



Karelia-ammattikorkeakoulu
Talotekniikan insinööri (AMK)

Wärtsilä-kampuksen C-siiven energiatehokkaat ratkaisut

Rony Korno

Opinnäytetyö, Toukokuu 2023

www.karelia.fi



OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2023
Talotekniikan koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600

Tekijä(t)
Rony Korno

Nimeke
Wärtsilä-kampuksen C-siiven energiatehokkaat ratkaisut
Toimeksiantaja
Digital Twin -hanke

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli miettiä Wärtsilä-kampuksen C-siipeen ratkaisuja, jotka edistävät energiatehokkuutta ja viihtyvyyttä tiloissa. Opinnäytetyössä perehdyttiin rakennusautomaatioon ja sen mahdollisuuksiin yleisellä tasolla. Tässä työssä käytiin myös läpi erilaisia väylätekniikoita ja niiden ominaisuuksiin. Opinnäytetyössä tulee esiin myös lakeja ja asetuksia, joiden tarkoitus on ohjata suunnittelijan ratkaisuita energiatehokkaaseen ja käyttäjäystävälliseen suuntaan.

Opinnäytetyön toteutusvaihe keskittyi selvittämään mitä saavutetaan, kun valaistuksen ohjauksessa käytetään apuna päivänvaloanturia. Päivänvaloanturin hyötyjä tuotiin esille simuloimalla tosielämän tilannetta Dialux-valaistussuunnitteluohjelmalla ja laskennallisesti standardeista löydettyillä kaavoilla ja kertoimilla. Asiaa lähestyttiin ensin huonetasolta ja lopuksi tutkimusta laajennettiin aluetasolle. Ilmanvaihdon osalta opinnäytetyössä perehdyttiin valmiiseen mittaus ja laskenta dataan, jotka osoittivat IMS-peltien vaikutuksen, käytettäessä niitä huone- ja aluekohtaisesti.

Kieli
suomi

Sivuja 37

Asiasanat
energiatehokkuus, käyttäjän viihtyvyys, automaatio



THESIS
January 2023
Degree Programme in Building Services Engineering

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600

Author (s)
Rony Korno

Title
The energy-efficient solutions of the C wing of the Wärtsilä campus
Commissioned by
Digital Twin project

The purpose of this thesis was to come up with solutions for the C wing of the Wärtsilä campus that promote energy efficiency and comfort in the premises. The thesis introduces building automation and its possibilities at a general level. In this study various bus technologies and their properties are also discussed.

The thesis also addresses laws and regulations, the purpose of which is to guide the designer's solutions in an energy-efficient and user-friendly direction. The implementation phase of the thesis focused on finding out what is achieved when a daylight sensor is used as an aid in lighting control. The benefits of the daylight sensor were highlighted by simulating the real-life situation with the Dialux lighting design program and by calculations with the formulas and coefficients found in the standards. The issue was first approached from the room level and finally the research was expanded to the regional level. In terms of ventilation, the thesis examines ready-made measurement and calculation data that show the effect of IMS dampers when they are for room and area specific applications.

Language
Finnish

Pages 37

Keywords
energy efficiency, user comfort, automation

Sisältö

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Opinnäytetyön tietoperusta | 2 |
| 2.1 | Rakennusautomaatio yleisesti | 2 |
| 2.2 | Lait ja asetukset | 3 |
| 2.3 | Rakennusautomaatiojärjestelmän hierarkia | 3 |
| 2.3.1 | Hallintotaso | 3 |
| 2.3.2 | Automaatiotaso | 4 |
| 2.3.3 | Kenttätaso | 4 |
| 2.4 | Hallintajärjestelmien perusteita | 5 |
| 2.4.1 | Avoin järjestelmä | 5 |
| 2.4.2 | Suljettu järjestelmä | 6 |
| 2.4.3 | Hajautettu ja keskitetty järjestelmä | 7 |
| 2.5 | Järjestelmän toteutus | 7 |
| 2.5.1 | Toiminnallisuus | 7 |
| 2.5.2 | Häiriöiden ehkäisy | 8 |
| 2.6 | Verkon rakenteet | 8 |
| 2.7 | Protokollat ja teknologiat | 11 |
| 2.7.1 | BACnet | 11 |
| 2.7.2 | KNX | 12 |
| 2.7.3 | DALI | 13 |
| 2.7.4 | Modbus | 13 |
| 2.8 | Automaatio loppukäyttäjän näkökulmasta ja Digital Twin | 14 |
| 3 | Toteutus | 16 |
| 3.1 | Valaistuksen nykytilanne | 16 |
| 3.2 | Valaistuksen toteutus DALI-väylää hyödyntämällä | 17 |
| 3.2.1 | Dialux laskelma | 21 |
| 3.2.2 | Valoanturionohjaus luokahuoneessa | 22 |
| 3.2.3 | Valoanturionohjaus useassa luokassa | 25 |
| 3.2.4 | Valoanturionohjaus C-siivessä | 26 |
| 3.2.5 | Yhteenveto valaistuslaskelmista | 30 |
| 3.2.6 | Ilmanvaihdon nykytilanne | 30 |
| 3.2.7 | IMS-peltien hyöty ilmanvaihdossa | 32 |
| 3.2.8 | Yhteenveto eri toteutuksista | 34 |
| 4 | Pohdinta | 35 |

1 Johdanto

Tilojen viihtyisyys on riippuvainen niiden olosuhteista. Olosuhteet koostuvat useista eri tekijöistä, joita tässä opinnäytetyössä käsiteltiin. Viihtyisä tila tarvitsee energiaa toimiakseen, mutta automaation avulla, käyttötarkoitukseen oikein suunnitellulla väylätekniikalla, hyödyntämällä rakennuksen tiloista saatua monipuolista tietoa ja oikeilla laitevalinnoilla voidaan energiankulutus minimoida niin, että kulutetaan vain välttämätön, kuitenkin halutuista olosuhteista tinkimättä.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli pohtia keinoja, miten Karelia AMK:n Wärtsilä-Kampuksen C-siiven sähköisiä ja taloteknisiä järjestelmiä sekä niitä ohjaavia automaatiojärjestelmiä tulisi uudistaa, jotta lopputulos olisi mahdollisimman energiatehokas ja käyttäjäystävällinen. Opinnäytetyö keskittyy C-siiven toiseen kerrokseen, joka sisältää pitkän käytävän, jonka varrella on useampia luokkahuoneita ja WC-tiloja. Aluksi selvitettiin tilojen nykytilanne sähkö- ja taloteknisten piirustusten perusteella, joiden pohjalta tehtiin suunnitelmia energiatehokkuuden sekä käyttäjäystävällisyyden tehostamiseksi.

Työn tavoitteena oli tutustua erilaisiin ratkaisuihin valaistuksen ja ilmanvaihdon osalta ja näyttää toteen erilaisin laskentatavoin ja tutkimuksista saadun datan avulla uudistustoimenpiteiden merkitys energiankulutuksessa. Tässä opinnäytetyössä käydään läpi myös suunnittelijan kannalta olennaisia lakeja ja asetuksia, joiden huomioiminen on tärkeää toteutuksia suunnitellessa. Opinnäytetyössä perehdyttiin myös rakennusautomaatioon yleisellä tasolla sekä tuodaan esille yleisempien väylätekniikoiden ominaisuuksia ja niiden tarkoituseriä.

Opinnäytetyön toteutusvaihe keskittyi kuitenkin pääasiassa valaistukseen ja halutun valaistustason ylläpitämiseen vaadittavan energiantarpeen selvittämiseen. Tässä työssä vertailtiin hyötyjä tila- ja aluekohtaisesti, kun ohjauksessa käytetään apuna valoanturilla varustettua liiketunnistinta. Ilmanvaihtoon perehdyttiin myös pintapuolisesti. Opinnäytetyön tekemisvaiheessa ei ollut mahdollista saada mittausdataa tarkastelun kohteena olleista tiloista, joten ilmanvaihdon osalta hyödynnettiin valmiita tuloksia eri kohteesta, jotka toivat esiin IMS-peltien hyödyn energiansäästöissä.

2 Opinnäytetyön tietoperusta

2.1 Rakennusautomaatio yleisesti

Rakennusautomaatiolla tarkoitettiin ennen pelkkää LVI-automaatiota. Ajan kuluessa ja uudenlaisten taloteknisten ja muiden järjestelmien lisääntyttyä on rakennusautomaatio-termin käsitys laajentunut. (ST 709.00, 2017, 2.) Rakennusautomaation merkitys kohteen toimintaan on suuri. Rakennusautomaatiota voidaan hyödyntää rakennuksen useiden eri järjestelmien, kuten valaistuksen, lämmityksen, jäähdytys ja ilmanvaihdon, ohjaamiseen ja valvomiseen. (Talokeskus 2023.)

Rakennuksen sisäolosuhteiden ylläpitäminen halutulla tasolla vaatii rakennusautomaatiojärjestelmältä jatkuvaa tiedon keräämistä tiloista ja niiden olosuhteista. Rakennuksen eri järjestelmien optimaalisen toiminnan ja ylläpidon mahdollistavat oikeat laitevalinnat, asianmukainen ohjelmisto ja suunnittelu, sekä asiantunteva valvova henkilöstö. (ST 17, 2018, 21.)

Rakennusautomaatiojärjestelmän keskeisiä tavoitteita on toteuttaa ohjaukset ja säädöt suunnitelmien mukaisella tavalla, valvoa toimintoja, tuottaa tilastomateriaalia mm. tilojen olosuhteista, kulutuksesta ja käytöstä sekä antaa loppukäyttäjälle selkeä ja ymmärrettävä käyttöliittymä. Rakentamisvaiheen muihin kustannuksiin verrattuna rakennusautomaation osuus on vähäinen, mutta sen merkitys yleisen viihtyvyyteen, rakennuksen elinkaaren pituuteen ja sen aikana syntyviin kustannuksiin on huomattava. (ST 17, 2018, 21.)

Keskeisten taloteknisten järjestelmien lisäksi automaatiota voidaan hyödyntää muussakin, kuten esimerkiksi tilahallintajärjestelmissä, palohälytysjärjestelmissä, murtohälytysjärjestelmissä, kulunvalvontajärjestelmissä. Automaatiolla on suuri rooli energian säästössä, etenkin julkisissa rakennuksissa. Säästöjä saadaan aikaiseksi esimerkiksi ohjaamalla tilan valaistusta, ilmanvaihtoa ja lämmitystä henkilömäärän tunnistavilla herkillä läsnäolotunnistimilla. Tarpeettomia valoja voidaan sammuttaa ja vähäkäyttöisten tilojen lämpötilaa voidaan laskea silloin, kun tilat eivät ole käytössä. (ST 710.01, 2016, 5.)

2.2 Lait ja asetukset

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta määrittelee toisessa luvussaan rakennuksen sisäilmastolle sallittuja olosuhteita seuraavasti:

- Rakennuksen huonelämpötilan tulee olla suunniteltuna käyttöaika viihtyisä. Ilman liike, lämpösäteily, lämpötilan vaihtelu, lämpötilaerot ja pinta-lämpötilat eivät saa heikentää lämpötilaolosuhteita. (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017, 4 §.)
- Sisäilman pitää olla laadultaan hyvää ja siinä ei saa esiintyä terveydelle haitallisessa määrin epäpuhtauksia. Sisäilman hiilidioksidin hetkellinen pitoisuus huonetilan käyttöaikana voi olla enimmillään 800 ppm ulkoilman pitoisuutta suurempi. (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017, 5 §.)
- Sisäilman kosteuden on pysyttävä suunnitelluissa arvoissa, eikä siitä saa aiheutua kosteusvaurioita, terveydellistä haittaa, tai mikrobien kasvua (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017, 6 §).
- Rakennuksen sisätiloissa olevan valaistuksen tason on mahdollistettava näkötehtävien suorittamisen. Valaistuksen ohjaukset on suunniteltava toiminnallisuuden mukaisesti. (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017, 7 §.)

2.3 Rakennusautomaatiojärjestelmän hierarkia

2.3.1 Hallintotaso

Hallintatasoon kuuluvat valvomot, joita voi olla useampia kiinteistön sisällä eli paikallistasolla. On myös etävalvomoita, joihin on keskitetty esimerkiksi

useamman kiinteistön valvonta. Valvomoissa näkyvät kaikki kentältä tulevat hälytykset ja sieltä voidaan myös tehdä muutoksia esimerkiksi aikaohjelmiin tai lämpötilojen asetusarvoihin. (ST17, 2018, 59.)

Hallintatason viestinvälitys tapahtuu yleensä Ethernet-väylällä. Etävalvonnassa taas käytetään laajakaistatekniikkaan perustuvaa yhteyttä. Lähiverkko- ja internetyhteydet käyttävät TCP-IP-protokollaa, joka on varma ja joustava tiedonsiirtotapa. (ST17, 2018, 59.)

2.3.2 Automaatiotaso

Automaatiotasoon kuuluvat valvonta-alakeskukset sekä niihin liitetyt I/O-moduulit ja ohjelmat, jotka kommunikoivat ja ohjaavat kentällä olevia laitteita. Automaatiotasolla viestintä toteutetaan yleensä LAN-verkon avulla eli paikallisen lähiverkkoon ja käyttäen TCP-IP-protokollaa. Yleensä ottaen lähiverkko perustuu standardin mukaiseen CAT-6 kaapelointiin. Pidemmät kaapeloinnit (yli 100m) toteutetaan usein optisia kuitukaapeleita käyttäen. WLAN-verkkoa, eli langatonta lähiverkkoa käytetään mobiililaitteiden kanssa. (ST17, 2018, 60-61.)

2.3.3 Kenttätaso

Kenttälaitteisiin lukeutuvat mm. anturit, toimilaitteet ja huonesäätimet. Kentällä olevat anturit keräävät tietoa tilan olosuhteista, kuten kosteudesta, lämpötilasta tai hiilidioksidipitoisuudesta. Alakeskuksissa olevat ohjelmistot käsittelevät tiloista saadun tiedon ja ohjaavat toimilaitteita käyttäjän asettamien arvojen mukaisesti. (ST17, 2018, 61.)

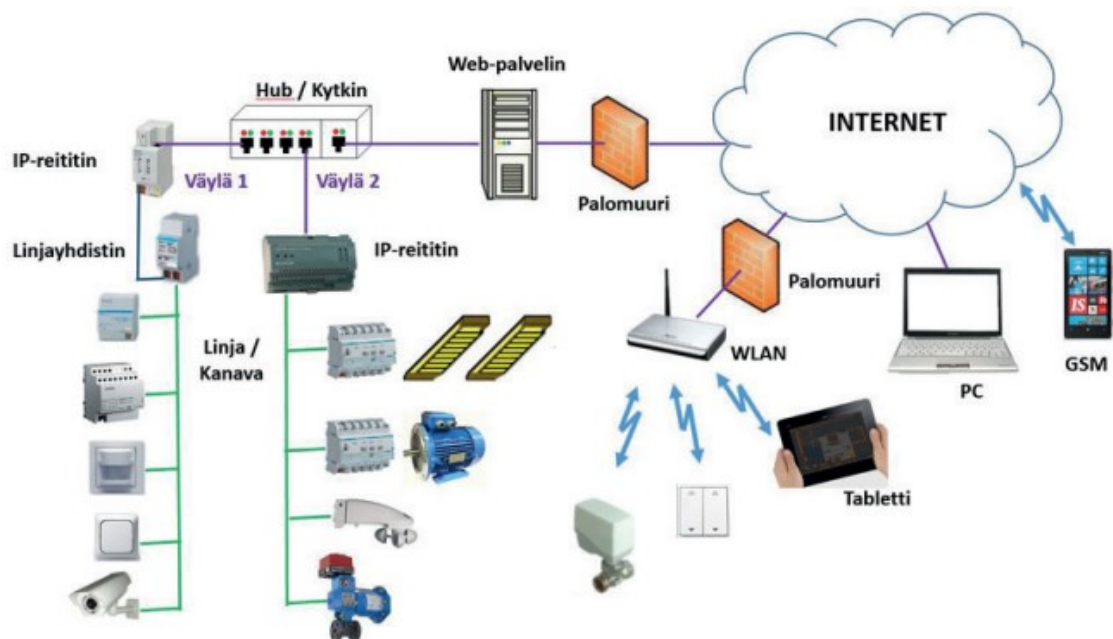
Puhaltimia ja IV-koneen pumppuja ohjaavat taajuusmuuntajat, jotka kommunikoivat alakeskusten kanssa. Kenttätason kommunikointi on yleensä toteutettu kenttäväylällä. Tunnetuimpiin kenttäväylästandardeihin lukeutuvat esimerkiksi ModBus, M-bus, KNX ja BACnet. (ST17, 2018, 61.)

2.4 Hallintajärjestelmien perusteita

2.4.1 Avoin järjestelmä

Avoimella järjestelmällä tarkoitetaan sitä, että tiedonsiirtoprotokolla on kaikkien käytettävissä. Avoimen järjestelmän tekniikka ei ole salaista ja kukaan ei omista sitä, joten sen käytöstä ei joudu maksamaan tekijänoikeusmaksuja. Avoin järjestelmä antaa mahdollisuuden valita laite- ja järjestelmätoimittajat. Käytetyimmät avointen järjestelmien standardit ovat yleensä useiden suuryritysten yhdessä luomia ja ovat levinneet Euroopan tai jopa maailmanlaajuisiksi. (ST 709, 2016, 1.)

Suunnitteilla olevan järjestelmän ollessa laaja sen toteuttaminen avointa väylätekniikkaa käyttämällä on järkevää ja edullista. Edullisuus johtuu kaapeloinnin vähäisyydestä. Suunnittelu nopeutuu ja tulevat muutokset ovat helpommin toteutettavissa. (ST 710, 2016, 5.) Ohessa kuvio avoimesta järjestelmästä (Kuvio 1).



Kuvio 1 avoin järjestelmä (ST 710, 2016, 5).

Kun järjestelmän pohjaksi valitaan avoin väylästandardi, saavutetaan useita etuja, kuten

- riippumattomuus laitetoimittajasta
- järjestelmän laajentamisen helppous ja varaosien saatavuus
- mahdollisuus laitetekniikan elinkaaren aikaisiin modernisointeihin tai päivityksiin
- elinkaaren hallittu jatkaminen
- helpompi liitettävyys eri automaatiojärjestelmien välille
- uusien päivitettyjen sovellusten kehittäminen ja ylläpitäminen. (ST 710.01, 2016, s.4.)

Tietoturvan tärkeys taas korostuu käytettäessä avointa tekniikkaa. On huolehdittava siitä, että siirrettävä tieto ei joudu väärille tahoille ja siitä, että tiedon sisältö on oikea. Toimenpiteitä tähän ovat esimerkiksi salasanat ja käyttöoikeudet, salaukset, virustorjuntaohjelmisto, palomuuuri ja suojalisenssit. (ST 710.01, 2016, s.3.)

2.4.2 Suljettu järjestelmä

Suljettu järjestelmä on avoimen järjestelmän vastakohta. Suljetut järjestelmät ovat toteutettuja yhden laitevalmistajan tai toimittajan tekniikalla. Tekniikan toimittaja on ainoa, joka pystyy tekemään järjestelmän huollot ja päivitykset. Suljettua järjestelmää käytettäessä eri valmistajien logiikkaohjainten yhteen kytkeminen esimerkiksi tiedonsiirtoa varten on hyvin haastavaa. (ST 709, 2016, 2.)

Yleensä hankintavaiheessa suljetut järjestelmät ovat avoimia järjestelmiä edullisempia, mutta vertaillen elinkaarikustannuksia suljetut järjestelmät tulevat usein kalliimmiksi, sillä asiakas on riippuvainen yhden valmistajan komponenteista ja joutuu maksamaan pyydetyn hinnan, koska kilpailua muiden valmistajien osalta ei ole. (ST 701.6, 2016, 2.)

2.4.3 Hajautettu ja keskitetty järjestelmä

Hajautetussa automaatiojärjestelmässä laitteet toimivat itsenäisesti ja sisältävät itsessään toimintojen ohjaamiseen tarvittavan automaation. Hajautetun järjestelmän yksiköt eivät ole riippuvaisia muiden laitteiden toiminnasta. Ohjauslaitteet on usein sijoitettu ohjattavan laitteen läheisyyteen ja valvomosta tapahtuu pelkkä laitteiden valvonta, ei niiden ohjaus. (ST 709, 2016, 2)

Keskitetty järjestelmä on vastakohta hajautetulle järjestelmälle. Keskitetyssä järjestelmässä automaation ohjaus sijaitsee yhdessä ohjauslaitteessa, jolla hallitaan koko järjestelmää. Keskitetyssä automaatiojärjestelmässä vallitsee selvä hierarkia – alemman tason toiminta on aina riippuvainen ylemmästä tasosta. (ST 709, 2016, 2.)

2.5 Järjestelmän toteutus

2.5.1 Toiminnallisuus

Väyläpohjaista järjestelmää suunnitellessa on ensin selvittää, kuinka valmiin järjestelmän tulee toimia. Ennen suunnittelun aloittamista loppukäyttäjän ja rakennuttajan tulee kuvata selkeästi ne toiminnot ja tavoitteet, jotka halutaan toteuttaa väyläpohjaisesti. Tämä taas vaikuttaa suoraan eri talotekniikan osa-alueiden suunnitteluun ja laitehankintoihin. (ST 710.01, 2016,1.)

Perustarkoitus väyläpohjaisessa järjestelmässä on se, että kerättyä tietoa on mahdollista hyödyntää järjestelmän kaikissa osissa sekä toiminnoissa. Integroimalla useita järjestelmiä saadaan käytettävyydestä huomattavasti laajempi. (ST 710.01, 2016,2.)

Kun järjestelmiä integroidaan ja tietoa kuljetetaan järjestelmien välillä, on kiinnitettävä erityistä huomiota useisiin seikkoihin, kuten energiatehokkuuteen, turvallisuuteen, sisäilman laatuun, rakennuksen joustavaan käyttöön ja henkilöstön työtehokkuuden tehostamiseen (ST 710.1, 2016, s.4).

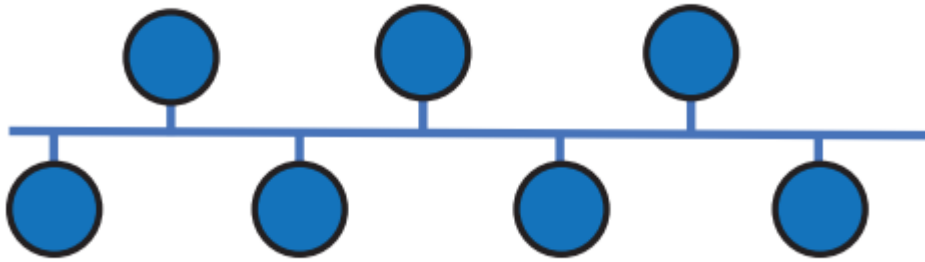
2.5.2 Häiriöiden ehkäisy

Suunnitteluvaiheessa tulee huomioida järjestelmän mahdolliset häiriöt. Väyläkaapelissa liikkuva signaali voi kulkiessaan vääristyä tai vaimentua. Väylässä muodostuvia häiriöitä voidaan vähentää ja ennaltaehkäistä oikeilla kaapelivalinnoilla. Suositeltavaa on käyttää häiriösuojavaipalla varustettuja johtimia, jotka vähentävät ulkoisten häiriökenttien kytkeytymisen väylän johtimiin. Joissakin järjestelmissä heijastumisia pyritään ehkäisemään käyttämällä pääteterminointia. Kaapeloinnin häiriönsuojauksen toteutumisen kannalta on ehdotonta käyttää vain sellaisia osia, jotka täyttävät järjestelmän vaatimukset. Jotkut järjestelmät ovat häiriöherkempiä kuin toiset. Esimerkiksi LonWorks-järjestelmä tulee sijoittaa vähintään 30cm etäisyydelle vahvavirtakaapeleista, kun taas KNX-, tai DALI-järjestelmissä tällaisella ei ole merkitystä. Kaapeloinnin häiriönsuojauksen toteutuminen edellyttää rakenneosia, jotka täyttävät järjestelmän vaatimukset. (ST 710.1, 2016, 6.)

2.6 Verkon rakenteet

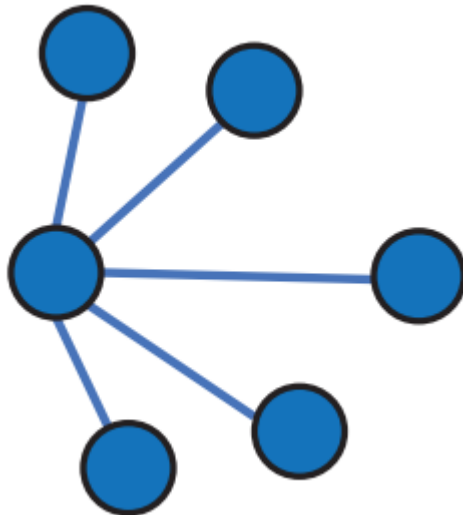
Verkon rakenne eli topologia on verkon fyysinen tai looginen muoto. Fyysisellä topologialla tarkoitetaan verkon kaapelointia ja loogisella verkon loogista toimiperiaatetta. Topologiasta puhuttaessa yleensä viitataan verkon fyysiseen rakenteeseen. (ST 21, 2022, s.16.) Tähti-, rengas- ja väylätopologiat ovat yleisimpiä topologioita. Vapaammat ja puumaiset topologiat ovat myös käytettyjä, mutta niiden heikkoudet tulevat esille saneerauskohteissa, jolloin kaapeloinnin selvittäminen voi olla haastavaa. (ST 21, 2022, s.19.)

Väylätopologiassa (Kuvio 2) laitteet ovat kytkettyinä samaan kaapeliin, joka rajoittaa viestinnän kerrallaan yhden laiteparin välille. Väylässä kulkeva viesti on luettavissa jokaiselta väylälaitteelta. Väylä on yksinkertainen ratkaisu, johon uusien laitteiden liittäminen on vaivatonta. Toisaalta väyläkaapelin katketessa kaikkien väylässä olevien laitteiden toiminta lakkaa. (ST 21, 2022, s.16.)



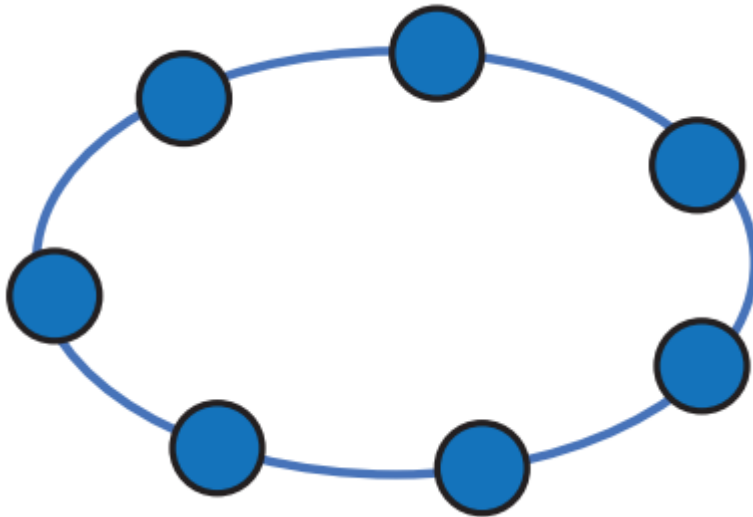
Kuvio 2 Väylätopologia (ST 21, 2022, s.17).

Tähtitopologiassa (Kuvio 3) viestintä tapahtuu verkon keskipisteen kautta, johon kaikki laitteet ovat kytkettyinä. Tähtitopologian toiminta on riippuvainen sen keskuksesta, joka yhdistää kaikki laitteet toisiinsa - jos keskus kaatuu, on koko verkko toimintakyvytön. Yksittäisten laitteiden vikaantuminen tai toiminnan lakkaaminen ei vaikuta verkkoon kokonaisuutena. (ST 21, 2022, 17.)



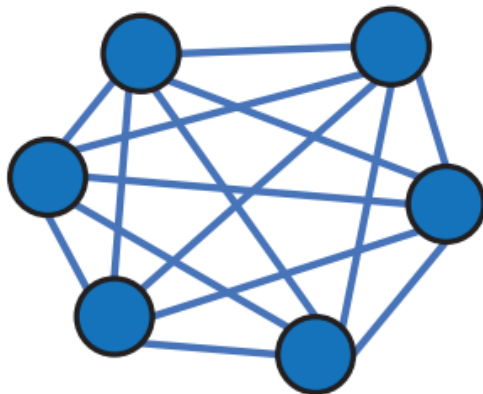
Kuvio 3 tähtitopologia (ST 21, 2022, 17).

Rengastopologiassa (Kuvio 4) viesti kulkee laitteelta toiselle ja runkokaapeli muodostaa renkaan. Joissain tapauksissa rengastopologiassa tapahtuva laiterikko voi vaikuttaa koko verkon toimintaan. (ST 21, 2022, 18.)



Kuvio 4 Rengastopologia (ST 21, 2022, 18).

Mesh topologiassa (Kuvio 5) laitteet voivat viestiä suoraan toistensa kanssa ja sitä käytetään usein langattomissa verkoissa. Langallisissa verkoissa Mesh topologia on harvinainen suurien kaapelointi määrien takia. (ST 21, 2022, 18.)



Kuvio 5 Mesh topologia (ST 21, 2022, 18).

2.7 Protokollat ja teknologiat

Protokolla on käytäntö tai standardi, jonka avulla on mahdollista toteuttaa laitteiden ja ohjelmien väliset yhteydet. Laitteet lähettävät viestejä toisilleen tai reagoivat niihin protokollan mukaisesti. Rakennusten sisällä tapahtuva tiedonsiirto on mahdollista toteuttaa useilla eri tavoilla ja teknologioilla. Kaikilla niillä on oma paikkansa tiedonsiirrossa, joskin mikä tahansa protokolla tai teknologia ei sovellu täysin joka paikkaan. Talotekniikan tiedonsiirtoon kehitettyjä järjestelmiä on kymmeniä. Uusia järjestelmiä kehitetään ja vanhoja poistuu markkinoilta jatkuvasti. (ST 21, 2022, 72.)

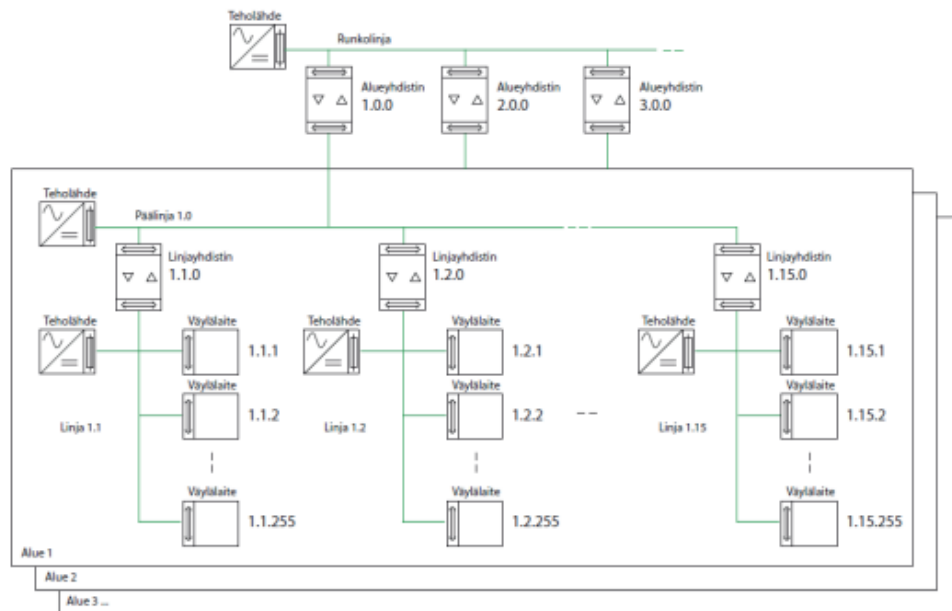
2.7.1 BACnet

BACnet kuuluu rakennusautomaation käytetyimpiin väyliin, joka on erityisen yleinen LVI- tekniikan ohjauksessa. BACnet verkkoon liitettävät laitteet mallinetaan erilaisia ominaisuuksia sisältävinä objekteina. Objekteihin kuuluvat laitteiden komponentit tai niiden tietokokoelma, kuten järjestelmäpisteet, asetusarvot, aikaohjelmat ja kalenteriohjelmat. BACnet laitteita on sertifioitu testilaboratorioissa vuodesta 2004 lähtien. Laitetoimittajilta BACnet vaatii tuoteselosteet BACnet-ominaisuuksista. (ST 21, 2022, s.72.)

Fyysisiä tiedonsiirtomenetelmiä BACnet- väylässä ovat muun muassa IP, kierretty pari (MS/TP) ja Zigbee. BACnet TCP/IP hyödyntää usein kiinteistön yleiskaapelointia (Ethernet), etenkin silloin, kun siirrettävää tietoa on paljon. Yleiskaapelointijärjestelmää hyödynnettäessä laitteille annetaan yksilöllinen IP-osoite. BACnet koostuu neljästä kerroksesta, joita ovat fyysinen-, siirtoyhteys-, verkko- ja sovelluskerros. Palvelinlaitteiden eli primääriyksiköiden on oltava taaksepäin yhteensopivia, joka tarkoittaa vanhojen laitteiden pitkää elinkaarta. (ST 21, 2022, s.72.)

2.7.2 KNX

KNX on yleinen rakennusautomaatiossa käytetty protokolla. Se on määritelty kansainvälisessä standardissa ISO/IEC 14543. Kaikkien eri KNX-laitevalmistajien KNX-tuotteet ovat yhteensopivia toistensa kanssa, sillä KNX Association sertifioi kaikki markkinoille tulevat laitteet. KNX-järjestelmää on mahdollista käyttää lähes kaikkien taloteknisten järjestelmien ohjaamiseen. Suomessa KNX-protokolla on erityisen käytetty tila-automaatiossa. KNX-järjestelmän yhdistäminen muihin protokolliin, kuten DALI tai BACnet, on mahdollista erilaisten rajapintojen avulla. KNX on väyläpohjainen järjestelmä, jonka laitteet eivät tarvitse keskinäiseen kommunikointiin keskustietokonetta. Järjestelmä muodostuu linjoista koostuvista alueista (Kuvio 6). Yksittäiseen linjaan on mahdollista kytkeä 256 laitetta. Yhdessä alueessa voi olla maksimissaan 15 linjaa. (ST 21, 2022, s.74.)



Kuvio 6. KNX:n linjat ja alueet (ST 21, 2022, 75).

KNX-järjestelmän tiedonsiirron voi toteuttaa monella eri tavalla, kuten kierretyllä parikaapelilla, valokaapelilla, langattomasti tai käyttämällä sähköverkkoa. Kaapelointitopologiaksi soveltuu väylä-, tähti- tai puurakenne. (ST 21, 2022, 75.)

2.7.3 DALI

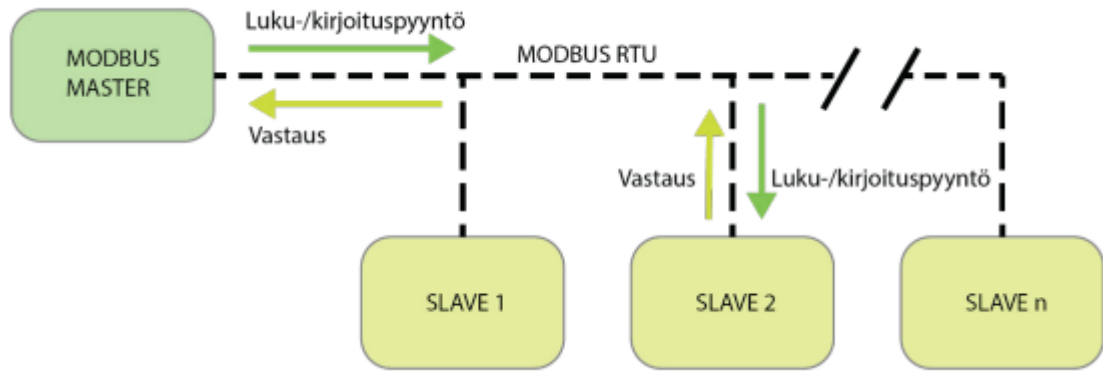
DALI eli Digital Addressable Lighting Interface on digitaalinen valonohjausprotokolla. DALI-tekniikan avulla ohjataan esimerkiksi valosäätimiä ja valaisimien liitäntälaitteita. DALI on erittäin monikäyttöinen ja sen avulla voidaan luoda tilalle hyvinkin spesifit valaistusolosuhteet esimerkiksi himmennysten ja aikaohjelmien avulla. DALI:n ohjelmoiminen ja käyttöönotto on helppoa, sillä se ei vaadi erityisosaamista, vaan perustietämys sähkötekniikasta ja Windows-ympäristön käytöstä riittää. (ST 701.60, 2016, s.6.)

DALI-väylässä olevien laitteiden yksilöllisten osoitteiden ansiosta on mahdollista ohjata ja muokata tiettyä väylässä olevaa laitetta. Yhteen DALI-väylään voi lisätä yhteensä 64 laitetta, kuitenkin niin, että väylän maksimivirta ei ylitä 250 mA. (ST 701.60, 2016, s.6.)

2.7.4 Modbus

Modbus on avoin tiedonsiirtoprotokolla, jonka laitteita pystyy valmistamaan vapaasti ilman tekijänoikeusmaksuja protokollan kehittäjälle. Modbus on rakennusautomaatiojärjestelmissä hyvin yleisesti käytetty ja helposti sarjaliitännöihin toteutettavissa oleva primääri-sekundaari protokolla. Yleisen siitä tekee edullisen hinnan lisäksi laitevalmistamisen avoimuus. Modbus-protokollalla on kolme kehystä, joita ovat Modbus RTU, Modbus ASCII, sekä Modbus TCP/IP. RTU ja ASCII ovat yleisiä käytettäessä sarjaväyläliitännää. TCP/IP-versiota käytetään Ethernet-liitännöissä. (ST 21, 2022, s.77.)

Modbus-väylä voi sisältää yhden primäärilaitteen ja useita sekundaarilaitteita. Laitteiden kommunikointi Modbus-väylässä vaatii aina aloitteen primäärilaitteelta. Primäärilaitte lähettää kyselyn sekundäärilaitteelle, johon sekundäärilaitte vastaa (Kuvio 7). (ST 21, 2022, s.78.)



Kuvio 7. Modbus RTU protokollan (RS-485) viestintä primäärilaitteelta sekundaarilaitteille (master, slave). (ST 21, 2022, s.78).

Mahdollisia väylän toteutustapoja ovat kaksipisteysteys tai monipisteysteys, riippuen käytetystä sarjaliikenneväylästä. Esimerkiksi RS-232 voi sisältää vain yhden primääri- ja yhden sekundaarilaitteen ja kaapelin maksimipituus voi olla 15 metriä, kun taas uudempi RS-485 mahdollistaa yhden primäärilaitteen ja 31 sekundaarilaitetta. RS-485- kaapeli voi olla enimmillään 1,2 kilometriä. (ST 21, 2022, s.79.)

2.8 Automaatio loppukäyttäjän näkökulmasta ja Digital Twin

Tilan viihtyvyys on riippuvainen lukuisista eri asioista. Sisäympäristöllä tarkoitetaan kokonaisuutta, joka koostuu useista eri tekijöistä kuten valaistuksesta, lämpötilasta, sisäilmasta, äänestä ja akustiikasta. Huonolaatuinen sisäympäristö vaikuttaa oppimiseen, työntuottavuuteen ja yleisviihtyvyyteen negatiivisesti. Ihmisten terveydentilan ja viihtyvyyden kannalta on tärkeää, että rakennuksen sisäympäristö on kunnossa. (Työterveyslaitos 2023.) Käyttäjän mahdollisuus muokata helposti oman työ- ja asuinympäristön olosuhteista henkilökohtaisten toiveitten mukaiset liittyvät viihtyvyyden lisäksi myös suhtautumiseen älykkäisiin asennusjärjestelmiin (ST 710.01, 2016, 5).

Digital twin, eli digitaalinen kaksonen, on virtuaalinen kopio esimerkiksi tilasta, prosessista tai objektista. Kansainvälisen Digital Twin Consortiumin mukaan digitaaliset kaksoset ovat virtuaalisia esityksiä reaali maailman kohteista ja prosesseista, jotka synkronoituvat toisiinsa määrätyillä aikavälillä ja tarkkuudella. (Process Genius Oy 2023.)

Kiinteistöautomaation yhteydessä digitaalisella kaksosella tarkoitetaan yleensä kopiota kiinteistöstä tai sen prosesseista ja tiloista. Sen tarkoitus on havainnollistaa kentältä kerättyä tietoa ja hallita ylläpitoon liittyviä prosesseja. (Process Genius 2023.) Tarkasti tehdystä kiinteistön digitaalisesta kaksosesta voidaan nähdä myös yksityiskohtaista laitetietoa, kuten taloteknisten laitteiden sijainnit ja se, mitä tilaa mikäkin laite palvelee (Granlund 2023).

Digitaalisessa kaksosessa esitetty tieto kerätään antureilla tai laitepohjaisia keuruutyökaluja käyttämällä. Digitaalista kaksosta hyödyntämällä käyttäjän on helpompi ymmärtää se, miten eri asiat vaikuttavat olosuhteisiin ja ympäristöön. Digitaaliset kaksoset luodaan eri sovelluksilla kohteen ja loppukäyttäjän tarpeen mukaisiksi selkeyttä ja helppokäyttöisyyttä painottaen. (Process Genius Oy 2023.)

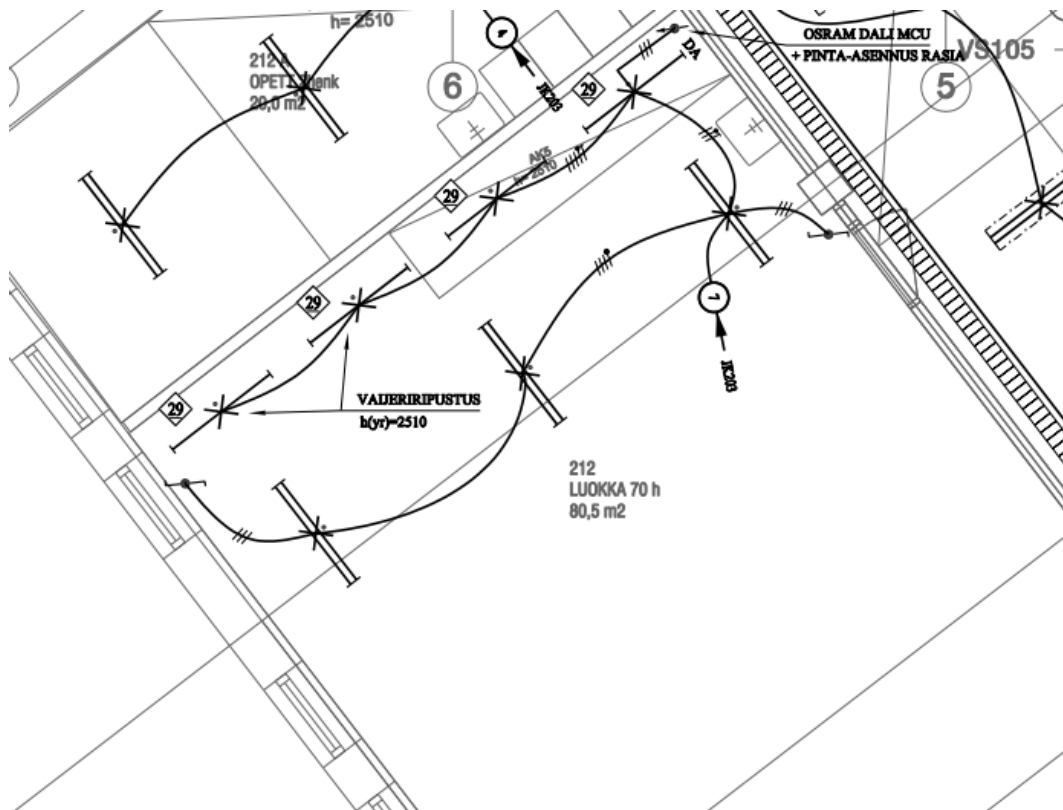
Digitaalisia kaksosia on useita eritasoisia – yksinkertaisista erittäin edistyneisiin. Se, millainen digitaalinen kaksonen luodaan, on käyttötärpeesta riippuvainen. Edistyneimmät digitaaliset kaksoset ovat tarkkoja malleja jo olemassa olevista rakennuksista. Ne sisältävät kaikki suunnittelu- ja rakennusvaiheessa toteutetut tietomallit. Talotekninen digitaalinen kaksonen sisältää tietomalleista kaiken sen, mitä tarvitaan taloteknisten järjestelmien, kuten sähkön, veden ja ilmanvaihdon ylläpitoon. Vuorovaikutteinen pohjapiirros on digitaalisen kaksosen muoto, joka koostuu kaksiulotteisesta pohjapiirustuksesta ja joistain yksinkertaisista kolmiulotteisista elementeistä, jotka sisältävät myös muuttumatonta ja dynaamista dataa. Kaikkein yksinkertaisin digitaalinen kaksonen sisältää raportinäkymän, johon on lisätty vuorovaikutteinen, kaksiulotteinen kartta. (Rakennuslehti 2020.)

3 Toteutus

3.1 Valaistuksen nykytilanne

Tätä opinnäytetyötä tehdessä Wärtsilä-kampuksen C-siipi oli remontin alla, joten opinnäytetyössä tarkastellaan myös remonttia edeltävää tilannetta, käyttäen vuoden 2019 uudistuksen aikaisia sähkö-, automaatio- ja LVI-piirustuksia sekä DWG- kuvia. Tilan remontin vuoksi C-siivessä asiointi ei ollut mahdollista purkutoimien oltua jo hyvän aikaa käynnissä. Nykytilannetta tarkastellessa apuna olivat myös erään opinnäytetyötä tekevän ryhmän tiloista ennen purkutoimien aloittamista otetut valokuvat.

C-siiven 2. kerroksen luokkahuoneiden valaistus koostuu pintaan asennetuista loisteputkivalaisimista. Valaistuksen ohjaus on toteutettu perinteisellä kytkinohjauksella. Luokkahuoneiden loisteputkivalaisimia pystytään ohjaamaan oven pielessä olevalla kytkimellä ja vastakkaisella seinällä olevan kytkimen avulla. Luokkahuoneiden etuosasta löytyy myös neljä EcoLine Office- riippuvalaisinta, joiden tarkoitus on valaista liitutaalua. Näitä ohjataan Osramin DALI MCU- himmentimellä. Ohessa 2. kerroksen tasopiirrustuksesta otettu kuvakaappaus, jossa näkyy luokan 212 valaistuksen periaate (Kuva 1).



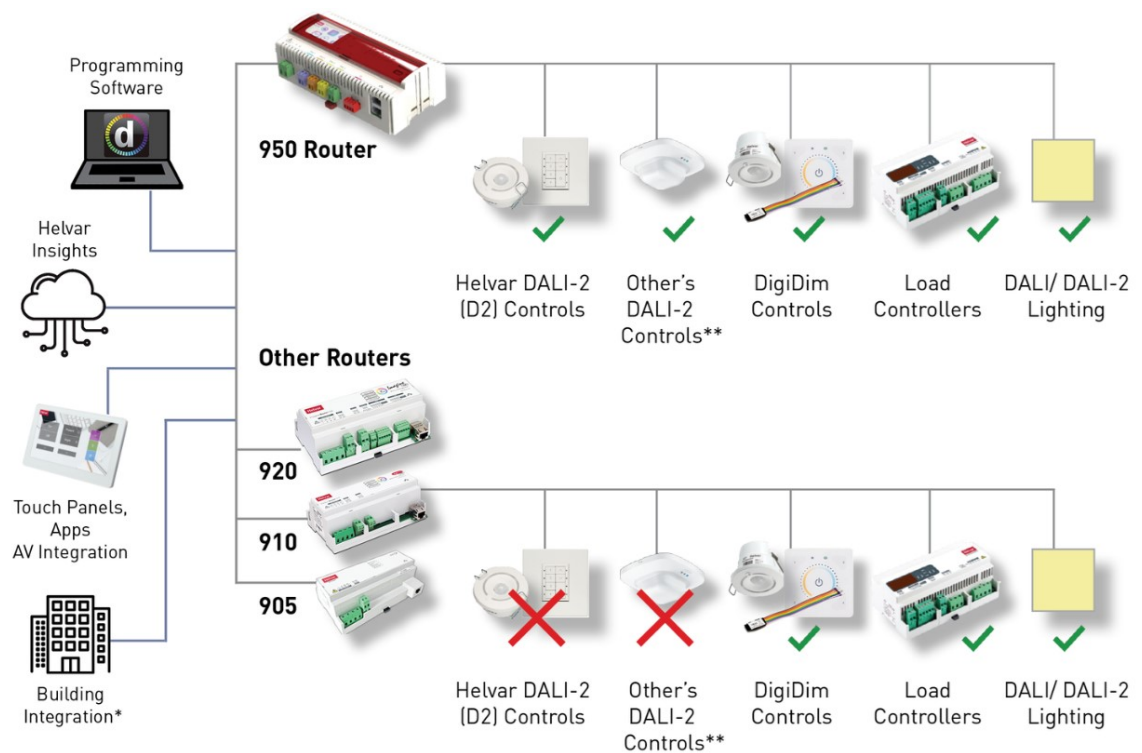
Kuva 1. Luokka 212 tasopiirustus (Jormakka Oy 2018)

Käytävän valaistus on toteutettu käyttämällä uppoasennusmallin loisteputkivalaisimia. Sähkopiirustuksista ei käy ilmi valojen ohjaustapaa, eli esimerkiksi sitä, onko käytävälle lisätty liiketunnistimia vai ovatko valaisimet vain aikaohjelman takana. C-siivessä sijaitsevan keskuksen JK203 kuvia ei löytynyt käytössä olleesta kuvapaketista.

3.2 Valaistuksen toteutus DALI-väylää hyödyntämällä

Älykäs valaistus on mahdollista toteuttaa esimerkiksi DALI-väylää ja laitteita hyödyntäen. Keskukseen asennettava Helvarin 900-sarjan DALI-reititin mahdollistaa useiden erilaisten DALI-laitteiden kytkemisen väylään ja niiden ohjelmoimisen. Alla olevassa kuviossa (Kuvio 8) on esitelty muutama yleisin Helvarin DALI-reititin ja niihin kytkettäviä mahdollisia DALI-väylälaitteita. Merkillepantavaa alla esitettyssä kuviossa 8 on myös pilvipohjainen palvelu Helvar Insights. Sen avulla pystytään hallinnoimaan kiinteistön valonohjausjärjestelmää paikasta riippumatta. Tämä helpottaa muutosten ja huoltojen tekemistä valaistusjärjestelmään, sillä niitä voidaan tehdä myös etäyhteyden avulla. (Helvar 2023a.)

Valonohjausjärjestelmässä olevien sensoreiden avulla saadaan tietoa muun muassa tilojen käyttöasteesta. Kerätty tieto voidaan esittää visualisesti Helvar Insights-palvelun tarjoamassa yksinkertaisessa digitaalisessa kaksoosessa, joka helpottaa muun muassa hälytysten ja vikakohtien paikantamista. Sensoriverkosta kerättyä dataa voidaan myös hyödyntää erilaisissa teknisissä järjestelmissä, kuten tilavauraus- tai IV-järjestelmissä. Konkreettinen esimerkki toiminnallisuudesta on tilavarauksen perusteella ennakoitu ilmanvaihdon tehostaminen. (Helvar 2023a.)



Kuvio 8. DALI- reitittimet ja DALI-väylälaitteet (Helvar 2023b).

Tilaan asennettava valoanturin sisältävä liiketunnistin mahdollistaa sen, että valaisimilla tuotetaan vain sen hetkinen tarvittava valovirta. Tällainen laite on esimerkiksi valoanturilla varustettu Helvarin 321 multisensori (Kuva 2).

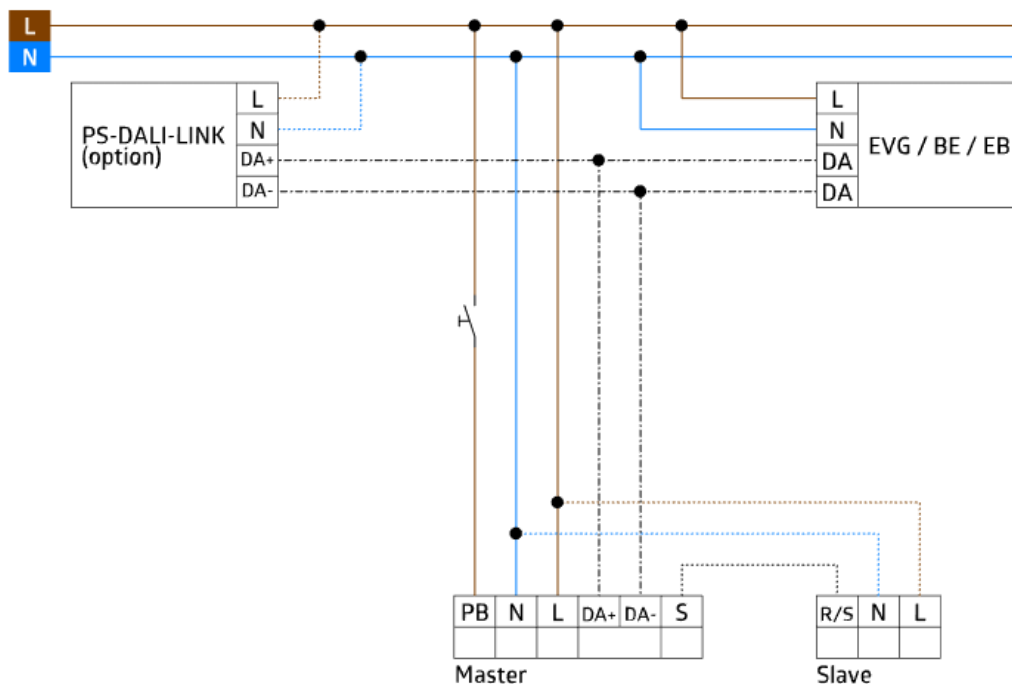


Kuva 2. Helvar 321 multisensori (Helvar 2023c).

Vaihtoehtoinen tapa luokkahuoneiden valaistuksen toteutukseen on paikallinen DALI-väylä. Tässä tapauksessa keskukseen ei asenneta erillisiä keskuslaitteita. B.E.G Luxomat:n valmistama PD4N-M-DACO DALI- 2 (Kuvio 9) on valoanturilla varustettu liiketunnistin, joka itse toimii järjestelmän älynä. Se sisältää oman 80mA teholähteen DALI-väylälle. Ohessa myös laitteen kytkentäkaavio (Kuvio 10).



Kuvio 9. PD4N-M-DACO DALI- 2 (Nylund 2023).



Kuvio 10. PD4N-M-DACO DALI- 2 kytkentäkaavio (Nylund 2023).

Luokkahuoneiden valaistus voisi toimia niin, että luokkaan astuttaessa liiketunnistin sytyttää valaisimet valoanturin määrittelemään tasoon. Liiketunnistin sammuttaa myös valaisimet, kun se ei havaitse liikettä ennalta määrätyn ajan kuluttua. Oven pieleen voidaan lisätä modulaarinen paneeli (Kuva 3), joka mahdollistaa sen, että joko kaikki tai vain tietyt valaisimet voidaan halutessaan sammuttaa. Modulaarinen paneeli mahdollistaa myös kirkkauden säädön kumoten valoanturin määrittelemän valaistustason.



Kuva 3. Helvarin 135W modulaarinen paneeli (Helvar 2023d).

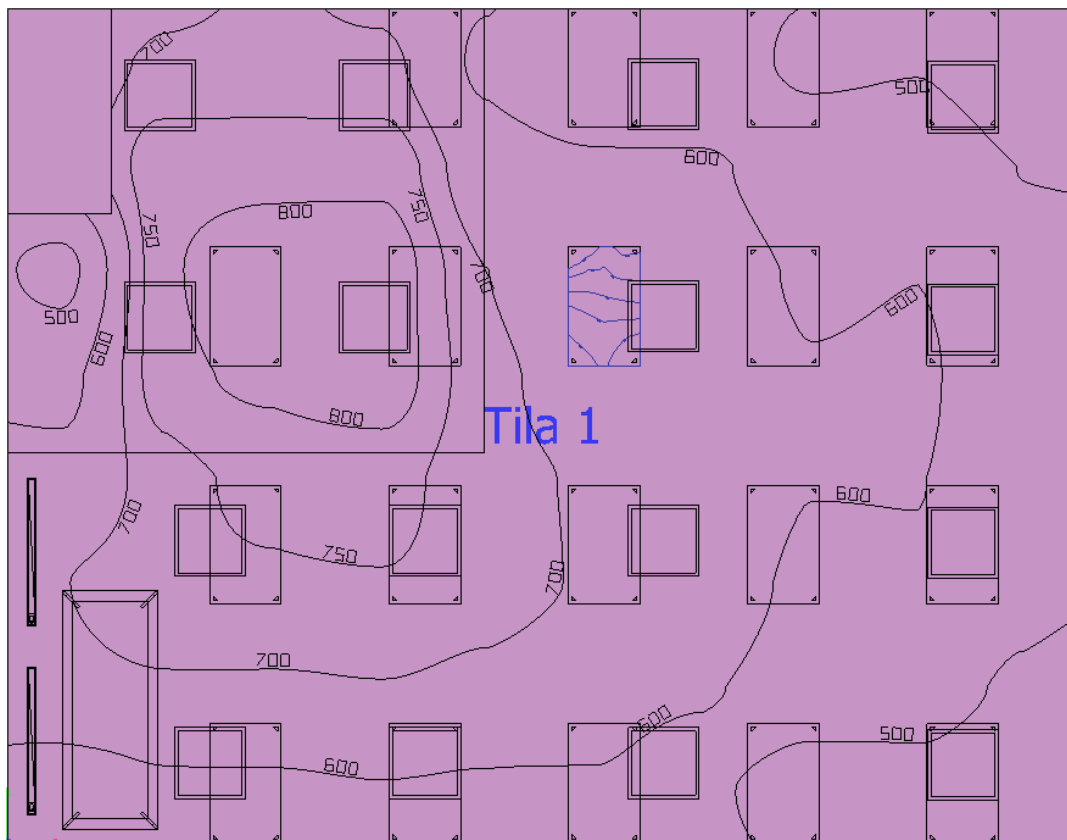
3.2.1 Dialux laskelma

Dialux-ohjelmalla pystytään luomaan todellisuutta vastaava virtuaalinen tila ja valaistus. Ohjelman tarkoitus on muun muassa laskea tilalle tarvittava määrä valaistusvoimakkuutta, selvittää tilan energiankulutus valaistuksen osalta ja auttaa valitsemaan oikeanlaiset valaisimet. Dialuxista löytyy kattava katalogi eri valmistajien valaisimia. Kuvassa 4 näkyy C-siiven remontin jälkeistä luokkahuonetta vastaava tila, joka on mallinnettu vastaamaan luokasta tehtyä 3D-mallinusta.

Tilan valaistus on mitoitettu standardin mukaan niin, että heikoimmillaan työtilan valaistusvoimakkuus on 500lx ja lähiympäristön 300lx (Kuvio 11). Luokkahuoneen Dialux-mallissa on käytetty 16:ta Fagergultin 30W Slim Opal-valaisinta ja kahta Fagerhultin 14W Kvisten-valaisinta, joilla saavutetaan standardin määrittelemä opetustilojen minimitaso valaistusvoimakkuus. Tosin standardi työkohteiden valaistuksesta suosittelee, että valaistusta suunniteltaessa tulisi pyrkiä minimiä korkeampaan valaistustasoon. Käytännössä tämä tarkoittaisi sitä, että valaistusta olisi hyvä voida säätää aina 1000lx asti. (SFS-EN-12464-1:2021, 46.)



Kuva 4. C-siivessä sijaitsevan luokan Dialux malli.







Kuvio 11. Luokan pohjapiirustus ja valaistusvoimakkuus työtason korkeudessa.

3.2.2 Valoanturinohjaus luokkahuoneessa

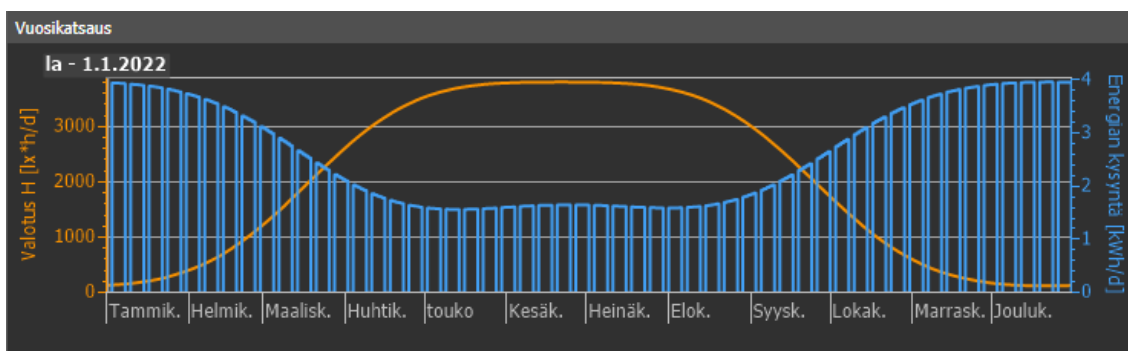
Dialux-ohjelman avulla voidaan myös laskea esimerkiksi vuodessa syntyvä energian säästö, kun hyödynnetään valoanturia valaistusvoimakkuutta säädettyä. Kuvitteellisessa tilanteessa, jossa Dialux-ohjelmaan luotu C-siivessä sijaitseva luokka on ympärivuotisessa käytössä viisi päivää viikosta ja kahdeksan tuntia päivässä, olisi vuoden energiakulutus valaistuksen osalta 1057kWh. Valoanturilla toteutettu valaistusvoimakkuuden säätö pienentää vuoden valaistuksen energiakulutusta 380kwh, jos anturi sijoitetaan mittaamaan huoneen heikointa kohtaa.

Dialux-taulukosta otetusta kuvakaappauksesta (Taulukko 1) näkyy kulutuksen lisäksi tyhjäkäyntivirran huomioiva LENI-luku, kustannukset euroissa ja vuotuinen CO₂-päästöjen määrä sekä näiden arvojen yksiköt. Kustannuslaskelmiin on käytetty arvona Fortumin tarjoamaa kahden vuoden määräaikaista sopimusta 11,02c/kWh (Fortum 2023) Valoanturin avulla tilan sallittujen valaistusolosuhteiden ympärivuotisen ylläpidon toteuttaminen onnistuisi 36% pienemmällä kuluksella.

| | Hallitsematon | Hallittu | Säästöt |
|--|---------------|----------|---------|
|  Kulutus (kWh/a) | 1057 | 674 | 382 |
|  LENI (kWh/a/m ²) | 16.8 | 10.7 | 6.07 |
|  Kustannukset (€/a) | 116.65 | 74.45 | 42.21 |
|  CO ₂ (kg/a) | 424 | 270 | 153 |

Taulukko 1. Raportti valoanturilla saavutetuista säästöistä.

Tarkasteltu luokkahuone ei ole ympärivuotisessa käytössä. Kesäisin tilat eivät ole käytössä, joten touko-elokuun välistä aikaa ei huomioida kyseisen tilan kohdalla, jolloin valoanturista saatu hyöty olisi suurin. Kun lasketaan yhteen ohjelmasta poimitujen touko-elokuun arkipäivien kulutus, saadaan laskennalliseksi säästöksi tuolle ajalle 210kwh. Laskennallinen hallitsemattoman kulutuksen osa on 349kwh. Touko-elokuun välisenä aikana sallittu valaistuksen taso onnistutaan siis toteuttamaan 60% pienemmällä kulutuksella. Ohessa oleva kuvaaja (Kuvio 12) osoittaa selkeät erot energian kysynnässä eri vuodenaikoina.



Kuvio 12. Energian kysyntä (kWh/d) ja Valotus H (lx*h/d).

Luokkahuoneen todellista valaistuksen energiankulutusta laskiessa on myös huomioitava oppituntien välillä oleva aika, kun tilalla ei ole ei ole välttämättä käyttöä, ja aika, jolloin käyttöä on harvemmin, kuten lukukausien loppuviikoilla. Näitä tekijöitä kuvaamaan käytetään laskettaessa hyvin karkeaa käyttöastekerointia 0,7. Tässä tapauksessa ei käytetä ympäristöministeriön määrittämää kerointia 0,6 oppilaitoksille, koska poimimme kesäajan päivät erikseen pois

(Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017, 11§).

Kokonaissäästöistä vähennetään Dialuxin laskennalliset kesäajan säästöt, jotka saadaan laskemalla yhteen jokainen touko-elokuussa oleva arkipäivä ja kertomalla kokonaissäästöjen ja kesäajan säästöjen erotus käyttöastekertoimella. Alla oleva taulukko 2 esittää tarkastelemamme luokkahuoneen profiilin mukaan saadut arvot, silloin kun touko-elokuun välistä aikaa ei huomioida. Loput arvot on laskettu suhteuttamalla ne uuteen todelliseen kulutusarvoon. Vuositasolla kyseisen tilan kulutus valaistuksen osalta vähenisi 24%.

| | Hallitsematon | Hallittu | Säästöt |
|------------------------------|---------------|----------|---------|
| Kulutus (kWh/a) | 495,16 | 376,16 | 119 |
| LENI (kwh/a/m ²) | 7,9 | 6,0 | 1,9 |
| Kustannukset (€/a) | 54,57 | 41,45 | 13,11 |
| CO2 (kg/a) | 199 | 151 | 47,7 |

Taulukko 2. Luokkahuoneen vuoden käyttöasteeseen suhteutetut arvot.

Halvimmat internetistä löydetyt Helvar Digidim-liiketunnistimet löytyvät Huhta Verkkokaupasta (Huhta Verkkokauppa 2023). Päivämäärällä 23.3.2023 valoanturin sisältävällä Helvar Digidim 321-multisensorilla on hintaa 166,15€. Helvar Digidim 320-liiketunnistin on muuten ominaisuuksiltaan sama, mutta ilman valoanturia – tällä tuotteella on samassa verkkokaupassa hintaa 126,24€. Alla olevassa taulukossa 3 näkyvät laitteiden hinnat ja hintojen erotus.

| | |
|-------------|----------|
| Digidim 321 | 166,15 € |
| Digidim 320 | 126,24 € |
| Erotus | 39,91 € |

Taulukko 3. Liiketunnistimien hinnat ja hintojen erotus

Arvioitu takaisinmaksuaika valittaessa kalliimpi Digidim 321-multisensori Digidim 320-liiketunnistimen sijaan, olisi tarkastelemamme luokkahuoneen kohdalla 11,02c/kWh hinnalla 3,04 vuotta. Jos tarkastelemamme luokkahuone olisi

identtinen tilan kanssa, joka olisi tasaisesti ympärivuotisessa käytössä, olisi takaisinmaksuaika 0,95 vuotta. Tässä huomataan se, että valoanturin suurin hyöty saadaan, kun tilalla on käyttöä myös kesäisin.

3.2.3 Valoanturiohjaus useassa luokassa

Edellä tarkasteltu luokkahuone, jonka energiankulutuksesta tehtiin Dialux-laskelma, on pinta-alaltaan 61m². Valaistuksen kokonaisteho kyseisessä luokkahuoneessa on 508W. Keskimääräiseksi tehotiheydeksi muodostuu 8,32W/m². Opetusrakennuksien valaistuksen tehotiheyden suuntaa antava arvo on 14W/m², mutta laskettaessa kokonaisenergiankulutusta voidaan käyttää annettuja standardiarvoja pienempää valaistustehoa, kunhan valaistuksen taso säilyy standardin mukaisena. (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017, 4§.)

Wärtsilä-kampuksesta tehdystä 3D-mallista laskettuna saadaan C-siiven luokkahuoneiden kokonaispinta-alaksi yhteensä 394m². Käytettäessä esimerkki-luokkahuoneen toimivaksi todettua tehontiheyttä 8,32W/m², saadaan C-siiven 2. kerroksen luokkahuoneiden valaistuksen ohjaamattomaksi kokonaistehoksi 3,27kW.

Käytetään tarkastellun luokkahuoneen LENI-lukua myös arvioidessa muiden C-siiven luokkahuoneiden kulutusta, sillä olettamuksella, että muiden luokkahuoneiden käyttöaste vuotuisella tasolla on verrannollinen esimerkissä olevaan luokkahuoneeseen. LENI-luku ottaa huomioon laitteiden lepovirran. Ohessa näkyy taulukko (Taulukko 4), johon on laskettu energiankulutus ja kustannukset.

| | Hallitsematon | Hallittu | Säästöt |
|------------------------------|---------------|----------|---------|
| Kulutus (kWh/a) | 3278,1 | 2490,3 | 787,8 |
| LENI (kwh/a/m ²) | 7,9 | 6,0 | 1,9 |
| Kustannukset (€/a) | 361,24 | 274,43 | 86,82 |

Taulukko 4. Alueen kaikkien luokkahuoneiden yhteenlasketut arvot

3.2.4 Valoanturiohjaus C-siivessä

Laskettaessa karkeaa arviota valaistuksen energian kulutuksesta suuremmilta alueilta, jotka sisältävät eri käyttötarkoituksen omaavia tiloja, on järkevää käyttää laskennoissa valmiita kertoimia ja arvoja. Ei ole tarpeellista luoda erittäin tarkkoja tilakohtaisia valaistusprofiileja Dialux-ohjelmalla, vaikkakin Dialux-ohjelma soveltuu hyvin tilojen valaistusvoimakkuuden tarkastamiseen.

Taulukossa 5 näkyvät yhteenlaskettuna C-siiven 2. kerroksen eri tilojen kokonaispinta-alat, valaistuksen tehottiheys ja valaistuksen ohjauskerroin. Aulan tehottiheydeksi on määritetty sama kuin luokkahuoneissa, sillä sinne on suunnitelmien mukaan määritetty ATK-työpisteitä. Käytävän, portaikon ja WC:n tehottiheys on sovellettu käyttämällä ympäristöministeriön laskentaoppaan taulukon 2 arvoja. (Valaistuksen tehottiheyden ja tarpeenmukaisuuden huomioiminen E-luvun laskennassa, 2021, 15.)

Valaistuksen ohjauskertoimet perustuvat ympäristöministeriön laskentaoppaaseen. Luokkahuoneiden, aulan ja WC:n kertoimet ovat taulukkoarvoja. Käytävän ja aulan valaisimien arvioidaan olevan päällä rakennuksen käyttötuntien ajan, joten kerroin perustuu pelkkään päivänvalo-ohjaukseen niin, että tilan valaistus on muuten koko käyttöajan aikana päällä. (Valaistuksen tehottiheyden ja tarpeenmukaisuuden huomioiminen E-luvun laskennassa, 2021, 15.)

| 1 | Pinta-ala m ² | Valaistuksen tehotiheys (W/m ²) | Valaistuksen ohjauskerroin |
|---------------|-----------------------------|--|-------------------------------|
| Luokkahuoneet | 394 | 8,32 | 0,68 |
| Käytävä | 136 | 5 | 0,9 |
| Aulat | 42 | 8,32 | 0,81 |
| Portaikot | 54 | 5 | 0,9 |
| WC | 39 | 7 | 0,6 |

Taulukko 5. C-siiven 2. kerroksen tilojen arvot.

Ohessa olevalla yhtälöllä 1 voidaan selvittää keskimääräinen tarpeenmukaisesti ohjattu valaistuksen tehontiheys (Valaistuksen tehontiheyden ja tarpeenmukaisuuden huomioiminen E-luvun laskennassa, 2021, 15).

$$P_{\text{valaistus}} = \frac{1}{A_{\text{tot}}} \sum_{i=1}^n (C_i P_i A_i) \quad (1)$$

missä $P_{\text{valaistus}}$ = lasketun alueen keskimääräinen tarpeenmukainen ohjattu valaistuksen tehontiheys [W/m^2]

A_{tot} = lasketun alueen nettoala [m^2]

C_i = valaistuksen ohjauskerroin

P_i = tilatyypin valaistuksen tehontiheys [W/m^2]

A_i = tilatyypin nettoala [m^2]

Ohjauskertoimilla laskettu valaistuksen tehontiheys:

$$P_{\text{rakennus}} = \frac{1}{665} \text{ m}^2 (0,68 * 394 \text{ m}^2 * 8,32 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} + 0,9 * 136 \text{ m}^2 * 5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} + 0,81 * 42 \text{ m}^2 * 8,32 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} + 0,9 * 54 \text{ m}^2 * 5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} + 0,6 * 39 \text{ m}^2 * 7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}) = 5,39 \text{ W}/\text{m}^2$$

Ilman ohjauskertoimia laskettu valaistuksen tehontiheys:

$$P_{\text{rakennus}} = \frac{1}{665} \text{ m}^2 (394 \text{ m}^2 * 8,32 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} + 136 \text{ m}^2 * 5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} + 42 \text{ m}^2 * 8,32 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} + 54 \text{ m}^2 * 5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} + 39 \text{ m}^2 * 7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}) = 7,40 \text{ W}/\text{m}^2$$

Rakennuksen käyttö on viisi päivää viikossa ja kahdeksan tuntia päivässä, ja annamme vuotuiseksi käyttöastekertoimeksi 0,6. Näitä arvoja käyttämällä saamme vuoden käyttötuntien määräksi 1248. (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017, 11§.) Edellisessä laskussa

käytetty kokonaispinta-ala on 665m^2 . Yhtälöä 2 hyödyntämällä voidaan laskea alueen energian kulutus vuodessa.

$$P_{\text{vuosi}} = \frac{P_{\text{valaistus}}}{\text{m}^2} A_{\text{tot}} * t \quad (2)$$

missä P_{vuosi} = lasketun alueen valaistuksen sähköenergian kulutus vuodessa

$P_{\text{valaistus}}$ = lasketun alueen keskimääräinen tarpeenmukainen ohjattu valaistuksen tehotiheys [W/m^2]

A_{tot} = lasketun alueen nettoala [m^2]

t = Vuodessa kertyvät valaistuksen käyttötunnit

Valaistuksen sähköenergian kulutus vuodessa ilman ohjausta:

$$P_{\text{vuosi}} = 7,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 665\text{m}^2 * 1248 \text{ h/a} = 6141\text{kWh/a}$$

Valaisuksen sähköenergian kulutus vuodessa läsnäolotunnistimilla ja päivänvalo-ohjauksella:

$$P \text{ ohjattu vuosi} = 5,39 \frac{W}{m^2} * 665m^2 * 1248 h/a = 4473kWh/a$$

Säästöt sähköenergian kulutuksessa vuodessa käytettäessä läsnäolotunnistimia ja päivänvalo-ohjausta:

$$P\text{säästö} = 6141 \frac{kWh}{a} - 4473 \frac{kWh}{a} = 1668 \frac{kWh}{a}$$

Valaistuksen koko sähköenergian kulutus, joka ottaa huomioon myös laitteiden lepokulutuksen, voidaan laskea soveltamalla ympäristöministeriön oppaasta löytyvää yhtälöä 3 ja läsnäolotunnistin + päivänvalo-ohjaukselle tarkoitettua kerrointa 0,7. Käytetään kaavassa tehontiheytenä (P valaistus) aikaisemmin laskeamamme ohjaamatonta tehontiheyttä 7,4 W/m² (Valaistuksen tehontiheyden ja tarpeenmukaisuuden huomioiminen E-luvun laskennassa, 2021, 9.).

$$W_{\text{valaistus}} = C_i * P_{\text{valaistus}} * A_{\text{tot}} * \frac{t}{1000} \quad (3)$$

missä $P_{\text{valaistus}}$ = lasketun alueen keskimääräinen tarpeenmukainen valaistuksen tehottiheys [W/m²]

C_i = valaistuksen ohjauskerroin

$W_{\text{valaistus}}$ = lasketun alueen valaistuksen sähköenergian kulutus vuodessa, huomioiden lepokulutus.

A_{tot} = lasketun alueen nettoala [m²]

t = Vuodessa kertyvät valaistuksen käyttötunnit

Valaistuksen sähköenergian kulutus vuodessa ohjausvirta huomioiden:

$$W_{\text{valaistus}} = \frac{0,7 * 7,4 \frac{W}{m^2} * 665 m^2 * 1248 h}{1000} = 4292 \text{ kwh/a}$$

3.2.5 Yhteenveto valaistuslaskelmista

Sähkökulutuslaskentoja tehdessä huomataan, että vuoden laskennalliset sähköenergian kulutukset vaihtelevat laskentatavasta riippuen hieman, mutta ovat suuntaa antavia ja tarpeeksi lähellä toisiaan. Tarkimmat tulokset saadaan, kun simuloidaan tiloja ohjelmallisesti, ja pystytään ilmoittamaan niille tarkka käyttöaste. Ohjelmalla pystytään myös sijoittamaan valoanturilla varustettu liiketunnistin haluttuun kohtaan huoneessa. Kun siirrytään huonetasolta isompiin kokonaisuuksiin, on syytä tehdä laskut hyödyntämällä valmiita, olemassa olevia kertoimia ja kaavoja.

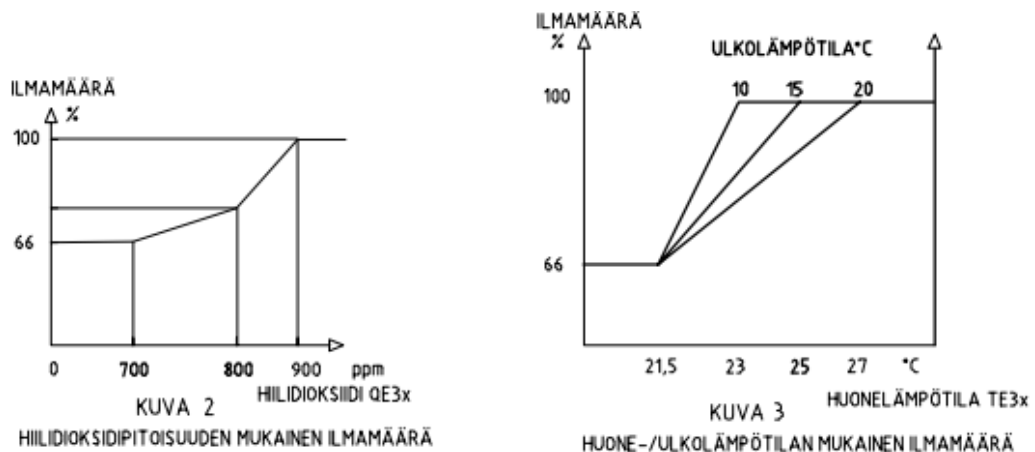
Laskettujen arvojen perusteella onnistutaan tiputtamaan sähköenergian kuluusta valaistuksen osalta noin 27% eli noin 184 euroa, kun korvataan C-siiven 2. kerroksen valaistuksen kytkin- ja aikaohjaukset liiketunnistimilla ja valoanturin sisältävillä liiketunnistimilla. Säästö olisi huomattavasti isompi, jos olisimme käyttäneet lähtötilanteena vanhoja loisteputkivalaisimia. Karkeasti arvioituna koulurakennusten sähkökulutuksesta noin viidesosa kuluu valaistukseen (Motiva 2022). Käyttämällä energiatehokkaita valaisimia ja ohjausta valaistuksen osuus sähkökulutuksesta on huomattavasti arvioitua pienempi.

3.2.6 Ilmanvaihdon nykytilanne

C-siiven 2. kerroksen ilmanvaihdon nykytilanteen selvityksessä apuna käytettiin Granlund Joensuun vuonna 2018 tekemiä automaatio suunnitelmia, joista kävi ilmi C-siiven 2. kerroksen luokkien ilmanvaihdon toiminta ja käytössä olevat laitteet. Ennen remonttia tarkastelussa olevalta alueelta löytyy neljä luokkahuonetta, joiden pinta-ala vaihtelee välillä 78,5m²-81,5m². Jokaisesta neljästä huoneesta löytyy lämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden mittaus, joita käytetään ilmanvaihdon sen hetkisen tarpeen mittaamiseen. Ilmanvaihtokoneen rinnakkain

käyviä tulo- ja poistopuhaltimia ohjataan rakennusautomaatiojärjestelmän aika- ja tapahtumaohjelmilla. (Granlund 2018.)

Alueen IV-järjestelmää varten luotu säätöohjelman tehtävä on ohjata tulo- ja poistoilmapuhaltimien pyörimisnopeutta taajuusmuuntajien avulla, siten IV-kanavien kanavapaineet säilyvät asetusarvoissaan. Kanavapaineille on luotu 3 eri asetusarvoa: minimi, normaali- ja mitoitusasetus. Alueen käyttöajan ulkopuolella ilmanvaihto toimii minimitasolla. Ilmanvaihto reagoi säätämällä portaattomasti alla olevan kuvion (Kuvio 13) mukaisesti tiloista saatujen hiilidioksidi- ja lämpötilamittausarvojen mukaisesti. Luokkien ihmismäärän myötä hiilidioksidipitoisuus kasvaa, jolloin ilmanvaihto tehostuu. Käytävältä löytyy myös jatkoaikapainike, jota painettaessa ilmanvaihto käynnistyy mitoitusasetukselle. Tämä on sitä varten, jos tilojen tyypillisten käyttöaikojen ulkopuolella ilmenee tiloille käyttöä. (Granlund 2018.)



Kuvio 13. Ilmamäärä suhteessa hiilidioksidin ja huone- ja ulkolämpötilaan (Granlund 2018).

C-siiven 2. kerroksen ilmanvaihtojärjestelmä ei sisällä IMS-säätöpeltejä, joiden avulla ilmamäärien säätäminen olisi mahdollista toteuttaa energiatehokkaalla tavalla alue- tai huonekohtaisesti. Ilmanvaihdon nykytilanne ei ole kustannustehokkain toteutustapa, sillä jos vain esimerkiksi yhden luokkahuoneen hiilidioksidipitoisuus nousee, kasvaa myös mahdollisesti tyhjien luokkien ilmamäärä, jolloin turha energiankulutus lisääntyy.

3.2.7 IMS-peltien hyöty ilmanvaihdossa

Vuonna 2021 tehdyssä, Tom Bergströmin opinnäytetyössä ”Tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla saavutettava sisäilman laatu ja energiansäästö koulun luokkahuoneissa” on selvitetty kattavasti IMS-peltien vaikutus ilmanvaihtoon. Kyseisen opinnäytetyön tuloksia voidaan pitää suuntaa antavina verrattaessa niitä Wärtsilä-kampuksen C-siiven 2. kerrokseen alueeseen remontin jälkeen, jolloin alue sisältää suunnitelmien mukaan kuusi luokkahuonetta, ja yhden pienemmän 20m² huoneen. Tom Bergströmin opinnäytetyössä käsitellään aluetta, joka sisältää kuusi luokkahuonetta, joiden pinta-alat vaihtelevat välillä 41m² - 66m². (Bergström 2021).

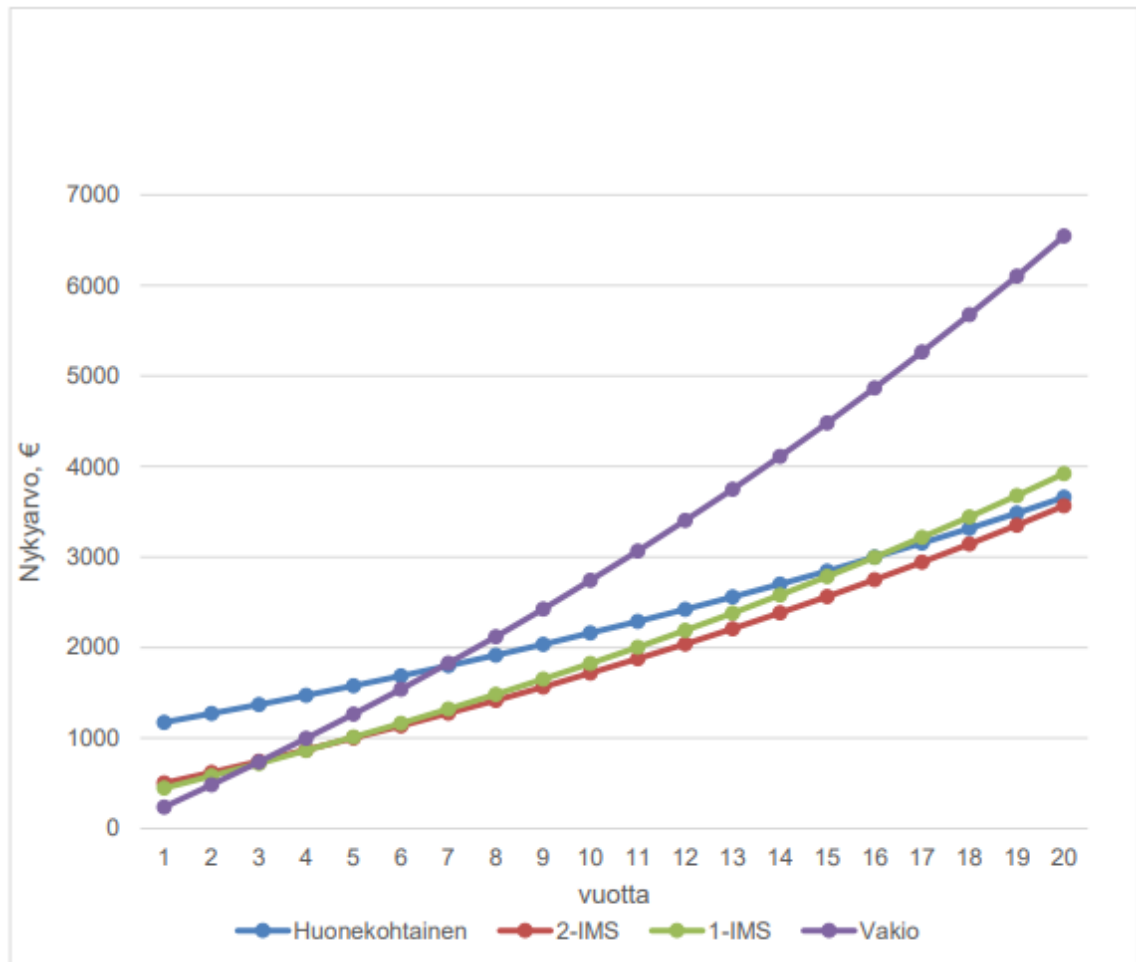
Tarkastellussa opinnäytetyössä lähtötilanteena on kuusi luokkahuonetta, joiden omat IMS-peltiparit ohjaavat tulo- ja poistoilmaa huonekohtaisesti. Huonekohtaisilla IMS-pelleillä toteutetusta ilmanvaihdosta on dataa viiden viikon käyttöjaksos ajalta, jonka pohjalta tehdään vertailuja laskennalliseen vuoden ajanjaksoon, jossa luokkien ilmanvaihdossa käytetään vakioilmanvaihtoa, 1 IMS-paria ja 2 IMS-paria. Ilmanvaihtokoneen puhaltimen käyntiaika on arkisin 15h ja viikonloppuisin 4h. Taulukosta 6 näkyvät laskelmat, jotka on saatu edellä mainituista tilanteista. (Tom Bergström 2021.)

| | Huone- kohtainen | 2-IMS | 1-IMS | Vakio |
|--|---------------------|-------|-------|--------|
| Tarkastelujakso [vuotta] | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Reaalinen laskentakorko [%] | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Sähkön hinta [€/MWh] | 70 | 70 | 70 | 70 |
| Kaukolämmön hinta [€/MWh] | 65 | 65 | 65 | 65 |
| Kaukolämmön reaalihinnan nousu [%] | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Sähköenergian reaalihinnan nousu [%] | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Lämmitysenergia R2–R7 [MWh] ¹⁾ | 7,572 | 8,752 | 9,526 | 16,459 |
| Lämmitysenergia 1-luokka [MWh] ²⁾ | 1,262 | 1,459 | 1,588 | 2,743 |
| Sähköenergia R2–R7 [MWh] ¹⁾ | 1,064 | 1,851 | 2,476 | 5,266 |
| Sähköenergia 1-luokka [MWh] ²⁾ | 0,177 | 0,309 | 0,413 | 0,878 |
| Investointikustannukset R2–R7 [€] ¹⁾ | 6480 | 2320 | 1340 | 0 |
| Investointikustannukset 1-luokka [€] ²⁾ | 1080 | 387 | 223 | 0 |
| Huoltokustannukset [€] | 0 | 0 | 0 | 0 |

Taulukko 6. Ilmanvaihdon energiankustannukset nykyarvolaskelmiin. 1) Arvot kaikille kuudelle luokalle. 2) Arvot yhdelle luokalle, jonka mukaan on tehty nykyarvolaskelma (Tom Bergström 2021).

Taulukkoa 6 tarkastellessa huomataan, että energian hinta vuonna 2021 on matala verrattaessa 2023 vuoden tasoon. Arvoja peilattaessa Wärtsilä-kampuksen on myös otettava huomioon erot ilmanvaihtokoneiden välillä. Taulukon 6 arvot on saatu ilmanvaihtokoneella, jonka lämmöntalteenoton hyötysuhde on 77,59% ja SFP-luku on 1,8 kW/(m³/s). Wärtsilä-kampuksen C-siipeä palveleva ilmanvaihtokoneen TK13 SFP-luku on 1,69 kW/(m³/s) ja lämmöntalteenoton hyötysuhde 81,8%, eli Wärtsilä-Kampuksessa sijaitseva ilmanvaihtokone on näistä kahdesta hieman energiatehokkaampi.

Kuviossa 14 käy ilmi Tom Bergströmin laskentojen perusteella saadut eri tilanteiden elinkaarikustannukset. Huonekohtaisilla IMS-pelleillä toteutettu ilmanvaihtojärjestelmä säästää elinkaarikustannuksissa (20 vuotta) laskelmien mukaan 40 % verrattaessa vakioilmavirralla toteutettuun järjestelmään. (Tom Bergström 2021.)



Kuvio 14. Eri ilmanvaihtojen elinkaarikustannukset yhdelle luokkahuoneelle (Tom Bergström 2021).

3.2.8 Yhteenveto eri toteutuksista

Kulutuksen säästämisen kannalta mikä vain tarkastelussa olleista kolmesta eri IMS-peltestä hyödyntävästä toteutuksesta maksaa itsensä takaisin hyvin nopeasti. Voidaan olettaa, että Wärtsilä-kampuksen C-siipeen tehtävä ilmanvaihtojärjestelmän uudistaminen IMS-peltestä käyttämällä tulee säästämään energiaa ja elinkaarikustannuksia etenkin aikoina, jolloin sähkönhintaa on ollut hyvin ailahteleva. Tom Bergströmin opinnäytetyön luokkahuoneiden mukaan tehdyt

laskelmat ovat verrattavissa Wärtsilä-kampuksen C-siiven 2. kerroksen tiloihin henkilömäärien ja kokonsa perusteella. Kummassakin tilanteessa on kyse ope- tuskäytössä olevista luokkahuoneista. Muuttujia näiden kahden eri kohteen vä- lillä on mahdollisesti tilojen käyttöaika, IV-koneen ominaisuudet ja sijainti eri il- mastovyöhykkeellä.

4 Pohdinta

Monien niin sanottujen älykkäiden laitteiden ja ratkaisuiden kustannukset saat- tavat ostovaiheessa tuntua maksajasta hyvinkin kalliilta verrattaessa niitä yksin- kertaisempiin vaihtoehtoihin. Elinkaarensa aikana nämä useimmiten maksavat itsensä takaisin tarjoten samanaikaisesti käyttäjälleen entistä miellyttävämmän käyttökokemuksen. Energiatehokkaita ratkaisuja suunnitellessa on kuitenkin pi- dettävä mielessä, että tilat ja niiden käyttäjät ovat erilaisia –esimerkiksi tila, jossa ei ole ikkunoita, ei tarvitse päivänvalo-ohjausta, eikä sähköpääkeskushuo- neeseen tai siivouskomeroon ole syytä suunnitella henkilömäärän tunnistavaa kameraa ohjaamaan ilmanvaihtoa.

Rakennusautomaation rooli kiinteistössä korostuu vuosi vuodelta yhä enem- män, kun halutaan, että rakennuksen ylläpitäminen on mahdollisimman kustan- nustehokasta. Rakennusautomaatiosta ja sen mahdollisuuksista tulisi olla tietoi- nen riippumatta siitä, mihin talotekniseen alaan onkaan erikoistunut – automaa- tio toimii yhdistävänä linkkinä eri taloteknisten alojen välillä.

Tiloissa olevat tiedonkeruulaitteet ovat huomaamattomia ja moni maallikko ei aavista, mitä haluttujen olosuhteiden ylläpitäminen vaatii järjestelmiltä. Kenttä- laitteet keräävät tiloista kokoajan analogista ja digitaalista tietoa, joiden avulla ohjataan kiinteistön järjestelmiä. Kerättyä tietoa voidaan hyödyntää muussakin kun taloteknisten- ja sähköisten järjestelmien ohjaamisessa. Keruulaitteista saa- dun datan avulla voidaan esimerkiksi valvoa luvatonta oleskelua tai liikkumista tiloissa, ennaltaehkäistä tulipalon syttymistä erilaisten ilmaisimien avulla tai mi- tata tilan käyttöastetta. Keruulaitteista saatu data voidaan myös ohjata digitaali- seen kaksoseen, jonka avulla myös vähemmän kokenut kiinteistön käyttäjä tai sen huoltaja saa visuaalisen näkemyksen siitä, mitä tiloissa tapahtuu.

Digitaalisesta kaksosesta on alettu puhumaan vasta lähivuosien aikana ja vielä hetki sitten edistyneemmät 3D digitaaliset kaksoset tuntuivat hyvinkin vieraalta. Nykyisin ne alkavat kuitenkin jo yleistyä. Digitaalisesta kaksosesta on hyötyä kiinteistön käyttäjille, suunnittelijoille ja sen huoltajille. Kentällä olevien laitteiden paikannus käy helpommin tai vaikkapa IV-kanavien sijaintien selvittäminen on hyvä vaihtoehto 2D kuvien katsomisen rinnalle. Suunnitellessa uutta, rakennuksesta luotu digitaalinen kaksonen mahdollistaa esimerkiksi tilavarauksien riittävyyden selvittämisen. On myös helpompi tarkastella törmäyksiä esimerkiksi LVI-suunnittelijan putkien ja sähköhylyjen välillä, kun ne esitetään erillisten 2D-kuvien sijaan yhteisessä 3D mallissa.

Opinnäytetyön alkuvaiheilla oli ajoittain vaikeaa keksiä työlle sopivat rajat. Energiatehokkuuden ja käyttäjän viihtyvyyden lisääminen on itsessään hyvin laaja aihealue, jota voidaan lähestyä monesta eri näkökulmasta. Taloteknisten ja sähköisten järjestelmien avulla luotujen olosuhteiden lisäksi tilan viihtyvyyteen vaikuttavat myös muutkin asiat, kuten tilan esteettisyys, akustiikka tai kalusteet. Sähköön erikoistuneena talotekniikan opiskelijana luonnollinen vaihtoehto oli ainakin perehtyä tarkemmin älykkääseen valaistusratkaisuun ja sen tuomiin hyötyihin.

Lähteet

- Digital Twin Consortium. 2023. What Is a Digital Twin? <https://www.digitaltwin-consortium.org/initiatives/the-definition-of-a-digital-twin/>. 3.3.2023.
- Granlund. 2023. Digital Twin. <https://www.granlund.fi/palvelut/digital-twin/>. 3.3.2023.
- Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171009>. 27.3.2023
- Fortum. 2023. Sähkösovimukset ja hinnat. <https://urly.fi/39eR>. 27.3.2023.
- Helvar. 2023a. Helvar Insights. <https://helvar.com/helvar-insights/>. 27.4.2023.
- Helvar. 2023b. 950 Reititin. <https://helvar.com/fi/product/950-router/#>. 18.3.2023.
- Helvar. 2023c. 321 Multisensori. <https://helvar.com/fi/product/321-multisensor/>. 18.3.2023.
- Helvar. 2023d. 13xx Moduulipaneelit. <https://helvar.com/fi/product/13xx-modular-panels/>. 18.3.2023.
- Motiva. 2022. Valaistus. https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kiinteiston_energiakaytto/valaistus. 13.1.2022.
- Nylund. 2023. PD4N-M-DACO-1C DALI-2. <https://nylund.fi/tuotteet/valaistuksen-ohjaus/dali-lasnaolotunnistimet/pd4n-m-daco-1c-dali-2/>. 18.3.2023.
- Process Genius. 2023. Mikä on digitaalinen kaksonen? <https://www.processgenius.fi/fi/mika-on-digitaalinen-kaksonen/>. 3.3.2023.
- Johanna Aatsalo. 2020. Tutkimus: Rakennusten digitaaliset kaksoiset edistyvät hitaasti – käyttäjät haluavat yksinkertaisuutta. <https://www.rakennuslehti.fi/2020/12/tutkimus-rakennusten-digitaaliset-kaksoiset-edistyvat-hitaasti-kayttajat-haluavat-yksinkertaisuutta/>. Rakennuslehti 18.12.2020.
- Talokeskus. Rakennusautomaatio – kohti parempaa energiatehokkuutta. 2023. <https://www.talokeskus.fi/rakennusautomaatio>. 18.1.2023.
- Tom Bergström. 2021. Tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla saavutettava sisäilman laatu ja energiansäästö koulun luokkahuoneissa. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Talotekniikka. Opinnäytetyö. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202202052137>. 12.11.2021.
- Työterveyslaitos. 2023. Sisäilma. <https://www.ttl.fi/teemat/tyohyvinvointi-ja-tyokyky/sisailma>. 18.1.2023.
- SFS-EN 12464-1. 2021. Valo ja valaistus. SFS Online. 27.3.2023
- ST-käsikirja 17. 2018. Rakennusautomaatiojärjestelmät. Sähköinfo Severi. 13.2.2023.
- ST-käsikirja 21. 2022. Taloteknisten järjestelmien tiedonsiirto. Sähköinfo Severi. 8.2.2023.
- ST 701.6. 2016. Talotekniikan kenttäväyläteknikka. Peruskäsitteet ja suunnittelun perusteita. Sähköinfo Severi. 8.2.2023.
- ST 709.00. 2017. Kiinteistön hallintajärjestelmien peruskäsitteet ja terminologia. Sähköinfo Severi. 8.2.2023.
- ST 710.00. 2020. Rakennusautomaatiojärjestelmän säädökset, määräykset, standardit ja ohjeet. Sähköinfo Severi. 10.2.2023.
- ST 710.01. 2016. Avointa väyläteknikkaa hyödyntävän hankkeen yleisohje. Sähköinfo Severi. 10.2.2023.