovat aikaohjaukset, jotka ovat yksinkertainen ja yleinen tapa ohjata rakennuksen taloteknisiäjärjestelmiä. Aikaohjelmat voidaan asettaa yleensä minuutin tarkkuudella ja juhlapyhien-, vapaapäivien ym. asettelu on yksinkertaista. Ongelman usein muodostaa käyntiaikojen liukuminen yli tarpeen. Perusaikaohjelmaa muutetaan jonkin poikkeuksellisen tapahtuman johdosta ja unohtetaan palauttaa se ennalleen. Vastaavaa ilmenee myös käsikäyttöohjauksiin siirryttäessä. Järjestelmien ja laitteiden tarpeettomat käyttöajat on mahdollista karsia käyntiaikaseurannalla sekä kytkemällä ohjattavat pisteet ristiriitahälytyksiin, jolloin käsikäyttötilanteet tulevat esiin. Tärkeää on pitää käyttöhenkilöstö tietoisena rakennuksen käyttöajoista ja niiden mahdollisesta muuttumisesta. (ST 98.50, 2010)

Läsnäolo- ja ajastinohjauksia käytetään usein rakennuksissa ja tiloissa, joiden käyttöajat ovat epäsäännölliset. Läsnäolo-ohjauksen heikkoutena pidetään investointikustannuksia ja ajastinohjauksissa on vaarana ajastetun ajan liukuminen turhan pitkäksi, jolloin energiansäästöpotentiaali katoaa. (ST 98.50, 2010)

Optimointiohjelmat laskevat esimerkiksi tilojen optimaalisen lämmityksen aloitus- ja lopetushetken ulko- ja sisälämpötilojen perusteella huomioiden rakennuksen ominaisuudet. Tällöin tilojen olosuhteet ovat yöllä normaalin viihtyvyysalueen ulkopuolella. Optimointiohjelmien käytössä on kuitenkin esiintynyt ongelmia. Optimointitapahtuma tulee raportoida ja siitä on käytävä ilmi lämmityksen aloitus- ja lopetusaika sekä tällöin olleet sisä- ja ulkolämpötilat. Optimointiohjelman tulisi sisältää myös toiminnot, jotka suojaavat optimoituja tiloja lämpö- ja kosteusvahingoilta. Optimointiohjelmaa voidaan käyttää myös muun muassa ulkoa tulevan lämpösäteilyn hallintaan. Automaatio ohjaa ikkunoiden säleikköä tai markiiseja tilanteissa, joissa syntyy jäädytystarvetta. Vastaavasti tuulen nopeuden kasvaessa ulkona aseteltujen rajojen ulkopuolelle automaatio huolehtii markiisien vetäytymisestä sisälle. (ST 98.50, 2010)

Sähkön hinnoittelun perusmaksu perustuu kiinteistön huipputehoon. Sähkön huipputehon rajoitusohjelman tarkoituksena on tasata tehontarpeen huiput kytkemällä kuormia pois/päälle vuorotellen aseteltavan maksimiaikavälin ja rajoitettavan tehontarpeen mukaisesti. Ongelmana huipputehon rajoitusohjelman käytössä on ollut löytää kuormia, joita voitaisiin toistuvasti kytkeä pois vaikuttamatta viihtyvyys tekijöihin. Kuormien pudottaminen on huomioitava myös laitteiden ryhmittelyssä keskuksiin. Rajoitusohjelma on hyödyllinen myös pörssihintaan perustuvassa sähköenergian hinnoittelussa, jolloin rajoitus perustuu energiayhtiöltä saatavaan tietoon sähkön korkeasta hinnasta. (ST 98.50, 2010)

Lisäksi on käytössä erilaisia lukitusohjelmia, joilla estetään laitteiden kuten jäädytyskompressorien, kiertoilmakoneiden ja saattokourulämmitysten käynti silloin, kun niitä ei tarvita. Kiinteistöautomaatio mahdollistaa myös laitteiden ja järjestelmien ohjauksen mittaustietoon perustuen, esimerkiksi ulko- tai tilan lämpötilaan, ilmanlaatuun, (hiilidioksidi, kosteus) tuulen nopeuteen tai valoisuuteen. Mittauksiin perustuvien säätötapahtumien tarkoituksena on vähentää energiankulutusta, parantaa työskentelyolosuhteita sekä ehkäistä laitteiden ja järjestelmien kulumista. Mittausten avulla tehtäviä toimintoja ovat myös erilaiset muut säätötapahtumat: (ST 98.50, 2010, 6-7)

- Lämpötilansäätö lämmitys-, jäädytys- ja käyttövesijärjestelmissä sekä ilmanvaihtokoneiden sisäänpuhallusilmassa
- Sisä- ja ulkovalaistusta voidaan säätää valaistusvoimakkuuteen perustuen
- Verkoston pumppujen paine-erosäätö, jolloin pumppujen pyörimisnopeutta ohjataan siten, että verkoston paine pysyy vakiona kuorman vaihdellessa
- Ilmanvaihtokoneen suodattimien tarkkailu paine-eromittaukseen perustuen
- LTO-laitteiden paine-eromittaus, minkä perusteella ohjataan sulatusta

- Alustan kosteuden mittauksen perusteella säädetään tuuletusta

### **5.1.2 Hälytykset**

Kiinteistöautomaatiojärjestelmään voidaan asettaa hälytyksiä, mikäli toiminnot eivät vastaa asetettuja ehtoja ja olosuhteita. Hälytysten tehokas hyödyntäminen edellyttää, että hälytykset luokitellaan esimerkiksi palo-, murto- ja hissihälytyksiin sekä kiireelliset talotekniset- ja huoltohälytykset omiin luokkiinsa. Tehokas hälytysten hyödyntäminen vaatii, että kiinteistöautomaatiojärjestelmän toimintaan voidaan luottaa. (ST 98.50, 2010)

Turhat hälytykset viestivät yleensä, että kiinteistön huolto ei toimi tehokkaasti ja energian kulutus ei ole optimitasolla. Turhat hälytykset myös turhauttavat hoitohenkilöstöä ja pitemmän päälle todellisiinkin hälytyksiin ei enää reagoida. (ST 98.50, 2010)

### **5.1.3 Säädot**

Säätojen toimintaa on seurattava, jotta havaitaan tilanteet, joissa säätöportaat menevät päällekkäin esimerkiksi laitevikojen takia. Virhetilanteet ja huonosti viritetyt säädöt voivat aiheuttaa huomattavan suuria energiankulutuksen lisäyksiä ja lyhentävät laitteiden käyttöikä. (ST 98.50, 2010)

Valvomon grafiikka (kuvat 13 ja 14) on hyvä työkalu jatkuvaan säätöjen seurantaan. Siinä yleensä nähdään yhdestä kaaviosta koko prosessin toiminta, jolloin helposti havaitaan säätöjen päällekkäiset toiminnot. Paras työkalu säätöjen viritysten tarkastamiseksi ovat kiinteistöautomaatiojärjestelmän trend-seurannat, joista säätöjen toimivuus on helposti todettavissa. (ST 98.50, 2010)

## **5.2 Energiankulutuksen ja olosuhteiden seuranta**

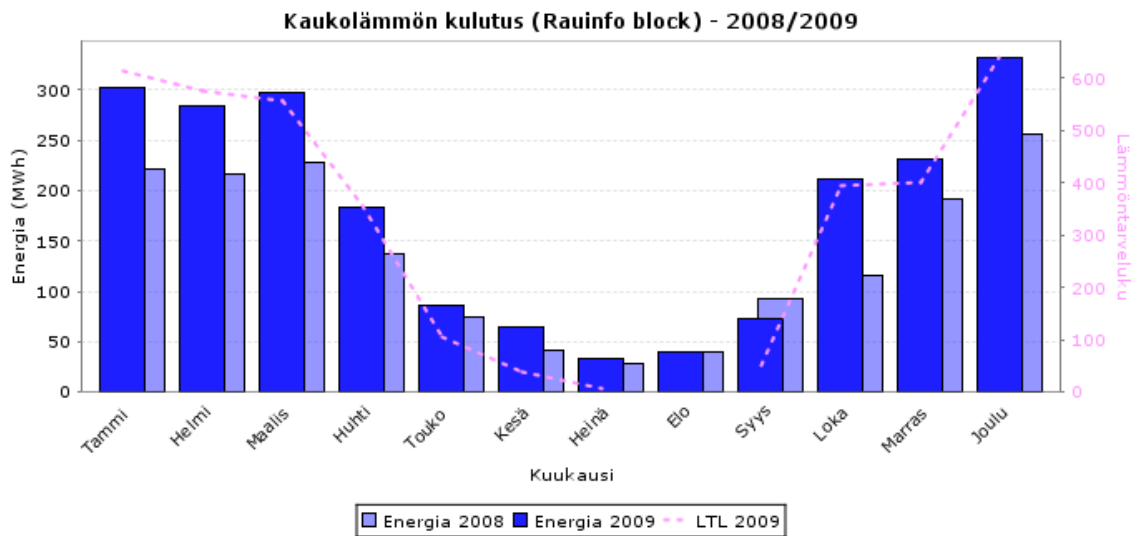
Kiinteistön omistajille ja hallinnoijille suunnattu toiminnanvarmistuspalvelu (esim. RAUinfo) pohjautuu kiinteistöautomaatiojärjestelmästä saatavaan energiankulutus-, kustannus- ja toiminnanvarmistustietoon. Sen tärkein tehtävä on kiinteistön jatkuva toiminnan raportointi riittävällä tarkkuudella ymmärrettävästi. Tunnistamalla ja muokkaamalla käyttäjien ja kiinteistöhoitajien käyttötottumuksia ja – tapoja, voidaan saavuttaa säästöjä, jotka eivät juuri vaadi investointeja.

Kiinteistön hoidossa yhä yleisempi muoto on keskitetty kiinteistövalvonta. Palvelukeskus toimii kaikkien etävalvonnan piiriin liitettyjen kohteiden tukena ja vastaa kiinteistönhoidon ohella taloteknisten järjestelmien käytöstä ja energianhallinnasta. Palvelukeskuksen kautta etäkäytetään, -ohjataan ja -säädetään kiinteistön kiinteistöautomaatiojärjestelmää. Useimmissa järjestelmissä on myös ominaisuus kiinteistökannan vertailuun. Tällöin kiinteistöjen energiankulutuksia voidaan verrata muihin vastaavanlaisiin rakennuksiin, mutta ongelmaksi usein muodostuvat rakennuskohtaiset eroavaisuudet. Ominaisuus vaatii myös omistajalta tai huoltoyhtiöltä laajan kiinteistökannan. Vertailu helpottuu huomattavasti, jos rakennuksen energiankulutuksen perustaso on määritelty yksityiskohtaisesti (energiasimulointi). Seuraavissa luvuissa esitetään rakennusten tavanomaiset energiankulutuksen ja olosuhteiden seurattavat parametrit.

### **5.2.1 Energiankulutuksen seuranta**

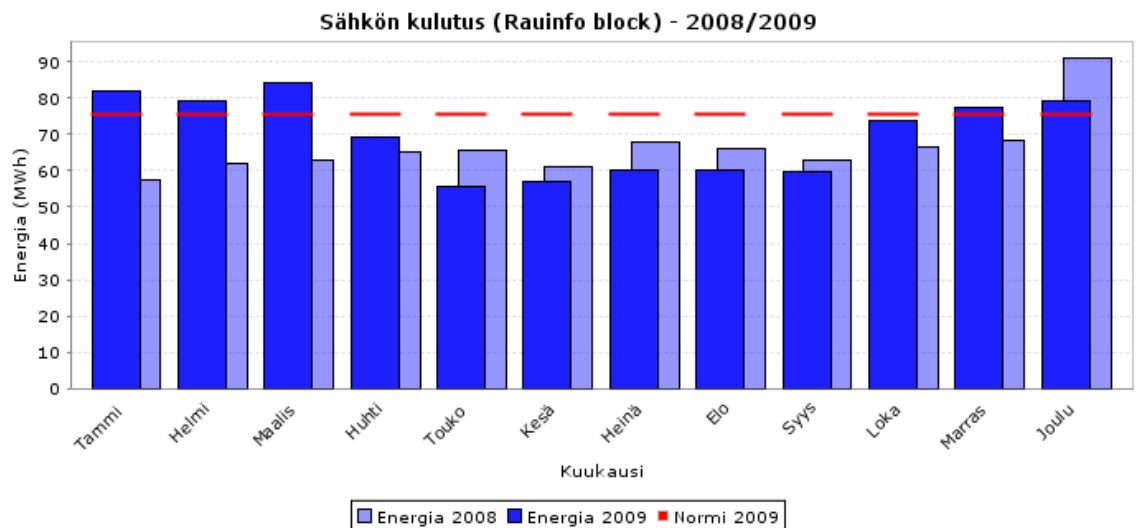
Kiinteistöautomaatiojärjestelmän avulla voidaan tavallisesti tutkia rakennuksen energiankulutuksia päivä-, viikko-, kuukausi- tai vuositasolla. Kuvassa 15 on esitetty kiinteistöautomaatiojärjestelmän toiminnanvarmistuspalvelusta tulostettu erään rakennuksen kaukolämmön kulutuksen kuukausittainen jakauma vuosina 2008–2009. Vaaleanpunainen katkoviiva kuvaa mitattua kuukausittaista lämmöntarvelukua vuonna 2009. Se hieman selventää rakennuksen lämmöntarpeen jakautumista ja

lämmitysjärjestelmän toimivuutta. Kaukolämmön kulutus olisi hyödyllistä jakaa osakulutuksiin, esimerkiksi käyttöveden lämmitykseen, ilmanvaihto- ja patteriverkoston.



Kuva 15. Kaukolämmön kulutuksen kuukausittainen jakauma 2008–2009. (RAUinfo 2010)

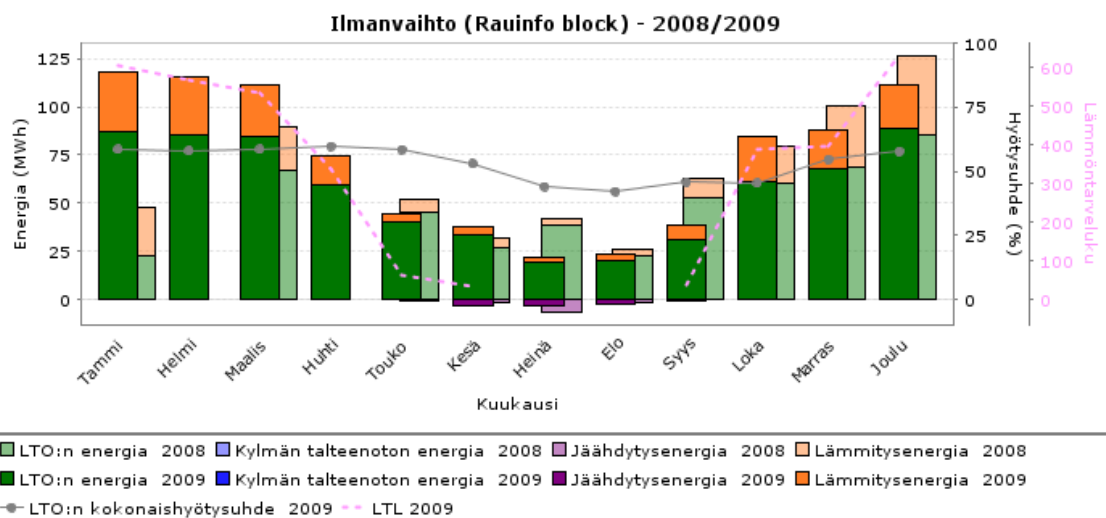
Kuvassa 16 on vastaavasti samaisen rakennuksen sähkön kulutuksen kuukausittainen jakauma vuosilta 2008–2009. Punainen katkoviiva kuvaa rakennuksen arvioitua sähkön kulutusta. Kuva ilmaisee rakennuksen järjestelmien toiminnasta melko vähän. Jos sähkön kulutus olisi alimitattu ja vertailutaso määritelty järjestelmäkohtaisesti, saisimme huomattavasti enemmän informaatiota.



Kuva 16. Sähkön kulutuksen kuukausittainen jakauma vuosina 2008–2009. (RAUinfo 2010)

Kuvassa 17 on samaisen rakennuksen ilmanvaihdon kuukausittainen energiajakauma vuosina 2008–2009. Kuvassa on eroteltu jäädytys- ja lämmitysenergia sekä lämmön- ja kylmän talteenoton energia. Harmaa viiva kuvaa lämmön talteenoton (LTO) kokonaishyötysuhdetta vuonna 2009. Se on matalampi heinä- ja elokuussa, sillä rakennuksessa ei ole tällöin tarvetta lämmön hyödyntämiselle. LTO kokonaishyötysuhde on tavallisesti matalampi myös kylminä kuukausina lämmön

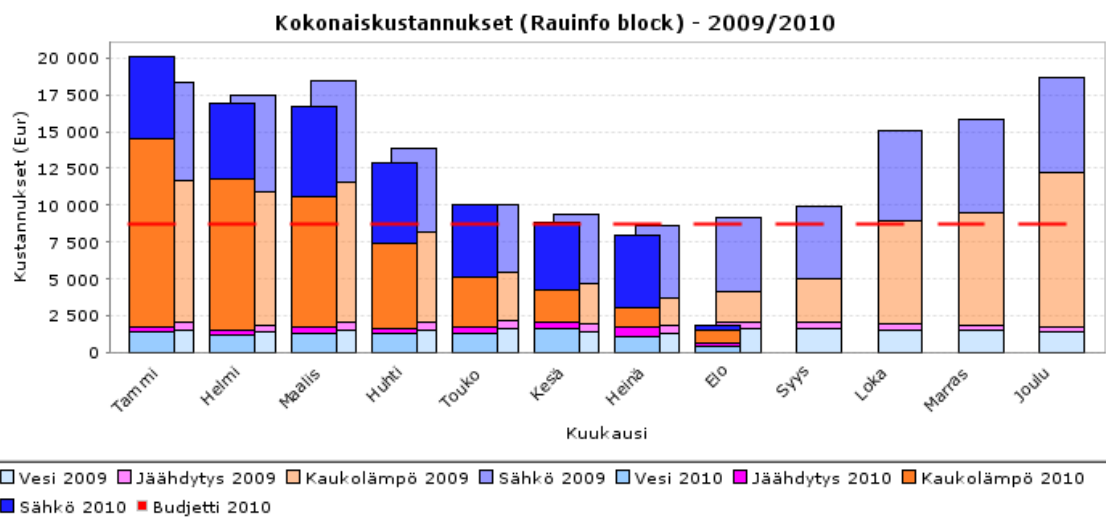
talteenoton rajoittamisen jäätymisen vuoksi. Syys- ja lokakuun tavanomaisesta matalamman hyötysuhteen syy tulisi selvittää tarkemmin.



Kuva 17. Ilmanvaihdon kuukausittainen energijakauma. (RAUinfo 2010)

Kohteessa voi olla myös energiaa tuottavia järjestelmiä. Tällöin kulutus seurannan lisäksi tulisi toteuttaa energiantuotannon seuranta. Jos lisäksi osa energiantuotannosta syötetään verkkoon, on tämä myös eroteltava seurannassa.

Kiinteistön omistajille tärkeä seurattava parametri on kustannukset. Energiakustannuksia analysoidessa on huomioitava energian muuttuva hinta. Vaikka kulutus olisi pienentynyt, energiakustannukset ovat saattaneet nousta. Energiakustannusten jakauma noudattaa tavallisesti kuvan 18 paraabelimuotoa johtuen rakennuksen lämmitysenergiatarpeen laskusta kesäkuukausina. Kuvassa 18 takana on esitetty myös edellisen vuoden kuukausittainen kustannusjakauma.



Kuva 18. Kiinteistön käyttö- ja ylläpitokustannuksiin sisältyvien energiakustannusten kuukausittainen jakautuminen. (RAUinfo 2010)

## 5.2.2 Olosuhteiden seuranta

Vaikka osakulutusten mittauksella saadaan paljon arvokasta tietoa järjestelmien toiminnasta, niin se ei kuitenkaan selitä syitä kulutuksen kasvuun tai laskuun. Kulutusten aleneminen voi johtua esimerkiksi siitä, että tilojen lämpötiloja on alennettu, ilman laatua huononnettu tai kojeiden käyttöaikoja lyhennetty.

Kuvassa 19 on havainnollistettu graafisesti lämpöoloja rakennuksen eri tiloissa. Samassa kuvassa voitaisiin esittää myös muita olosuhdemittausarvoja (SFS 5511; 4.3.4 Sisäilmasto), esimerkiksi huoneilman kosteus ja laatu (pitoisuudet) arvot.



Kuva 19. Lämpötilat rakennuksen eri tiloissa. (ST 98.50, 2010, 13)

## 6 Toimintamallin kehitys

Luvussa käsitellään M&V-suunnitelman laadintaan teoriaosuuden ja menetelmien perusteella kehitetty M&V-prosessi, kustannukset sekä yleisen mallin sisältö pääpiirteittäin. M&V-suunnitelman laadintaan ohjeita ja vaatimuksia antavat kirjallisuuslähteet eivät kuvaa laadinnan prosessia kokonaisvaltaisesti (muun muassa IPMVP 2003; USGBC 2009; M&V Guidelines 2008).

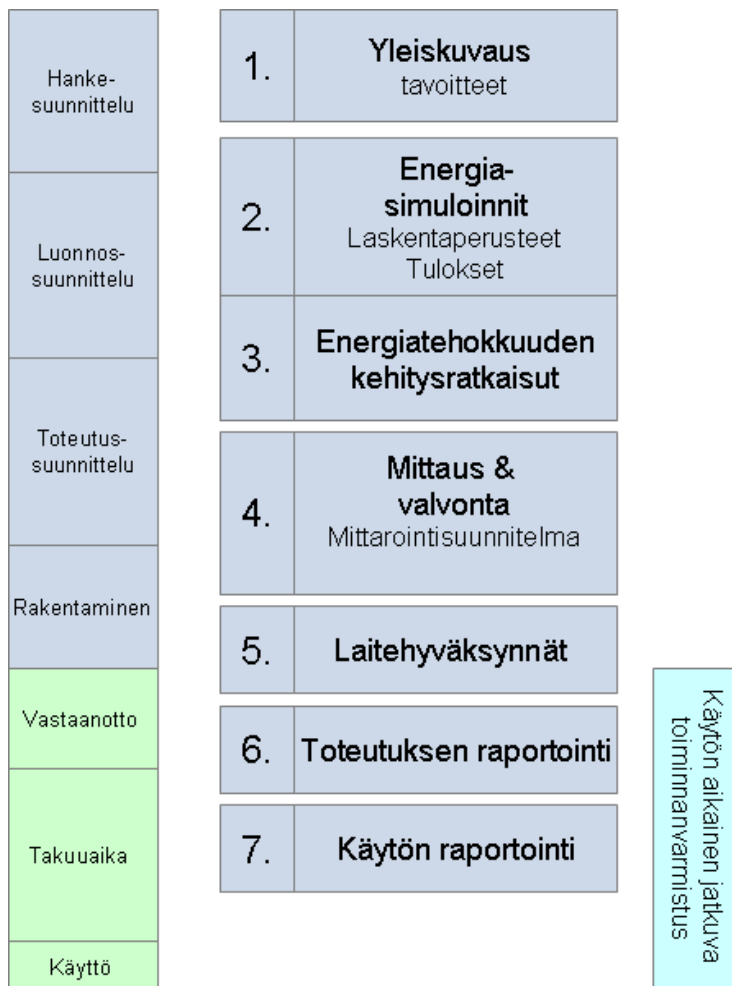
### 6.1 M&V-suunnitelman toteutuksen vaiheet

M&V-suunnitelma voidaan jakaa kolmeen osa-alueeseen: energiasimulointiin, energiatehokkuuden ja energiankulutuksen mittarointiin sekä seurantaan ja raportointiin. Energiankulutussimulointien tarkoituksena on erilaisten suunnitteluratkaisujen arviointi ja kehittäminen energiatehokkuuden näkökulmasta. Tuloksena syntyy rakennuksen suunnitteluratkaisun ja vertailutapauksen laskennallinen energiankulutus ja energiankulutuksen jakauma. Vertailutapauksella tarkoitetaan vastaavan käyttötarkoituksen omaavan rakennuksen ”perusratkaisun” energiankulutusta. LEED-projekteissa perustason simulointi toteutetaan ASHRAE standardin teknisten minimivaatimusten mukaisesti (USGBC 2009; ASHRAE 90.1–2007).

Kohteeseen suunnitellaan riittävän laaja mittaristo rakennuksen energiankulutuksen ja –tehokkuuden todentamiseksi. Mittariston avulla puutteet rakennuksen ja järjestelmien toteutuksessa ja toiminnassa voidaan paikallistaa riittävällä tarkkuudella ja virhetilanteisiin voidaan puuttua nopeasti. Jatkuvat kulutuksen ja tehokkuuden mittarit liitetään kiinteistöautomaatiojärjestelmään. Vertaamalla mitattua energiankulutusta perustason kulutukseen, voidaan energiansäästöt todentaa. Vastaavasti vertaamalla mitattua energiankulutusta simulointimallin suunnitteluratkaisun energiankulutukseen, havaitaan puutteet järjestelmien toiminnassa ja käytössä. M&V-jakson tuloksista koostetaan raportti, joka sisältää kuvauksen merkittävimmistä eroavaisuuksista energiankulutuksessa ja -tehokkuudessa, niihin vaikuttavat asiat sekä ehdotuksen korjaavista toimenpiteistä.

Kuvassa 20 on havainnollistettu M&V-suunnitelman laatimisen prosessia moduulirakenteen avulla. Kuvan vasemmassa reunassa kuvattu rakennushankkeen vaiheistus ei ole suhteutettu niiden ajalliseen pituuteen, vaan pyritty suhteuttamaan M&V-prosessiin. Rakennuksen käytön aikainen toiminnanvarmistus (toteutetaan kiinteistöautomaatiojärjestelmän avulla) alkaa rakennuksen vastaanotosta ja kestää koko käytön ajan.



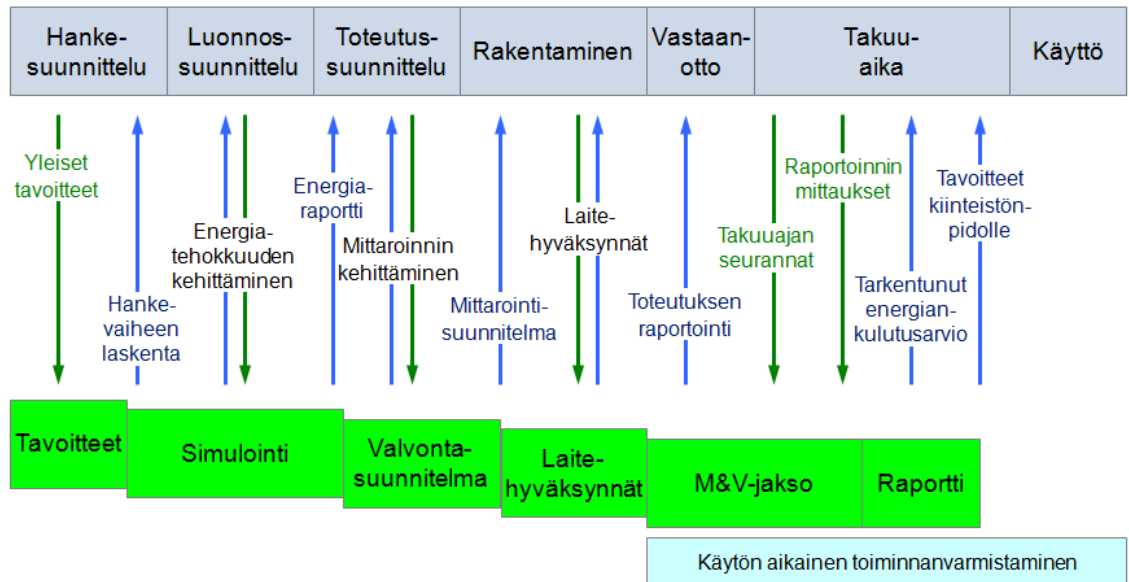


Kuva 20. M&V-prosessi havainnollistettu moduulirakenteen avulla.

Rakennuksen elinkaari voidaan jakaa suunnittelu-, rakentamis-, käyttö- ja käytöstäpoisto vaiheeseen. M&V-suunnitelman tavoitteet on asettava hankesuunnitteluvaiheessa ja seurantajakson on käsitettävä vähintään vuosi (LEED NC 2009, EAc5) rakennuksen käyttöönotosta. Suunnitelmaan sisältyvää energiatehokkuuden seurantaan tulisi kuitenkin harjoittaa vähintään urakoitsijan takuuajan, jotta voidaan varmistua, että talotekniset järjestelmät täyttävät niille asetetut vaatimukset.

Suomessa rakennusurakan takuu-aika on kaksi vuotta, ellei urakkasopimuksessa ole toisin määrätty. Urakoitsija on velvollinen korjaamaan kustannuksellaan takuuajana ilmenneet virheet, joiden urakoitsija ei näytä aiheutuneen hänestä riippumattomista syistä. Takuuajan jälkeinen vastuu urakoitsijalla on 10 vuotta. Yleisten sopimusehtojen mukaan urakoitsija vastaa takuuajan jälkeen ainoastaan sellaisista virheistä, joiden näytetään aiheutuneen urakoitsijan törkeästä laiminlyönnistä, täyttämättä jääneestä suorituksesta tai laadunvarmistuksen olennaisesta laiminlyönnistä ja joita virheitä tilaaja ei ole kohtuudella voinut havaita vastaanottotarkastuksessa tai takuuajana. Käytännössä urakoitsijan törkeä laiminlyönti voi täytyä, jos urakoitsija on esimerkiksi selvästi rikkonut voimassa olleita rakennusmääräyksiä tai laiminlyönti on aiheuttanut selvän terveystarpeen. (Kaskiaro 2010)

Kuvassa 21 on havainnollistettu M&V-prosessin tehtävien aikataulua suhteessa rakennushankkeen vaiheisiin. Vihreällä värillä on kuvattu tulosten siirtyminen M&V-suunnitelmaan ja sinisellä värillä suunnitelman eri vaiheiden tulos.



Kuva 21. Hankkeen eri tehtävien tulosten siirtyminen M&V-suunnitelmaan.

### 6.1.1 M&V-suunnitelman tavoitteet

Ensimmäiseksi M&V-suunnitelmalle on asetettava yleiset tavoitteet tilaajan kanssa. Projektin motivaattoreita voivat olla esimerkiksi käyttö- ja ylläpitokustannusten vähentäminen sekä järjestelmien suorituskyvyn ja rakennuksen käytön viihtyvyyden parantaminen.

Tehtäviin sisältyvät peruskuvauksen laatiminen projektin vaiheiden menettelystä, toteutustavasta ja aikataulusta. Tilaajan rooli on ensiarvoisen tärkeä tavoitteiden ja vaatimusten määrittelyssä. Suunnitelman laatijan on ohjattava keskustelua kohti tilaajan pitkän aikavälin hyöty huomioiden. Hankkeen tavoitteet ja vaatimukset on myös dokumentoitava. Dokumentoinnissa on tärkeää kirjata M&V-suunnitelman asettamat vaatimukset suunnittelu- ja urakkasopimukseen. Suunnitelmalle on asetettava myös tavoiteltu tarkkuustaso ja arvio suunnitelman aiheuttamista kustannuksista.

### 6.1.2 Energiasimuloinnit

Energiasimulointien tarkoituksena on erilaisten suunnitteluratkaisujen arviointi energiatehokkuuden näkökulmasta. Simuloinnin laatimiseen tarvitaan rakennuksen perustiedot sekä laskentaan liittyvät muut lähtötiedot (luku 3). Suunnitteluratkaisun simulaatio perustuu eri suunnittelualojen asiantuntijoilta ja laitevalmistajilta saataviin lähtötietoihin.

Energiasimulointiin liittyy usein vaihtoehtoisten ratkaisujen arviointia energiatehokkuuden näkökulmasta. Rakennuksen energiatehokkuutta kehitetään yhteistyössä tilaajan ja eri suunnittelualojen asiantuntijoiden kanssa. Suunnitteluratkaisulla on saavutettava tavoiteltu energiatehokkuus. Energiasimuloinnin tuloksena syntyvät suunnitteluratkaisun ja perustason energiankulutuksen jakaumat, jotka kuvaavat rakennuksen energiantarvetta. Ostoenergian tarve on eroteltava tuloksissa.

Energiasimuloinnin raportti sisältää hankkeen suunnitteluratkaisun ja perustason kuvauksen, energiasimuloinnin tulokset, kuvauksen rakennuksen energiatehokkuudesta ja toteutetuista energiansäästötoimenpiteistä sekä arvion energiansäästöistä. Suunnitteluratkaisun lisäksi myös perustaso on dokumentoitava tarkasti. Erityistä huomiota on kiinnitettävä merkittävimpien oletusten ja epävarmuustekijöiden kuvaukseen.

### 6.1.3 Mittaus- ja valvontasuunnitelma

Toteutus suunnitteluvaiheessa laaditaan kohteen mittarointisuunnitelma. Suunnitelmaa lähdetään kehittämään energiasimuloinnin tietojen perusteella. Mittaroinnilla on oltava järkevä vertailutaso. Vaiheen oleellisin tehtävä on tunnistaa energiatehokkuuden kannalta kriittiset seurattavat parametrit. Kaikkia parametrejä ei ole mielekästä mitata jatkuvasti.

Mittarointisuunnitelman on sisällettävä muun muassa kuvaus mitattavista parametreistä ja mittaustavasta, mittausten ajankohdasta sekä seurantajakson toimenpiteistä (IPMVP 2003). Suunnitelmaan on myös kirjattava mittarointisuunnitelman toteuttaja. Yksityiskohtainen luettelo mittareista ja mittauksen vaatimista erityishuomioista havainnollistaa urakoitsijoille suunnitelman sisältöä, muun muassa suunniteltujen mittareiden lukumäärän ja tarvittavat kaapeloinnit. Mittausdata jatkuvista mittauksista on keskiarvoistettava energiasimuloinnissa käytetyn ajanjakson mukaisesti.

Osakulutusten mittaroinnilla saadaan tarkemmin selville, mihin energiaa kuluu ja kulutuksen ongelmatilanteiden ratkaisu nopeutuu. Tehokkuusmittausten avulla poikkeavuudet rakennuksen ja järjestelmien tarkoituksen mukaisesta toiminnasta havaitaan ja niihin voidaan puuttua nopeasti. Haasteen mittaroinnille aiheuttaa muun muassa sähkön alamittausjärjestelmä. Mittaroinnin kehittämisessä on ehdottomasti toimittava yhteistyössä tilaajan ja eri suunnittelualojen asiantuntijoiden kanssa, jotta suunniteltu mittarointi on mahdollista toteuttaa.

### 6.1.4 Laitehyväksynät

Laitehyväksyntöjen ajankohta ajoittuu pääasiassa rakentamisvaiheeseen. Laitehyväksyntöjen yhteydessä valvoja tarkistaa, että laitteet täyttävät suunnitelmassa esitetyt laitevaatimukset, joiden avulla rakennuksen tavoiteltu energiatehokkuus saavutetaan. Mahdolliset muutokset on dokumentoitava ja päivitettävä simulointeihin.

Laajoissa hankkeissa laitehyväksyntöjen apuvälineeksi tulisi laatia valvojalle luettelo, josta selviää laitteiden oleellimmat suunnitellut tehokkuusominaisuudet. Tämän avulla varmistetaan, että energiatehokkuusvaatimuksia ei sivuuteta sekä kaikki muutokset myös päivittyvät simulointeihin.

### 6.1.5 Toiminnanvarmistaminen

Hankkeen varmistusprosessi (eng. commissioning) alkaa kohteen hankesuunnitteluvaiheessa ja kestää koko rakennuksen käytön ajan. Sen tehtävänä on täydentää rakennushankkeen laadunvarmistusprosesseja. Keskeisin näkökulma toimivuuden varmistusprosessissa on eri järjestelmien integrointi toimimaan yhdessä. Rakennuksen energiatehokkuuden varmistusprosessi ja rakennushankkeen elinkaaren päävaiheet on kuvattu yksityiskohtaisemmin Rakennuksen toimivuuden varmistaminen energiatehokkuuden ja sisäilmaston kannalta (TOVA) - käsikirjassa (Pietiläinen et al 2007, 25–134).

Käytönaikaisella toiminnanvarmistamisella tarkoitetaan sisäilmaston, energiatehokkuuden ja järjestelmien jatkuvaa varmistamista. Sen avulla pyritään optimoimaan järjestelmien toiminta tunnistamalla ja muokkaamalla käyttäjien ja kiinteistöhoitajien toimintatapoja. Lisäksi huolto- ja korjaustyöt pyritään määrittämään sen avulla tarkasti ja ajoittamaan oikein. Käytönaikainen toiminnanvarmistus alkaa rakennuksen vastaanotosta ja kestää koko rakennuksen käytön ajan. Toiminnanvarmistusraportteja laaditaan kiinteistön omistajalle tavallisesti kuukausittain. Jatkuva toiminnanvarmistusta suorittaa tavallisesti kiinteistön ylläpidosta vastaava taho. M&V-suunnitelma toimii työkaluna takuuajan seurannassa ja takuuajan raportoinnissa (IPMVP 2003).

Käytönaikainen toiminnanvarmistus liittyy läheisesti M&V-suunnitelmaan, mutta M&V-prosessin raportointi on eri käsite kuin toiminnanvarmistuksen raportointi. M&V-raportointi liittyy rakennuksen ja järjestelmien suunnittelutavoitteen varmistamiseen ja teknisen toiminnan analysointiin.

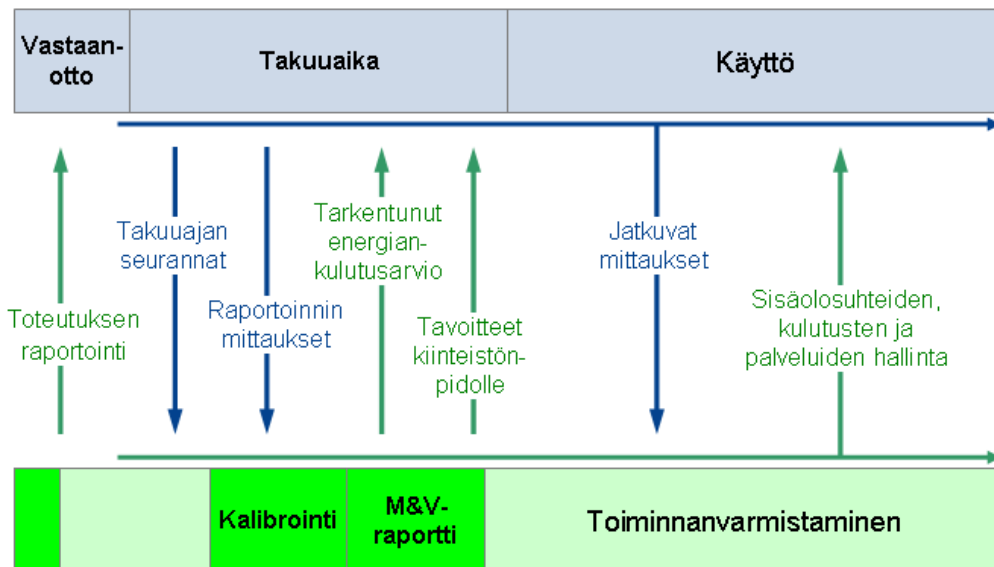
### 6.1.6 Raportointi

M&V-suunnitelman yksi oleellinen osa-alue on rakennuksen energiankulutuksen ja tehokkuuden seuranta ja raportointi. IPMVP:n mukaisesti M&V-raportoinnin on sisällettävä kuvaus merkittävimmistä eroavaisuuksista energiankulutuksessa ja – tehokkuudessa, niihin vaikuttavat asiat sekä toiminnot korjaavista toimenpiteistä. Raportissa on esitettävä myös arvio tulevan vuoden energiankulutuksesta ja – säästöistä sekä niiden perusteista. Raportoinnin formaatti sekä laadunvalvonnan prosessi on määriteltävä M&V-suunnitelmassa. (IPMVP 2003, 8-9)

Raportointiprosessi voidaan jakaa toteutuksen raportointiin sekä käytön raportointiin. Toteutuksen raportointi suoritetaan käyttöönottokatselmuksen yhteydessä. Tavoitteena on selvittää rakentamisen aikaiset muutokset simuloinnissa käytettyihin lähtötietoihin ja näiden muutosten päivittäminen energiasimulointeihin.

Käytön raportoinnin ajankohta ajoittuu luontevasti noin 12–18 kuukauden kuluttua rakennuksen käyttöönotosta. Tällöin takuuajkaan liittyvien vastuukysymysten käsittely suoraviivaistuu sekä rakennuksen ja järjestelmien käyttö on vakiintunut. Jatkovaa käytönaikaista rakennuksen toiminnanvarmistusta on syytä kuitenkin toteuttaa koko rakennuksen käyttöajanjakson.

Kuvassa 22 on havainnollistettu M&V-jakson tehtävien aikataulua. M&V-suunnitelman laatijan tehtäviin sisältyvät luontevasti toteutuksen raportointi, simulointimallin kalibrointi mittaustulosten avulla sekä M&V-jakson käytön raportointi. Jatkovasta käytönaikaisesta toiminnanvarmistamisesta voi vastata myös kiinteistön ylläpidosta vastaava yritys.

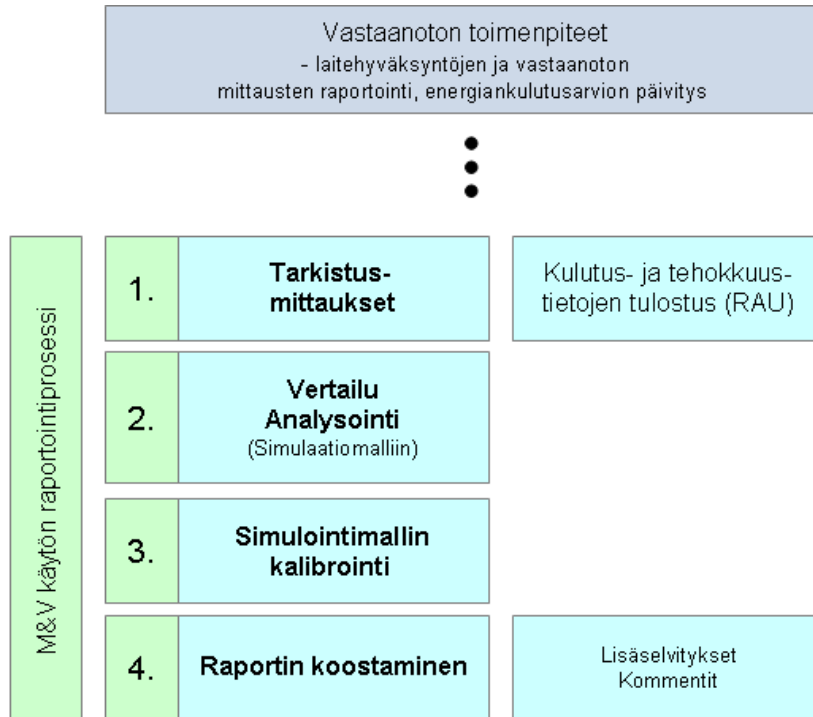


Kuva 22. Mittaus- ja valvontajakson prosessikuvaus.

Käytön raportoinnin yhteydessä suoritetaan tarkistusmittauksia, jotta varmistetaan, että laitteiden ja järjestelmien suorituskyky vastaa hankkeen vaatimuksia. Mittaustulokset dokumentoidaan ja liitetään kiinteistöautomaatiojärjestelmästä tulostettujen kulutus- ja tehokkuustietojen kanssa M&V-raporttiin. Simulointimallit kalibroidaan mitatuilla toiminnallisilla arvoilla, joita ovat esimerkiksi laitteiden todelliset käyttötilanteen hyötysuhteet sekä tarkistetut rakennuksen- ja järjestelmien käyttöajat. Tuloksena saadaan tarkentunut arvio tulevasta rakennuksen energiankulutuksesta ja säästöistä.

Simulointimallien kalibrointi on toteutettava myös merkittävien kuormamuutosten yhteydessä.

Raportti sisältää simulointimallin avulla toteutetun energiankulutusarvion ja mittaustulosten välisen tiedon analysoinnin, arvion tulevista energiansäästöistä sekä kuvauksen korjaavista toimenpiteistä. Kulutustietojen ohella tarkastellaan myös tehokkuusparametrejä. Raportointi keskittyy erityisesti rakennuksen ja järjestelmien tekniseen toimintaan. Käytön raportointiprosessi voidaan havainnollistaa kuvan 23 moduulirakenteen avulla.



Kuva 23. M&V raportointiprosessin yleiskuvaus.

Projektin tilaajan roolia ja tehtäviä ei voida unohtaa. Tilaajan tulee esittää rakentavia ja kriittisiä kommentteja, antaa palautetta sekä tarvittavat tiedot rakennuksen energiankulutuksesta ja – tehokkuudesta palveluntarjoajalle.

### 6.1.7 LEED-sertifikaatti

Jos kohteelle haetaan LEED-sertifikaatti, tulee myös M&V-suunnitelma lähettää Green Building Certification Institute – järjestölle (GBCI) arvioitavaksi. Projektille perustetaan sertifiointihakupäätöksen jälkeen projektikansio LEED Online - portaaliin. Dokumentit oheisselvityksineen ja toimintakaavioineen ladataan portaaliin vaiheittain ja projektin sertifiointiprosessia johtaa LEED-ryhmän projektipäällikkö. Arviointiprosessi jakautuu suunnitteluvaiheen (alustava ja lopullinen) ja rakentamisvaiheen pistekohtiin. Suunnitteluvaiheen pistekohtien materiaali arvioidaan alustavasti rakennuksen suunnitteluvaiheen päätyttyä. Lopullisen kohteen arvioinnin GBCI suorittaa rakentamisvaiheen päätyttyä, jolloin lähetetään rakentamisvaiheen pistekohtien materiaalin lisäksi kaikki suunnitteluvaiheen kohtiin sisältyvät muutosdokumentit. (USGBC 2009)

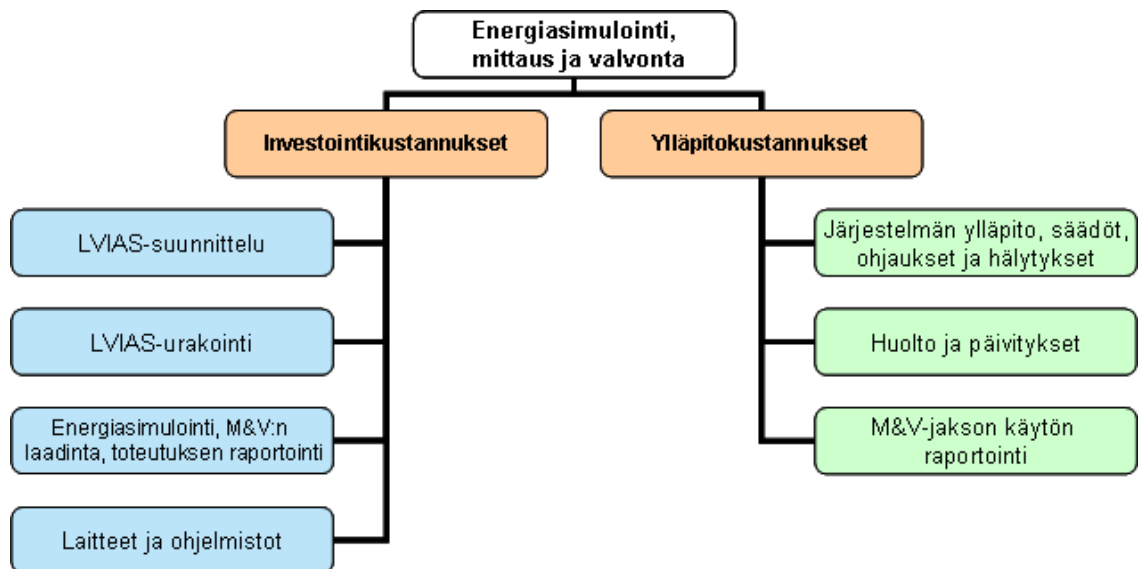
M&V-suunnitelma (EAc5) on rakentamisvaiheen pistekohta. Portaaliin ladataan kohteen M&V-suunnitelman lisäksi toimintakaaviot, joista on selvittävä 80 % energian loppukäytön mittauksiin vaadittavista mittareista. Lisäksi portaaliin kirjataan järjestelmittäin jaoteltuna rakennuksen simuloitu energiantarve, vastataan muutamaankin tarkistusluontoiseen kysymykseen sekä kirjataan kohteen M&V-suunnitelman sisältöön liittyvät erityishuomautukset. (LEED Online 2010)

## 6.2 Kustannukset

LEED Reference Guide määrittelee luvussa 2.1.1 mainitut osa-alueet, jotka vaikuttavat merkittävästi M&V-suunnitelman laajuuteen, tarkkuuteen sekä kustannuksiin (USGBC 2009). Osa-alueet painottavat mittaroinnin ja raportoinnin laajuuden vaikutusta, joka on hyvin merkittävä. Seuraavat luvun kappaleet kuvaavat M&V-prosessista tunnistettuja kustannuksia ja vaikutusmahdollisuuksia sekä havainnollistavat kustannusten jakautumista.

Kustannukset voidaan jakaa investointikustannuksiin ja ylläpitokustannuksiin. Investointikustannukset koostuvat suunnittelu- ja asennuskustannuksista sekä laite-, tarvike- ja ohjelmistohankinnoista. Lisäksi energiasimuloinnin, M&V-suunnitelman laadinnan ja toteutuksen raportoinnin työkustannukset sisältyvät investointikustannuksiin. Ylläpitokustannukset koostuvat M&V-järjestelmän ylläpidosta ja käytöstä sekä seurannasta ja raportoinnista aiheutuvista kustannuksista.

Kuvassa 24 on havainnollistettu kustannusten jakautumista. Osa laite ja ohjelmisto sekä järjestelmän ylläpito, huolto ja päivitys kustannuksista voitaisiin kutsua myös epäsuoriksi kustannuksiksi, sillä nykyaikainen uudisrakennus varustetaan tavallisesti, toteutettiin energiasimulointia ja M&V:tä tai ei, joka tapauksessa kiinteistöautomaatiojärjestelmällä.



Kuva 24. Energiasimuloinnin, mittauksen ja valvonnan kustannusten jakautuminen.

Kustannusten suuruuteen vaikuttaa oleellisesti, kuinka laaja mittarointi toteutetaan. Onko mittarointi toteutettu järjestelmätasoisena, kuinka laajoja alamittauksia käytetään, mitataanko yksittäisten laitteiden tai järjestelmien kulutusta ja tehokkuutta vai tavoitellaanko koko rakennuksen käsittävää laajaa tehokkuus-, kulutus- ja laadulliset tekijät huomioivaa mittarointia, joka on yhdistettynä laadukkaaseen kiinteistöautomaatiojärjestelmään? Kustannuksia voidaan pienentää vähentämällä jatkuvia mittauksia, mikä tarkoittaa, että suunnitelman laatija kykenee määrittämään parametrit, joiden voidaan olettaa säilyvän muuttumattomina ennalta määrätyn ajanjakson. Kyseenomaisten parametrien mittaukset suoritetaan käyttöönottotarkastuksen ja käytön raportoinnin yhteydessä sekä tietyin väliajoin.

Energialaskennasta ja –simuloinnista sekä M&V-suunnitelman laadinnasta aiheutuvat kustannukset yhdessä laitekustannusten kanssa muodostavat merkittävimmän osan kokonaiskustannuksista. Laite- ja tarvikehankinnat koostuvat pääosin mittalaitteista, kaapeleista, ohjelmistoista ja kiinteistöautomaatiojärjestelmän päätelaitteesta. Osa tarvittavista mittauksista sisältyy laitteen ominaisuuksiin, jolloin epäsuoran

kustannuksen osuus voi olla vaikeasti arvioitavissa. Energiasimuloinnin kustannuksiin vaikuttaa oleellisesti tavoiteltu simuloinnin tarkkuustaso.

Suunnittelukustannuksiin sisältyvät sähkö-, LVI- ja automaatio suunnittelijoiden mahdollisesta lisätyöstä aiheutuneet kustannukset. Jos suunnittelusopimuksissa on maininta järjestelmän toteuttamisesta, näiden kustannusten osuus rakennuttajalle on suhteellisen pieni.

Mittausjärjestelmien asennus on mahdollista sisällyttää LVIAS-urakkasopimukseen. Tällöin asiasta on mainittava urakkarajasopimuksessa. Jos mainintaa asiasta ei ole, kustannukset nousevat huomattavasti suuremmiksi. Järjestelmän asennuksesta on mahdollista tehdä myös erillinen urakkasopimus. Tämä vaihtoehto tulee kysymykseen silloin, jos kohteen ja toteutettavan järjestelmän laajuus tätä edellyttävät. Joidenkin mittausjärjestelmien asennus saattaa myös edellyttää projektin ulkopuolisen asiantuntijan käyttöä.

Rakennuksen vastaanottovaiheessa suoritetaan vastaanottotarkastus, jonka yhteydessä tehdään erilaisia LVIAS-urakkaan sisältyviä mittauksia. Jos tällöin suoritetaan M&V-suunnitelman edellyttämiä muita kuin määräysten mukaisia mittauksia, on nämä huomioitava osana energiahallinnan kustannuksia. M&V käytön raportoinnin yhteydessä suoritettavat mittaukset sisältyvät energiahallinnan kustannuksiin. Mittausten avulla simulointimallit kalibroidaan ja se on merkittävä osa raportointiprosessia. Ylläpitokustannuksiin sisältyvät myös seurannasta aiheutuvat työkustannukset, tulosten analysoinnin- ja raportoinnin kustannukset sekä huolto- ja ohjelmistopäivityskustannukset. Ylläpitokustannusten osuus kokonaisuudessaan voi olla merkittävä, mikäli energiatehokkuuteen ja kulutuksen optimointiin panostetaan ja seurantajakson ajallinen pituus on merkittävä. Keskitetyllä kiinteistönvalvonnalla voidaan saavuttaa kiinteistön toiminnanvarmistuksessa mittakaavaetuja.

### **6.3 Mallin sisältö**

Diplomityön tavoitteena oli kehittää yleinen malli M&V-suunnitelman laadintaan. Laadinnan prosessi noudattaa luvussa 6.1 esiteltyä rakennetta. Mallin sisältö toteutettiin vastaamaan LEED-sertifioitavissa projekteissa käytettävän ASHRAE-standardin lisäksi RakMk:n mukaista vertailutasoa. Se antaa paremman kuvan suomalaisille kiinteistön omistajille arvioituista energiansäästöistä.

Mallin pohjana on Word-dokumentti, johon liitetään muilla ohjelmilla laadittuja dokumentteja. Pääosin liitteet koostuvat toimistosovelluksilla laadittavista dokumenteista ja simulointiohjelmasta tulostetuista yhteenvedoista. Mallin rakenne noudattaa kuvassa 20 esitettyä moduulirakennetta:

1. Projektin hankesuunnitteluvaiheessa dokumentoidaan suunnitelman yleiskuvaus ja asetetaan asiakkaan kanssa yhteistyössä tavoitteet ja aikataulu M&V-prosessille.
2. Luonnossuunnitteluvaiheessa kohteelle laaditaan energiasimuloinnit. Rakennuksen ja järjestelmien tekniset ominaisuustiedot hankitaan pääasiassa LVIAS-suunnittelijoilta, arkkitehdiltä ja laitevalmistajilta. Hankkeen suunnittelua ohjataan kohti energiatehokkuustavoitteiden saavuttamista. Suunnittelu- ja vertailutaso dokumentoidaan M&V-suunnitelmaan. Dokumentointi sisältää suunnitteluratkaisun lähtötiedot, perustason kuvauksen ja merkittävimmät energiansäästötoimenpiteet sekä tulokset. Energiasimulointiprosessin raporttia voidaan kutsua myös energiaraportiksi.
3. Toteutussuunnitteluvaiheessa energiasimulointia päivitetään suunnittelumuutosten ja laitevalintojen johdosta. Kohteelle laaditaan mittarointisuunnitelma sekä ohjeet seurantajakson toimenpiteistä. Edellä mainitut kuvaukset liitetään dokumenttiin.

4. Rakennuksen vastaanoton yhteydessä tarkastetaan mahdolliset rakentamisen aikaiset muutokset suunnitelmiin sekä laitevalinnat. Energiasimulointi päivitetään näiden tietojen avulla ja tarkentunut energiankulutusarvio päivitetään myös M&V-suunnitelmaan.
5. M&V-jakson käytön raportointi suoritetaan noin 12–18 kuukauden kuluttua rakennuksen käyttöönotosta. Suunnitelmassa esitettyjen mittauksien ja kiinteistöautomaatiojärjestelmästä tulostettujen raporttien avulla rakennuksen tekninen toiminta analysoidaan. Tämän avulla asetetaan tavoitteet kiinteistön pidolle.

Simulointiohjelmista on mahdollista tulostaa monenlaisia yhteenvetoja. Mallin avulla M&V-suunnitelmat noudattavat yhtenevää formaattia ja suunnitelmien laadinnan prosessi tehostuu huomattavasti. Vertailutaso arvojen määrittäminen on melko merkittävä osa energiasimulointia. Mallin avulla havaitaan, mitkä toiminnalliset arvot on etsittävä ja määritettävä sekä mistä kyseenomaiset tiedot hankitaan. Jatkossa kohteiden vertailutaso määritetään perustuen ASHRAE 90.1–2007 standardiin tai RakMk:aan. Malliin lisättiin viitteitä kyseenomaisten lähteiden tavanomaisimpiin simuloinnissa käytettäviin tietoihin.



## 7 Projektikohteen M&V-suunnitelma

Diplomityössä laadittiin M&V-suunnitelma projektikohteeseen, jolle haetaan NC 2009 mukaista LEED-sertifikaattia. Luvussa kuvataan yhteenveto-omaisesti projektikohteeseen laadittu M&V-suunnitelma toteutusvaiheittain. Suunnitelma lähetetään GBCI - järjestölle arvioitavaksi rakentamisvaiheen päätyttyä keväällä 2011. Suunnitelman odotetaan täyttävän LEED-sertifikaatin vaatimukset ja näin saavuttavan LEED-pisteet. Mikäli suunnitelmassa on järjestön mielestä huomautettavaa, lähettävät he kommentit asianomaisille ja korjaavat toimenpiteet toteutetaan välittömästi.

### 7.1 Kohde kuvaus

Rakennuksen bruttopinta-ala on noin 7 500 m<sup>2</sup> ja tilavuus noin 30 000 m<sup>3</sup>. Rakennus sisältää pääosin toimistotilaa ja sitä välittömästi palvelevia tiloja. Suunnittelun tavoitteena oli rakentaa teknisesti energiatehokas ja kestävä ratkaisu. Suunnittelussa painopisteinä olivat sisäolosuhteet, mahdollisimman matala energiankulutus ja korkea energiaomavaraisuusaste. Myös tilojen muuntojoustavuus huomioitiin suunnittelussa.

Laitevalinnoissa pyrittiin ekologisuuteen valitsemalla vähän ympäristöä kuormittavia laitteita. Laitevalinnoissa huomioitiin valmistuksen ja kuljetuksen vaatimat energiat sekä niiden aiheuttamat päästöt.

Rakennuksen lämmitystehontarve tuotetaan pääosin maalämmöllä. Varalämmönlähteenä käytetään kaukolämpöä, jolla lämmitetään myös rakennuksen lämmin käyttövesi. Maalämpöjärjestelmän ideana on tuottaa rakennuksen tarvitsema lämmitysenergia ja jäähdytysenergia yhdellä ja samalla laitteistolla, joka talviaikaan ottaa lämpöä kallioon poratuista rei'istä ja kesäaikaan pumppaa ylimääräisen energian jäähdytysjärjestelmästä takaisin kallioperään. Merkittävänä perusteena maalämpöratkaisuun päätymiselle oli taloudellisen kannattavuuden lisäksi ekologinen vaikutus. Lämmitysjärjestelmät on mitoitettu matalalämpöisiksi maalämpölaitteiston hyötysuhteiden maksimoimiseksi.

Kaikki vesikalusteet ovat erityisen vettä säästäviä malleja ja hanat pääosin elektronisia. Ulinaarit ovat vedettä toimivia malleja.

Rakennuksessa on kaksi pääilmastointikonetta, jotka on varustettu pyörivillä lämmöntalteenottolaitteilla. Likaisten tilojen (WC:t yms.) poistoilma on varustettu levylämmönsiirtimellä ja siitä talteenotettu lämpö johdetaan toimistoja palvelevaan ilmanvaihtokoneeseen. Likaisten tilojen poisto huolehtii myös rakennuksen käyttöajan ulkopuolisesta ilmanvaihdosta. Toimistotiloissa ilmanvaihto toteutetaan kaksiportaisen ilmavirransäädön avulla, jotka reagoivat ilmanlaatuun. Neuvottelutiloissa ilmavirran määrää säädetään tilakohtaisesti läsnäolotunnistuksen ja hiilidioksidimittauksen/lämpötilamittauksen tai VOC-anturien avulla. Aulatiloihin ilmavaihdon määrää säädetään lämpötilaohjauksella. Käytävä- ja WC-tiloissa on vakioilmavirtajärjestelmä.

Kiinteistö varustetaan ajanmukaisella kiinteistöautomaatiojärjestelmällä. Automaatiossa on toteutettu runsaasti innovatiivisia energiansäästöön ja hyvään olosuhdehallintaan tähtääviä toimintoja. Ohjaavien ja mittaavien liityntäpisteiden määrä on kaikkiaan poikkeuksellisen suuri lähinnä johtuen jokaiseen huonetilaan ulottuvista automaatiotoiminnoista. Kohteeseen asennetaan nykyaikainen yleiskaapelointiverkko palvelemaan tiedonsiirtotarpeita.

Kohteeseen asennetaan myös merkittävä aurinkopaneelijärjestelmä. Paneeleita asennetaan pääosin katolle, mutta myös seinille. Ilmastointikoneita sekä lämmönjako- ja maalämpöpumppuja ohjataan taajuusmuuttajilla.

Valaistuksessa ekologisuus korostuu käyttämällä vähän energiaa kuluttavaa ja siten myös vähän ympäristöä kuormittavaa valaistusjärjestelmää. Valaistuksen

keskimääräinen ominaisteho on alle 12 W/m<sup>2</sup>. Valaistusta ohjataan läsnäoloon ja vakiovalonsäätöön perustuvilla antureilla. Saman anturin läsnäolo-ominaisuus ohjaa myös huoneen ilmastointia. Käytävien valaistusta ohjataan kiinteistön valvontajärjestelmällä, jolloin valaistuksen voi sytyttää tavanomaisen ajan ulkopuolella paikallisohjauspainikkeilla. Ulkovalaistus on jaettu useisiin ohjausryhmiin. Pienet aputilat on varustettu liikeilmaisimilla.

## **7.2 LEED-tavoitetaso ja M&V:n tavoitteet**

LEED-projektin tavoitteena oli ohjata hankkeen suunnittelua ja rakentamista LEED-kriteeristöön perustuen ja löytää hankkeelle järkevä tavoitetaso sekä konkretisoida tavoitetta vastaavat vaatimukset. Projektin arviointityökaluna käytettiin LEED New Construction 2009 – työkalua (USGBC 2009). Kohteessa tavoitellaan LEED-luokituksen hopeatasoa. Energiasimuloinnin suorittaminen ASHRAE 90.1–2007 - standardissa esitettyyn malliin perustuen on pakollinen vaatimus tämän kokoluokan rakennuksille luokitusarvosanan saavuttamiseksi (USGBC 2009).

M&V-suunnitelman tarkoituksena on edesauttaa rakennuksen energiatehokkuustavoitteiden toteutumista ja se toimii työkaluna rakennuksen energiankulutuksen seurannassa. Tavoitteena on varmistaa, että rakennus toimii suunnitellulla tavalla, mahdollisimman energiatehokkaasti ja järjestelmät on toteutettu suunnitelmien mukaisesti. Pöyry Building Services Oy:n tehtäviin mittaus- ja valvontasuunnitelmaan liittyen sisältyvät energiasimulointi, mittarointisuunnitelman kehittäminen, simulointimallin kalibrointi sekä M&V-raportointi.

## **7.3 Energiasimulointi**

Suunnitteluvaiheessa rakennuksen energiankulutus on laskettu RIUSKA 4.6.26 energiasimulointityökalulla. Ohjelma laskee rakennuksen energiankulutuksen dynaamisella simulointimallilla tunnin aika-askeleella koko vuodelle. Simulointi toteutettiin tilakohtaisesti. Laskennassa on huomioitu rakennuksen sisäiset ja ulkoiset lämpökuormat, jotka vaikuttavat taloteknisten järjestelmien toimintaan.

Lähtötieto-osuudessa kuvataan energiasimuloinnin kannalta oleellimmat rakennuksen ja järjestelmien lähtötiedot ja ne perustuvat suunnitelmien mukaisiin tietoihin toteutussuunnitteluvaiheessa. Simuloinnin tuloksissa on huomioitava kohteen energiantuotanto. Tämän vuoksi rakennuksen energiantarve ja ostoenergiantarve on erotettu.

### **7.3.1 Lähtötiedot**

Simulointia varten rakennuksesta muodostettiin 3D-IFC-tilamalli arkkitehdin pääpiirustusten pohjalta seuraavien perustietojen mukaisesti: Bruttoala, tilavuus, vaipan pinta-ala, ikkunoiden osuus kerrosalasta, ikkunoiden osuus ulkoseinästä, keskimääräinen vaipan U-arvo sekä keskimääräinen vuotoilmakerroin. Tilamalli muodostettiin MagiCAD Room-ohjelmistolla ja mallin muodostamisesta vastasi Pöyry Building Services Oy.

Rakennuksen pääsääntöinen käyttöaika-arvio saatiin tulevalta käyttäjältä. Ilmanvaihdon oletettiin käynnistyvän tuntia ennen ja päättyvän tunnin myöhemmin kuin rakennuksen käyttöaika. Rakennuksen simuloitu energiankulutusarvio laskettiin kohteen sijaintipaikkakunnan testivuoden säällä.

Suunnittelutapauksen simuloinnissa käytetyt rakenteiden U-arvot saatiin kohteen rakennesuunnittelijalta. Vertailutapauksen simuloinnissa käytettiin ASHRAE:n mukaisia vertailuarvoja (ASHRAE 90.1–2007, 25). Tilojen asetus- ja mitoituslämpötilat sekä ilmavirrat mitoitettiin LVI-suunnittelijalta saatujen tietojen mukaisesti. Vaipan keskimääräisenä vuotoilmalukuna käytettiin arvoa 0,04 1/h molemmissa laskentatapauksissa.

Henkilö- ja laitekuormista vapautuva lämpökuormaenergia laskettiin ohjelman oletusasetuksilla, jotka perustuvat RakMk:n mukaisiin oletusarvoihin. Laitesähkö arvioitiin ASHRAE:n mukaisesti ja se on sama molemmissa laskentatapauksissa (ASHRAE 90.1–2007).

Suunnittelutapauksessa rakennuksen lämmöntarve katetaan maalämmöllä lukuun ottamatta käyttöveden lämmitystä. Maalämmölle laskelmassa käytettiin toimittajan ilmoittamaa lämpökerrointa  $COP = 4,0$ . Kaukolämpö oletettiin saatavan verkosta ilman häviöitä. Vertailutapauksessa kaikki tuotettiin kaukolämmöllä.

Suunnittelutapauksessa rakennuksen jäähdytyksen sähkönkulutus on laskettu toimittajan ilmoittamalla kylmäkertoimella  $COP = 4,1$ . Vertailutapauksessa jäähdytysenergia tuotettiin kylmäkertoimella  $COP = 3,0$  (ASHRAE 90.1–2007).

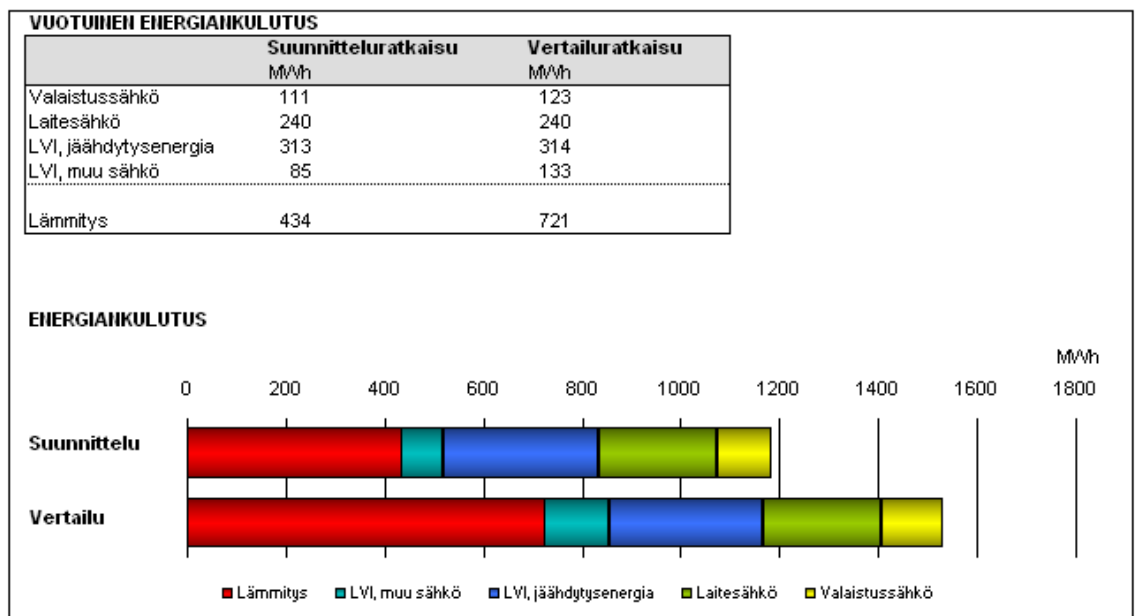
Aurinkopaneelijärjestelmän sähköntuottoarviona simuloinnissa käytettiin toimittajan ilmoittamaa arviota. Järjestelmän tekniset tiedot sisälsivät perustelut, joiden mukaisesti järjestelmän toimittaja oli arvion laskenut. Kohteen energiantuotannon vuoksi energiasimuloinnin tuloksissa rakennuksen energiantarve ja ostoenergiantarve tuli käsitellä erikseen.

Valaistuksen kokonaissähkötehon arvot saatiin sähkösuunnittelijalta. Simuloinnissa tuli huomioida myös ohjausjärjestelmien vaikutus. Ilmanvaihtokoneiden, puhaltimien ja pumppujen sähkönkulutuksen simulointi toteutettiin laitevalmistajalta saatujen teknisten tietojen mukaisesti. Vertailutasona käytettiin ASHRAE:n mukaisia ohjearvoja, joista laskennalliset arvot määritettiin luvun 3, energialaskenta ja – simulointi, yhtälöiden avulla.

Lämpimän käyttöveden kulutus arvioitiin RakMk:n mukaisen käyttötarkoituksokohtaisen ominaiskulutuksen mukaan. Vedenkulutus on hyvin todennäköisesti pienempi johtuen vesikalusteiden vesitehokkuudesta.

### 7.3.2 Tulokset

Rakennuksen energiatehokkuutta ohjattiin vertaamalla suunnitteluratkaisua energiankäytön vertailutasoon. Kuvassa 25 on esitetty energiankulutuksen arvio suunnittelu- ja vertailutapaukselle. Se kuvaa rakennuksen energiantarvetta.



Kuva 25. Simuloitu energiankulutuksen arvio suunnittelu- ja vertailutapaukselle.

Rakennuksen suunnitteluratkaisun simuloitu lämpöenergiantarve vuodessa on 287 MWh ja sähköenergian 60 MWh pienempi kuin vertailutapauksen. Teknistentilojen jäähdytysenergianterve on arvioitu olevan 192 MWh ja muiden tilojen 122 MWh. Rakennuksen arvioitu kokonaisenergiantarve on siis noin 23 % pienempi kuin vertailutapauksen.

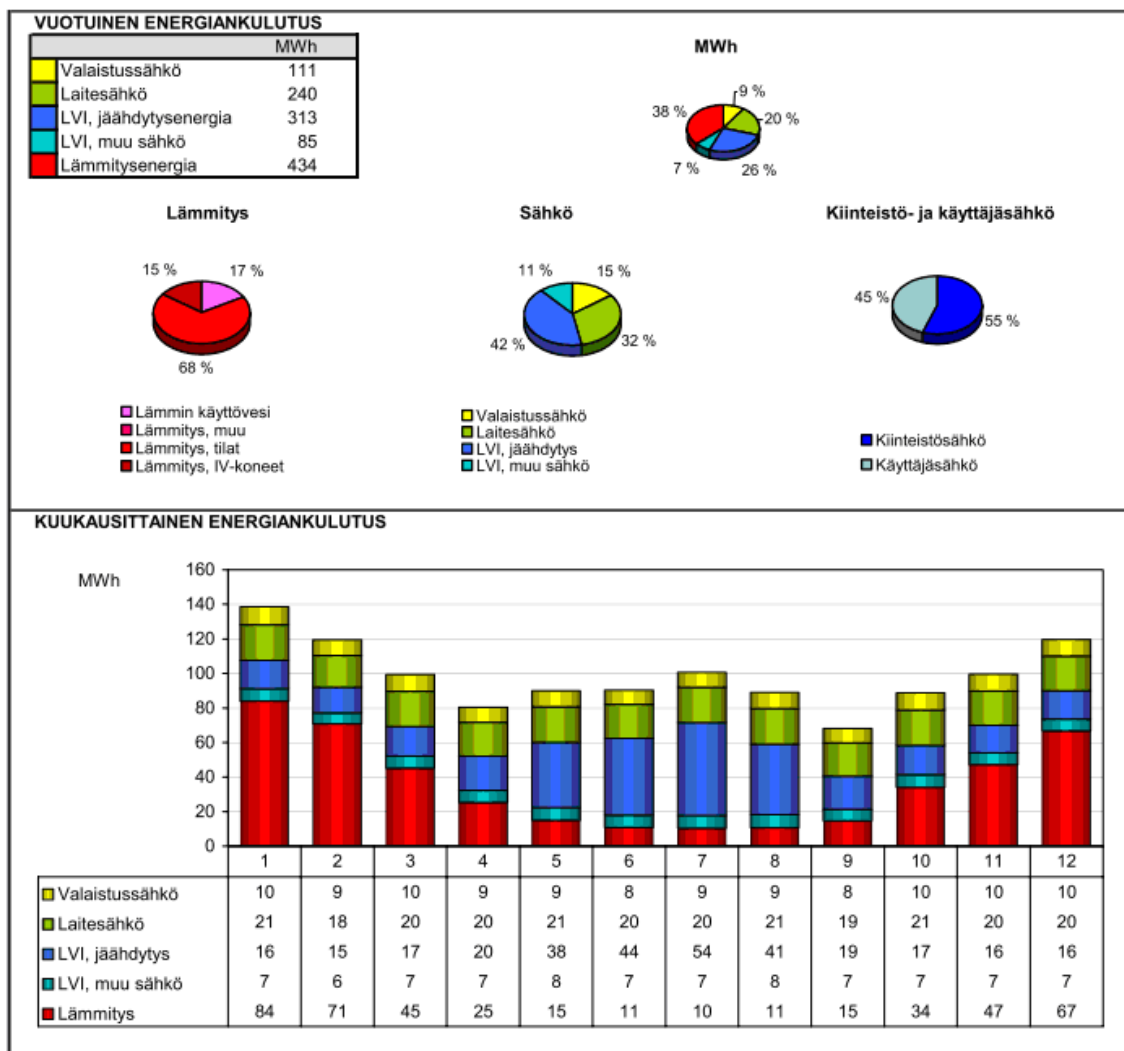
Energiantuotanto huomioiden suunnittelutapauksen lämmityksen ostoenergiantarve on 72 MWh (lämmin käyttövesi) ja sähköenergian 507 MWh. Merkittävin energiansäästötoimenpide liittyy maalämmön käyttöön. Rakennuksen lämmöntarpeesta 362 MWh tuotetaan maalämpöjärjestelmän avulla. Aurinkopaneelijärjestelmän vuotuinen sähköntuottoarvio on 95 MWh. Sähkön ostoenergiantarve määräytyy siis valaistuksen, laitesähkön ja LVI, muu sähkön summana, johon lisätään jäähdytys- ja lämmitysenergian tuottamiseen kuluva sähköenergia sekä vähennetään aurinkopaneelijärjestelmän vuosittainen sähköntuottoarvio. Vertailutapauksessa kaikki lämpöenergia tuotetaan kaukolämmöllä ja jäähdytyksen COP = 3,0.

Vuosittainen energiansäästö vertailutapaukseen nähden on lämpöenergian osalta 649 MWh ja sähköenergian osalta 94 MWh. Jos lämpöenergian kokonaishintana käytetään 50 €/MWh ja sähköenergian 80 €/MWh, vuosittainen euromääräinen energiansäästö on tällöin 40 000 €

Rakennuksen ilmapitävyydellä on myös suuri merkitys energiankulutukseen. Suunnittelussa keskimääräisen ilmapitävyydysluvun tavoitteeksi asetettiin arvo  $n_{50} = 1,0$  (0,04 1/h). Hyvän ilmapitävyyden saavuttaminen edellyttää, että saumojen ilmapitävyyteen on kiinnitetty erityistä huomiota sekä suunnittelussa että rakennustyön valvonnassa. Rakennuksen vastaanottovaiheessa ilmatiiviyys tulee osoittaa mittaamalla.

Valaistuksen ohjauksissa on pyritty energiatehokkuuteen. Toimistohuoneet on varustettu läsnäolo- ja vakiovalonsäätöohjauksella. Toimisto- ja neuvottelutilat on varustettu hiilidioksidi- ja VOC-antureilla. Ilmavirtaa ohjataan kuormituksen mukaan ilmanlaatuun perustuen. Ilmastointikojeille rakennetaan pyörivän lämmönsiirrinlaitteen käyttöönperustuva lämmöntalteenotto poistoilmasta tuloilmaan. Likaisten tilojen poisto varustetaan levylämmönsiirtimillä. Myös ATK-konesalin yllilämpö otetaan talteen. Ikkunan U-arvoksi on suunnitelmissa kirjattu arvo 0,86 W/m<sup>2</sup>,K. Vertailutapauksessa on käytetty ASHRAE 90.1 -2007 mukaista U-arvoa 1,99W/m<sup>2</sup>,K. Nykyiset rakentamismääräykset edellyttävät arvoa 1,0 W/m<sup>2</sup>,K.

Kuvassa 26 on esitetty arvio rakennuksen energiankulutuksesta sektoreittain ja energiankulutuksen kuukausittainen jakauma.



Kuva 26. Arvio rakennuksen energiankulutuksesta ja energiankulutuksen jakauma.

Rakennukseen tehdään myöhemmin käyttöönottokatselmus, jonka yhteydessä selvitetään poikkeamat M&V-suunnitelmassa esitettyihin lähtötietoihin. Nykyistä energiasimulointimallia päivitetään näiden lähtötietomuutosten osalta käyttöönottokatselmuksen yhteydessä. Tuloksena saadaan uusi tarkentunut arvio rakennuksen energiankulutuksesta.

M&V-suunnitelmaan kirjattiin tavoiteltu kalibroinnin maksimipoikkeama 10 %. Arvo perustuu kokemuseräiseen arvioon. Virhemarginaalia voidaan pienentää käyttämällä enemmän voimavaroja mallin kalibrointiin. Tarkempi poikkeaman arviointi olisi mahdollista toteuttaa laskennallisesti siihen soveltuvilla algoritmeilla.

## 7.4 Mittarointi

LEED NC 2009 - hankkeessa käytetään säästöjen määrittämisessä IPMVP mukaista vaihtoehtoa 2, jossa rakennuksen kalibroitu perustason energiankulutusta verrataan mitattuun kulutukseen (USGBC 2009; IPMVP 2003). Rakennuksen energiankulutusta seurataan kiinteistöautomaatiojärjestelmään liitettyjen mittareiden avulla. Energiankulutuksen lisäksi mitataan myös toiminnallisia arvoja, jotka vaikuttavat energiankulutukseen. Mittaukset jaettiin vastaanoton yhteydessä tehtäviin mittauksiin, kulutuksen aktiivisiin- ja tehokkuuden jatkuviin mittauksiin. Vastaanoton mittauksista osa suoritetaan myös käytön raportoinnin yhteydessä.

Vastaanoton yhteydessä tehtävät mittaukset toteutetaan kertamittauksina ja niiden tarkoituksena on todentaa asennettujen järjestelmien toteutuksen suunnitelmien mukaisuus. Mittaukset suorittaa urakoitsija ja niiden oikeudenmukaisuudesta vastaa valvoja. Taulukossa 4 on esitetty yhteenveto vastaanoton mittauksista.

Taulukko 4. Yhteenveto vastaanotossa tehtävistä mittauksista.

Järjestelmien käyttöajat	Käyttöaikaisten tarkistaminen ja dokumentointi	
Ilmanvaihdon SFP	Mitataan konekohtaisesti sisältäen taajuusmuuttajan	konekohtaisesti mitoitustilanteen (puhtaat suodattimet) SFP-luku
Konekohtaiset ilmapääreit	Mitataan konekohtaiset tulo- ja poistoilmamäärät	
Ilmavuodot	Vuotoilmakerroin mitataan vastaanoton yhteydessä hyödyntäen rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmää (paineeromittaus), Lämpökamerakuvaus.	Rakennuksen vuotoilmakerroin, kertamittaus ainoastaan vastaanotossa
Valaistus	Vaadittavien valaistusolosuhteiden ja valaistusjärjestelmän tarkoituksenmukaisen toiminnan tarkistaminen. Perustuvat esim. subjektiivisiin havaintoihin, valaistusvoimakkuuksien ja luminanssien mittauksiin, ohjausjärjestelmän toimintakokeisiin yms.	
Vesikalusteet	Mitataan merkittävimpien vesikalusteiden vesivirtaumat	
Sisäilmanlaatu	Mitataan huoneiden äänitaso, ilman kosteus ja nopeus sekä painesuhteet sisäilmastoluokan mukaisesti	kertamittaus ainoastaan vastaanotossa, mittaustilat kirjattava kiinteistöautomaatioon

Mittaukset suoritetaan myös M&V:n käytön raportoinnin yhteydessä lukuun ottamatta ilmavuoto ja sisäilmanlaatumittauksia. Tällöin mittauksen suorittamisesta vastaa raportoiija osapuoli.

Kohteeseen asennetaan lämmityksen-, jäähdytyksen- ja sähköenergian aktiiviset kulutusmittaukset. Mittareiden tulee olla jatkuva luettavia ja mittaustuloksien on siirryttävä automaattisesti kiinteistöautomaatiojärjestelmään tai vastaavaan energiankäytön tietojen keruujärjestelmään. Mittausdatan on tallennuttava kiinteistöautomaatiojärjestelmään tuntitasoisena informaationa. Taulukossa 5 on yhteenveto kulutuksen aktiivisista mittauksista.

Taulukko 5. Yhteenveto kulutuksen aktiivisista mittauksista.

Lämmönkulutus/-tuotanto	Kaukolämmön kokonaiskulutusmittaus Maalämmön kokonaistuotantomittaus	kWh, jatkuva mittaus, kiinteistöautomaatioon
Kiinteistösähkön mittarit	Sähkönkulutuksen kokonaismittaus Jäähdytyksen järjestelmäkohtainen alamittaus (sisältäen kompressorit, pumput ja lauhduttimet) Ilmanvaihdon konekohtainen alamittaus Maalämmön järjestelmäkohtainen sähkönkulutuksen alamittaus Valaistuksen alamittaus	kWh, jatkuva mittaus, kiinteistöautomaatioon
Käyttäjäsähkön mittarit	Ryhmäkeskusalueittain ATK-konesalin laitteet	kWh, jatkuva mittaus, kiinteistöautomaatioon
Vedenkulutus	Veden kokonaiskulutus Lämpimän käyttöveden kulutus Keittiön veden kulutus	m <sup>3</sup> , jatkuva mittaus, kiinteistöautomaatioon

Tehokkuuden jatkuvien mittauksen tavoitteena on varmistaa järjestelmien toiminnan tavoitteiden mukaisuus ja havaita mahdolliset vikatilanteet käytönaikana. Hyötysuhteiden mittaukset perustuvat energiankäytön mittauksiin sekä järjestelmästä riippuvien muiden toiminnallisten tunnuslukujen mittauksiin. Taulukossa 6 on esitetty yhteenveto tehokkuuden jatkuvista mittauksista.

Taulukko 6. Yhteenveto tehokkuuden jatkuvista mittauksista.

	Mitattavat suureet	Seurattava tunnusluku
Tavoitteen mukaiset sisälämpötilat	Kaikista merkittävistä tilaryhmistä mitataan sisälämpötilaa poistoilmakanavasta.	Sisälämpötilat
Ilmanvaihdon LTO	Ilmanvaihtokonekohtaisesti mitataan poistoilman (huoneilma), jäteilman ja ulkoilman lämpötilat	Konekohtainen LTO lämpötilahyötysuhde (tuloilman)
Jäähdytyksen tehokkuus	Järjestelmäkohtaisesti mitataan sähköteho (sisältäen kompressorit, pumput, lauhdutin) kW sekä jäähdytysenergian tuotto kW (meno- ja paluuveden lämpötilat ja virtausmittari).	Jäähdytyksen järjestelmäkohtainen COP
Maalämpöjärjestelmän tehokkuus	Mitataan niiden tuottama lämpöteho kW (lämpötilaero, virtausmittari) ja kuluttama sähköteho kW	Maalämpöjärjestelmän COP
Aurinkopaneelijärjestelmän hyötysuhde	Mitataan säteilyn- (pyranometri) ja tuotetun sähköenergian määrä	Järjestelmän hyötysuhde
Valaistus	Seurataan merkittävimpien (määrittely) valaistusryhmien päälläolotietoa	Seurataan käyttöaikaa, tunnusluku h/pvä
Ilmanvaihto	Seurataan ilmanvaihdon päälläolotietoa	Seurataan käyttöaikaa, tunnusluku h/pvä
Astepäiväluku S17	Lasketaan yhteen kunkin kuukauden vuorokautisten sisä- ja ulkolämpötilojen erotus. Keskimääräinen vuorokautinen ulkolämpötila mitataan ja sisälämpötilaksi oletetaan +17°C. Laskennassa ei huomioida päiviä, joiden keskilämpötila on keväällä yli +10°C ja syksyllä yli +12°C.	Astepäiväluku

Mittalaitteiden toiminta on tarkastettava ja tarpeen vaatiessa kalibroitava ennen niiden asentamista kohteeseen sekä lisäksi laitteen valmistajan ilmoittamin väliajoin. Seurantajakson aikana mittalaitteiden virhemarginaali voidaan olettaa tämän vuoksi olevan merkityksättömän pieni suhteessa simulointimallin kalibroinnissa aiheutuvaan poikkeamaan. Kohteen M&V-suunnitelmaan liitettiin mittaroinnin yleiskuvauksen lisäksi tarkempi luettelo, josta selvisi muun muassa alamittausten mittaritunnus, mittarin sijainti sekä mittauksen erityishuomiot.

## 7.5 Mittaus- ja valvontajakson toimenpiteet

Vastaanoton yhteydessä tarkistetaan mahdolliset rakentamisen aikaiset muutokset energiasimuloinnissa käytettyihin lähtötietoihin. Muutokset dokumentoidaan ja päivitetään simulointeihin.

Vähintään kuukausittain kiinteistön ylläpidosta/toiminnanvarmistuksesta vastaavan osapuolen tulisi tarkastaa kiinteistöautomaatiojärjestelmästä energiankulutuksen ja – tehokkuuden sekä olosuhteiden tarkoituksenmukaisuus. Mittausarvojen välittömään läheisyyteen tulisi sijoittaa vertailuarvot, jotta poikkeavuuksien havaitseminen tehostuisi. Asetusarvona lämmönkulutusvertailussa käytetään testivuoden sään lämmitystarveluvuilla normalisoitua kulutusarviota. Mittausarvo vastaavasti normalisoidaan mitatulla lämmitystarveluvulla. Edellä mainitut toimenpiteet kuvaavat rakennuksen jatkuvaa toiminnanvarmistusta.

M&V-suunnitelmaan liittyvä seurantaraportti koostetaan 12–18 kuukauden kuluttua rakennuksen käyttöönotosta. Tällöin suoritetaan taulukossa 4 mainitut raportoinnin yhteydessä suoritettavat mittaukset. Mittaustulokset sisältäen kiinteistöautomaatiojärjestelmästä tulostetut kulutus- ja tehokkuusmittaukset sekä vertailutulokset liitetään raporttiin. Raportti on Word-dokumentti, joka liitetään M&V-suunnitelmaan. Raportti tulee sisältämään kuvauksen merkittävimmistä eroavaisuuksista energiankulutuksessa ja – tehokkuudessa, niihin vaikuttavista asioista sekä toiminnot korjaavista toimenpiteistä. Arvio tulevan vuoden energiankulutuksesta ja – kustannuksista toteutetaan simulointimallin uudelleen kalibroinnin avulla. Energian hinta tarkastetaan kustannusarviota tehtäessä paikalliselta energiayhtiöltä.

Puuttuvista mittatiedoista huomautetaan raportoinnin yhteydessä ja tämä tieto saatetaan myös kiinteistön ylläpidosta vastaavan henkilöstön tietoon. Mahdollisten puuttuvien mittatietojen täydennyksessä käytetään apuna edellisiä ja tapahtuman jälkeisiä kiinteistöautomaatiojärjestelmästä saatavilla olevia mittausarvoja, joiden avulla puuttuva mittausajanjakso ekstrapoloidaan.

## 8 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli kehittää malli M&V-suunnitelman laadintaan uudisrakennuksille. Työssä esiteltiin katsaus M&V-suunnitelmaan liittyvään kirjallisuuteen sekä energiasimuloinnin, mittauksen ja seurannan menetelmiin. Näiden perusteella kehitettiin M&V-prosessi, jonka avulla suunnitelma laaditaan.

Kun rakennushankkeen konkreettiset energiatehokkuustavoitteet asetetaan hankesuunnitteluvaiheessa, vaikutusmahdollisuudet erityisesti järjestelmäratkaisuihin ovat merkittävät. Energiasimulointi luonnossuunnitteluvaiheessa havainnoi järjestelmä- ja laiteratkaisujen vaikutuksia energiankulutukseen ja motivoi konkreettisten tulosten avulla suunnitteluorganisaatiota. Toteutussuunnitteluvaiheessa simulointi päivitetään suunnittelumuutosten ja laitevalintojen johdosta. Rakentamisvaiheessa laitehankintojen yhteydessä on käytettävä hyväksi suunniteltujen laitteiden ja järjestelmien energiatehokkuustietoja, joiden avulla suunniteltu energiatehokkuus saavutetaan. Toteutussuunnitteluvaiheessa laaditaan myös kohteen mittarointisuunnitelma sekä ohjeet seurantajakson toimenpiteistä. Mittarointisuunnitelman kehityksen lähtökohtana ovat energiasimuloinnin tiedot, sillä mittaroinnilla on oltava järkevä vertailutaso. Oleellisinta on tunnistaa energiatehokkuuden kannalta merkittävimmät seurattavat parametrit.

Käyttöönottovaiheessa järjestelmien käyttöönottoon liittyvät toimenpiteet korostuvat. Rakennuksen käytön aikana järjestelmien toimintaa seurataan kiinteistöautomaatiojärjestelmän avulla, jolloin poikkeavuudet tarkoituksenmukaisesta toiminnasta ja käytöstä havaitaan sekä vikatilanteet paikallistetaan nopeasti. M&V-jaksolla rakennuksen tekninen toiminta analysoidaan ja raportoidaan tilaajalle. Tämän avulla asetetaan tavoitteet kiinteistönpidolle.

M&V-suunnitelman laadintaan toteutetun yleisen mallin avulla suunnitelmat noudattavat yhtenevää formaattia ja suunnitelmien laadinta tehostuu. LEED-projekteissa käytettävän ASHRAE-standardin ohella malli toteutettiin vastaamaan myös RakMk:n minimivaatimuksia. Näiden avulla toteutettu vertailutason energiasimulaatio antaa paremman kuvan suomalaisille kiinteistön omistajille rakennuksen energiatehokkuudesta.

Projektikohteen M&V-suunnitelma on lähetetty arvioitavaksi GBCI:lle ja sen odotetaan täyttävän vaatimukset ja saavuttavan LEED-pisteet. Arviointitulokset saadaan rakentamisvaiheen päätyttyä keväällä 2011. Kaikki mittarointisuunnitelmassa esitetyt mittarit myös toteutetaan projektikohteeseen. Hankkeen mahdolliset rakentamisen aikaiset muutokset päivitetään M&V-suunnitelmaan rakennusvaiheen päätyttyä. Seuraavat merkittävät vaiheet projektikohteen osalta ovat vastaanottotarkastus ja M&V-jakso. Tällöin on odotettavissa ensimmäiset kohteen energiankulutuksen mittaustulokset, joiden avulla energiasimuloinnin ja hallinnan prosessia voidaan jatkokehittää.

Kiinteistöjen omistajille merkittävin hyöty M&V-prosessista on kokonaiskustannusten aleneminen. Investointikustannuksia hieman korottamalla voidaan ylläpitokustannuksissa säästää merkittävästi. Myös maine energiatehokkaana, ympäristöystävällisenä ja vastuullisena omistajana korostuu. Käyttäjille merkittävimmät hyödyt ovat käyttökustannusten aleneminen sekä olosuhteiden optimointi. Takuuajan ja käytön aikaisella seurannalla puutteet rakennuksen ja järjestelmien toiminnassa havaitaan ajoissa ja niihin voidaan puuttua nopeasti. Suunnittelijoiden asiantuntemus ja innovaatiokyky korostuvat. Rakennuttajien vastuulla oleva valvonta tehostuu ja kiinteistön omistajien energiatehokkuustarpeiden määrittäminen ja toteutus konkretisoituvat. Mittaroinnin toteuttamisella on urakoitsijoihin työllistävä vaikutus. Energiakonsulteille M&V-prosessi ja energiatehokkaampi rakentaminen avaavat paljon uusia mahdollisuuksia. Viime aikoina rakennusalalla on keskusteltu vastuunalaisesta erillisestä energiatehokkuussuunnittelijan nimeämisestä kaikkiin merkittäviin rakennushankkeisiin.



Kotimaisissa rakennushankkeissa vaihtoehtoisesti käytettävän RakMk:n ongelmana ovat energiansäästöodotukset. Vaatimukset ovat osittain melko vaatimattomat ja tämän vuoksi simuloinnin tulokset eivät välttämättä kuvaa hyvin todellisia energiansäästöodotuksia. RakMk:a parempi vaihtoehto olisi toteuttaa vertailutason simulointi perustuen ”business-as-usual” -ratkaisuun. Kyseenomaisen ratkaisun yksityiskohtainen määrittely vaatii laajan tutkimuksen, mutta tällöin energiatehokkuusominaisuudet korostuisivat entisestään hankkeen suunnitteluvaiheessa ja se edistäisi elinkaarikustannusajattelua.

M&V-suunnitelma voidaan laatia myös peruskorjauskohteeseen. Tällöin energiankulutuksen perustaso määritetään mittauksilla. Mittarointisuunnitelman merkittävyys korostuu, sillä vanhoissa rakennuksissa ei välttämättä ole huomioitu sähkölaitteiden ryhmittely keskuksissa järjestelmäkohtaisen kulutusinformaation selvittämiseksi. Haasteen asettaa nykyisen energiankulutuksen jakauman selvittäminen kustannustehokkaasti ja mielekkäällä tarkkuudella. Energiasimulointien avulla selvitetään investointien kannattavuus. Peruskorjaushankkeissa ESCO-toimintatapa on merkittävä toteutusvaihtoehto.

M&V-suunnitelma on työkalu rakennuksen energiatehokkuuden kehittämiseen ja varmistamiseen suunnittelu- ja rakentamisvaiheessa sekä käytön aikana. M&V-suunnitelman avulla varmistetaan rakennushankkeen järjestelmällinen energiatehokkuusprosessi. Energiatehokkuustavoitteet voidaan saavuttaa kokonaiskustannuksista kuitenkin tinkimättä.

Energiatehokkuuden kehittäminen on ajankohtainen aihe rakennusalalla. Energiatehokkaiden ratkaisujen lisäksi energiatehokkuusprosesseja on kehitettävä. M&V-prosessi on herättänyt lisääntyvää mielenkiintoa tilaajien, rakennuttajien ja muiden toimijoiden keskuudessa. Näköpiirissä on, että M&V-suunnitelmia tullaan laatimaan myös muihin uudiskohteisiin.

## Lähdeluettelo

Aalto yliopiston teknillinen korkeakoulu. S-118.2101 Valaistustekniikka ja sähköturvallisuus – kurssin opetusmateriaali. Laboratoriotyön teoriamateriaali. 2010. 17 s.

ASHRAE 90.1-2007. 2007. The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta. ASHRAE standard: Energy standard for buildings except low-rise residential buildings. SI Edition. 189 s. ISSN 1041-2336.

BRE Global Ltd. 2008. Breeam BRE Environmental & Sustainability Standard – BREEAM Offices 2008 Assessor Manual. BES 5055: ISSUE 1.0. 346 s.

Energy Savings Performance Contract (ESPC) Procedures and Methods. 1995. Federal Energy Management and Planning Programs. Department of energy (DOE), Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Julkaistu 10.4.1995. RIN 1904-AA62. Säännöt liittyvät olemassa olevien rakennusten suorituskykyphjaisiin sopimusehtoihin. Viitattu 14.5.2010.  
[http://www1.eere.energy.gov/femp/financing/superespcs\\_espcrule.html](http://www1.eere.energy.gov/femp/financing/superespcs_espcrule.html)

Euroopan Yhteisö. 2009. EU:n uusiutuvan energian direktiivi 2009/28/EY. 23.4.2009. 47 s. Direktiivi uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä.

Heimonen, Himanen, Junnonen, Koski, Kurnitski, Mikkonen, Ryyänen & Vuolle. 2007. Kunnallinen ESCO-menettely. Motiva Oy. 69 s. Viitattu 12.8.2010. [www.motiva.fi](http://www.motiva.fi)

Helsingin Energia. 2010. Helsinkiä kaukojäähdytetään jo 100 megawatin teholla. Internet sivujen tiedotus. Viitattu 20.7.2010. [www.helen.fi/tiedotteet](http://www.helen.fi/tiedotteet)

Hopper, Goldman, Gilligan, Singer, Birr. 2007. A Survey of the U.S. ESCO Industry: Market Growth and Development from 2000 to 2006. Berkeley. United States Government. 38 s.

IPMVP New Construction Subcommittee. 2003. International Performance Measurement and Verification Protocol: Concepts and Options for Determining Energy Savings in New Construction. Volume III. 42 s.

IPMVP Committee. 2002. International Performance Measurement and Verification Protocol: Concepts and Options for Determining Energy and Water Savings. Volume I. 93 s. DOE/GO-102002-1554.

Kaskiaro, Laine, Oksanen. 2010. Rakennusurakan yleiset sopimusehdot YSE 1998. Helsinki. Helsingin Kamari Oy. 316 s. ISBN 978-952-246-015-8.

KOM (2007) 1. Euroopan yhteisöjen komissio. Komission tiedonanto Eurooppa-neuvostolle ja Euroopan parlamentille. Energiapolitiikka Euroopalle. Bryssel. 10.1.2007.

KOM (2008) 780. Euroopan yhteisöjen komissio. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi rakennusten energiatehokkuudesta. Bryssel. 13.11.2008.

LEED Online. 2010. United States Green Building Council. Portaali LEED-sertifiointiprosessin hallintaan. Viitattu 11.8.2010. [www.leedonline.com](http://www.leedonline.com)

LVI-talotekniikkateollisuus Ry. 2009. SFP-opas – Opas ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähkötehon määrittämiseen, laskentaan ja mittaamiseen. 3. Painos. 25 s.

- LVI 01-10450. 2009. Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje. Rakennustietosäätiö RTS. 24 s.
- LVI 05-10440. 2008. Sisäilmastoluokitus. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Rakennustietosäätiö RTS. 22 s.
- LVI 34-10442. 2009. Kiinteistöjen kaukojäähdytys. Rakennustietosäätiö RTS. LVI-ohjekortti on tehty yhteistyössä Helsingin Energian kanssa. 10 s.
- Motiva Oy. 2007. ESCO-opas – Energiapalveluja kunnille ja muille yhteisöille. Helsinki. 19 s. Viitattu 2.8.2010. [www.motiva.fi](http://www.motiva.fi)
- M&V Guidelines: Measurement and Verification for Federal Energy Projects, Version 3.0. 2008. U.S Department of Federal Energy Management Program. 306 s. Viitattu 4.5.2010. [www1.eere.energy.gov/femp](http://www1.eere.energy.gov/femp)
- Nuutila Matti. 2008. Kaukolämpöyhtiöiden ja lämpöyrittäjien yhteistyömahdollisuudet. Energiateollisuus Ry. Viitattu 12.8.2010. <http://www.motiva.fi/files/709/energiateollisuus-kunnat-ja-alueelampo.pdf>
- Pakanen Jouko. 2008. S-118.3280 Sähköisten taloteknisten järjestelmien suunnittelu – kurssin opetusmateriaali. Aalto yliopiston teknillinen korkeakoulu.
- Pekkarinen Mauri. 2010. Kohti vähäpäästöistä suomea – uusiutuvan energian velvoitepaketti. 20.4.2010. Viitattu 3.7.2010. [www.tem.fi](http://www.tem.fi).
- Pietiläinen, Kauppinen, Kovanen, Nykänen, Nyman, Paiho, Peltonen, Pihala, Kalema & Keränen. 2007. Tova-käsikirja – Rakennuksen toimivuuden varmistaminen energiatehokkuuden ja sisäilmaston kannalta. Espoo. VTT. 235 s. ISBN 978-951-38-6970-0.
- Pihala Hannu. 2002. PQ-NIALM -sähkönmittaustekniikka - rakennusten sähkön laadun ja loppukäyttölaitteiden yhteismittaus. Tesla-raportti 81/2002. VTT. Espoo. 42 s.
- Rakentamismääräyskokoelma D2. Ympäristöministeriö. Rakennetun ympäristön osasto. 2008. 38 s. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto – määräykset ja ohjeet 2010. Ympäristöministeriön asetus rakennusten sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta.
- Rakentamismääräyskokoelma D5. Ympäristöministeriö. Asunto- ja rakennusosasto. 2007. 14 s. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta – ohjeet 2007. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskennasta.
- Rakentamismääräyskokoelma D3. Ympäristöministeriö. Rakennetun ympäristön osasto. 2008. 72 s. Rakennusten energiatehokkuus – määräykset ja ohjeet 2010. Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta.
- RAU-info. 2010. Pöyry Building Services Oy:n kehittämä toiminnanvarmistuspalvelu. Viitattu 22.8.2010. [www.rauinfo.fi](http://www.rauinfo.fi)
- RIUSKA 4.6.26. Insinööritoimisto Olof Granlund Oy. Olosuhde- ja energiasimulointiohjelmisto. Perustuu Lawrence Berkeley National Laboratory kehittämään DOE 2.1E – simulointiohjelmaan.
- RT 50-10755. 2001. Maalämmitys. Rakennustietosäätiö RTS. 4 s.
- RT 56-10592. 1996. Huonetilojen jäähdytysjärjestelmät liike- ja toimistorakennuksissa. Rakennustietosäätiö TRS. 8 s.

Satchwell, Goldman, Larsen, Gilligan, Singer. 2010. A Survey of the U.S. ESCO Industry: Market Growth and Development from 2008 to 2010. Berkeley. United States Government. 31 s.

SFS-EN 14511. 2008. Lämmitykseen ja jäähdytykseen tarkoitettut, sähkökäyttöisellä kompressorilla toimivat huoneilmastointikoneet, nestejäähdyttimet ja lämpöpumput. Osat 1-4. 106 s.

SFS-EN 13829. 2001. Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method (ISO 9972:1996, modified). 24 s.

SFS-EN 50160. 2008. Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet. 38 s.

SFS 5511. 1989. Ilmastointi. Rakennusten sisäilmasto. Lämpöolojen kenttämittaukset. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto. 16 s.

ST 98.50. 2010. Energiatehokkuusvaatimusten huomioiminen rakennusten sähkö- ja teleteknisten järjestelmien käytössä ja kunnossapidossa. Espoo. Sähköinfo Oy. 20 s.

ST 51.14. 2008. Jakelukiskojärjestelmät. Espoo. Sähköinfo Oy. 4 s.

Stenman Marko. 2010. Toimistorakennusten sähkösuunnittelu LEED-ympäristöluokituksen kannalta. Diplomityö. Aalto yliopiston teknillinen korkeakoulu. Espoo. 59 s.

U.S Green Building Council (USGBC). 2009. LEED Reference Guide for Green Building Design and Construction. 2009 Edition. 674 s. ISBN 978-1-932444-14-8

U.S Department of Energy. Energy efficiency and renewable energy. Federal Energy Management Program. 2004. Introduction to Energy Savings Performance Contracting (ESPC) and DOE Super ESPC's. FEMP half-day M&V training Course. USA, Miami. 13-14.1.2004. Osat 1-5. Viitattu 22.4.2010. <http://mnv.lbl.gov/training>

Valtiovarainministeriön asetus rakennusten jälleenhankinta-arvon perusteista. Helsinki. 29.12.2009

Vehviläinen, Halonen, Hiltunen, Kjellman, Kumpulainen, Pursula, Vanhanen. 2009. Energiatehokkuus kansainvälisesti. Sitran raportteja 83. Helsinki. Sitra. 189 s. ISBN 978-951-563-662-1.

Viitanen, Puolakka, Halonen. 2010. LED-valaistus pienjännitteisellä aurinkosähköllä. Plaani. 3/2010. 30–31. ISSN 1457-0246.

Ympäristöministeriö. 2007. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatodistuksesta. 43 s. Helsinki. 19.6.2007. Asetus tullut voimaan 1.1.2008.

Ympäristöministeriö. 2009. Energiatodistusopas 2007: Rakennuksen energiatodistus ja energiatehokkuusluvun määrittäminen. 147 s.

Ympäristöministeriön moniste 122. 2003. Ympäristöministeriö. Asunto ja rakennusosasto. Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto lämpöhäviöiden tasauslaskennassa. Helsinki. 35 s. Moniste täydentää Ympäristöministeriön vuonna 2003 julkaisemaa opasta ”lämmöneristysmääräysten 2003 täyttäminen – Lämpöhäviöiden tasaus ja U-arvon laskenta.” Oppaassa ei anneta tarkempia ohjeita ilmanvaihdon lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen laskennalliseen erillisselvitykseen.

Ympäristöministeriön raportti 22/2009. Ympäristöministeriö. Rakennetun ympäristön osasto. Helsinki. Rakennusten kiinteistöveron porrastaminen energiatehokkuuden ja lämmitystavan perusteella. 40 s. ISBN 978-952-11-3567-5.