

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Pekka Gröhn

LED-valaisimen tuotekehitys

Diplomityö

2017

104 sivua ja 64 kuvaa.

Tarkastajat: Professori Aki Mikkola ja TkT Kimmo Kerkkänen

Hakusanat: LED, valaistus, DFMA

Tämän diplomityön tavoitteena oli perehtyä erilaisiin tapoihin tuottaa tasomaisia LED-valaisimia ja kehittää näiden pohjalta hissikorin valaisuun soveltuvia vaihtoehtoja. Näiden sovelluksien tärkeimpinä suunnittelua ohjaavina teemoina olivat rakenteen ohuus, valaisevan pinnan kirkkauden tasaisuus ja kokonaisuuden valmistusystävällisyys. Lisäksi, koska valaisimen tulisi soveltua eri kokoisille hisseille, pyrittiin suosimaan sellaisia rakenteellisia ratkaisuja, jotka mahdollistaisivat mahdollisimman helpon mittojen varioimisen.

Työn tavoitetta lähestyttiin aluksi LED-valaistusteknologiaan ja valmistusystävälliseen suunnitteluun pääasiassa perehtyvällä kirjallisuustutkimuksella. Tässä osiossa käytiin läpi käyttöön vakiintuneiden LED-ratkaisujen ja niiden perusteiden lisäksi myös aiheeseen liittyviä uusia kehittyviä teknologioita. Työssä jatkokehitykseen päädyttiin kuitenkin valitsemaan perinteisempää LED-teknologiaa hyödyntävät laidasta ja suoraan valaistut valaisinvariantit, koska näiden valmistuksessa tarvittavia komponentteja olisi luotettavasti ja suhteellisen edullisesti saatavilla.

Näiden valaisimien jatkokehitys toteutettiin suunnitteluprojektina KONE Industrial Oy:lle. Projektissa hyödynnettiin itse yrityksen sekä sen alihankintaverkoston asiantuntemusta aiheen saralta. Molempien valaisinvarianttien kehitysprosessissa päästiin ensimmäisiin prototyyppeihin asti. Näiden prototyyppien pohjalta tehtiin johtopäätökset siitä, mitä kaikkea näihin valaisimilleihin liittyen pitäisi vielä jatkojalostaa ennen niiden varsinaista tuotteistusta. Lisäksi koko suunnitteluprosessin pohjalta tehtiin huomioita liittyen yksityiskohtiin, joihin on syytä kiinnittää erityistä huomiota suunniteltaessa vastaavanlaisia tuotteita tulevaisuudessa.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Pekka Gröhn

LED ceiling product development

Master's thesis

2017

104 pages and 64 figures.

Examiners: Professor Aki Mikkola and D.Sc Kimmo Kerkkänen

Keywords: LED, lighting, DFMA

The goal of this master's thesis was to study different ways of creating LED light panels and to further develop these into a model suitable for elevator lighting. The design process was guided by principles of thin structuring, uniformly distributed luminous intensity and ease of manufacturing. Another goal was viability in elevator cars of varying sizes. This resulted in a preference for design features that allowed for the most dimensional variation.

Study began with research into the literature of LED lighting technologies and manufacturing friendly designs. This step included the study of established LED solutions as well as newer, emerging technologies in the field. Development ultimately proceeded with established models of side-lit and direct-lit luminaires, since their respective components were readily available and relatively economical to acquire.

Further development of these luminaire models was carried out as a design project for KONE Industrial Ltd. The project utilized the company's local expertise as well as that of its subcontractors. Both luminaires were developed to the first stages of prototype implementations. These prototypes were then observed to draw conclusions on what form of further development were required for productization. Furthermore, the development process as a whole was scrutinized for details that would require special care in future designs of similar products.

ALKUSANAT

Tässä kohtaa ilmeisesti yleensä kiitellään ihmisiä ja asioita tähän työhön ja vähän opiskeluun yleisestikin liittyen. Tästä listasta tulisi muuten omalla kohdallani hyvin massiivinen, joten pidän tämän tiiviinä, koska nimiä jäisi siltikin varmaan väkisinkin uupumaan. Vaikken siis ihmisiä nimiltä erittele, niin asianomaiset, jotka ovat kiitoksien kohteina, tietävät kyllä itse. Eli kiitoksia:

- KONE:n ja LUT:n puolilta tässä työssä osallisena olleille
- Opiskelukavereille (ja muillekin kavereille) menneistä ja tulevista vuosista
- Sukulaisille opintojen aikaisesta tuesta

Pekka Gröhn

Hyvinkäällä 5.12.2017

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO.....	9
1.1	Tavoitteet	10
1.2	Tutkimusmenetit.....	11
1.3	Rajaukset.....	11
2	LED-VALAISTUS.....	12
2.1	Toimintaperiaate	12
2.2	Rakenne	13
2.3	Ominaisuudet	17
2.3.1	Valoteho.....	17
2.3.2	Kestoikä	19
2.3.3	Aallonpituus.....	19
2.4	Valkoinen LED	20
2.4.1	CRI.....	23
2.4.2	Väriämpö	23
2.5	Muita LED-tyyppiä	25
2.5.1	OLED.....	25
2.5.2	QLED.....	27
2.6	LED-valaisintyyppiä	28
2.6.1	Laidasta valaistu	28
2.6.2	Suoraan valaistu	32
2.7	Rasterointi.....	33
2.8	DFMA	34
2.8.1	Modulaarisuus.....	36

3	SUUNNITTELUPROJEKTI	38
3.1	Vaatimukset ja toiveet	38
3.2	Valaistustapojen vertailu.....	38
3.2.1	Sivulta/laidalta valaistu (engl. side/edge-lit)	39
3.2.2	Suoraan valaistu (engl. direct lit).....	39
3.2.3	Tasolla/kalvolla valaistu	40
3.2.4	Valinnat jatkokehitykseen.....	40
4	CASE 1: SUORAAN VALAISTU	42
4.1	Periaate ja lähtökohdat.....	42
4.2	Osakokonaisuuksia	42
4.2.1	Runko.....	43
4.2.2	Kiinnityskomponentit	48
4.2.3	Näkyvä pinta	51
4.2.4	LED-komponentit	54
4.3	Prototyyppi.....	55
4.3.1	Rakenne	55
4.3.2	Testattavat asiat.....	63
5	CASE 2: LAIDASTA VALAISTU	64
5.1	Periaate ja lähtökohdat.....	64
5.2	Osakokonaisuuksia	64
5.2.1	Kerrosrakenne	65
5.2.2	LED-komponentit	66
5.2.3	Kehys	66
5.2.4	Kiinnityskomponentit	73
5.3	Prototyyppi.....	75
5.3.1	Rakenne	76
5.3.2	Testattavat asiat.....	78
6	TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI.....	80
6.1	Case 1 tulokset.....	80
6.1.1	Prototyypin yhteydessä tehtyjä havaintoja	80
6.1.2	Prototyypin pohjalta tehtyjä päätelmiä	89

6.1.3	Ennen tuotteistusta ratkaistavia asioita ja jatkokehityskohteita.....	91
6.2	Case 2 tulokset	92
6.2.1	Prototyypin yhteydessä tehtyjä havaintoja	92
6.2.2	Prototyypin pohjalta tehtyjä päätelmiä	96
6.2.3	Ennen tuotteistusta ratkaistavia asioita ja jatkokehityskohteita.....	97
7	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	98
	LÄHTEET	100

LYHENNELUETTELO

ABS	akryylinitriilibutadieenistyreeni
CRI	colour rendering index
DFMA	desing for manufacturing and assembly
HD	high-brightness
LCD	liquid crystal display
LED	light emitting diode
LGP	light guide plate
OLED	organic light emitting diode
PC	polykarbonaatti
PMMA	polymetyylimetakrylaatti (akryyli)
QLED	quantum dot light emitting diode
SMD	surface-mounted device

1 JOHDANTO

Tässä diplomityössä toteutetaan tuotekehitystä valaisimiin liittyen KONE Industrial Oy:lle. KONE on maailmanlaajuisesti toimiva hissien, liukuportaiden ja automaattiovien valmistaja, joka myös tarjoaa laajasti palveluita kyseisten tuotteiden ylläpitoon ja modernisointiin.

Kaiken minkä näemme, näemme valon ansiosta. Auringon tuottaman valon sijaan nyky maailma pyörii hyvin pitkälle ”keinotekoisesti” tuotetun valaistuksen ympärillä ja valoa pidetään eräänlaisena itsestäänselvyytenä tilassa kuin tilassa. Valaistusta säätämällä voidaan kuitenkin saada hyvinkin erilaisia vaikutelmia muuten samasta ympäristöstä. Tuotetun valon spektrin, voimakkuuden jne. vaikutuksesta voidaan esimerkiksi helpottaa erilaisten työtehtävien tekoa, välittää tietynlaista tunnelmaa tai vaikka korostaa erinäisiä objekteja. Tässä diplomityössä keskitytään erityisesti hissikorin valaisemiseen ledipohjaisilla valaisimilla, mutta tutustutaan myös valon ja valonlähteiden ominaisuuksiin hieman yleisemmälläkin tasolla.

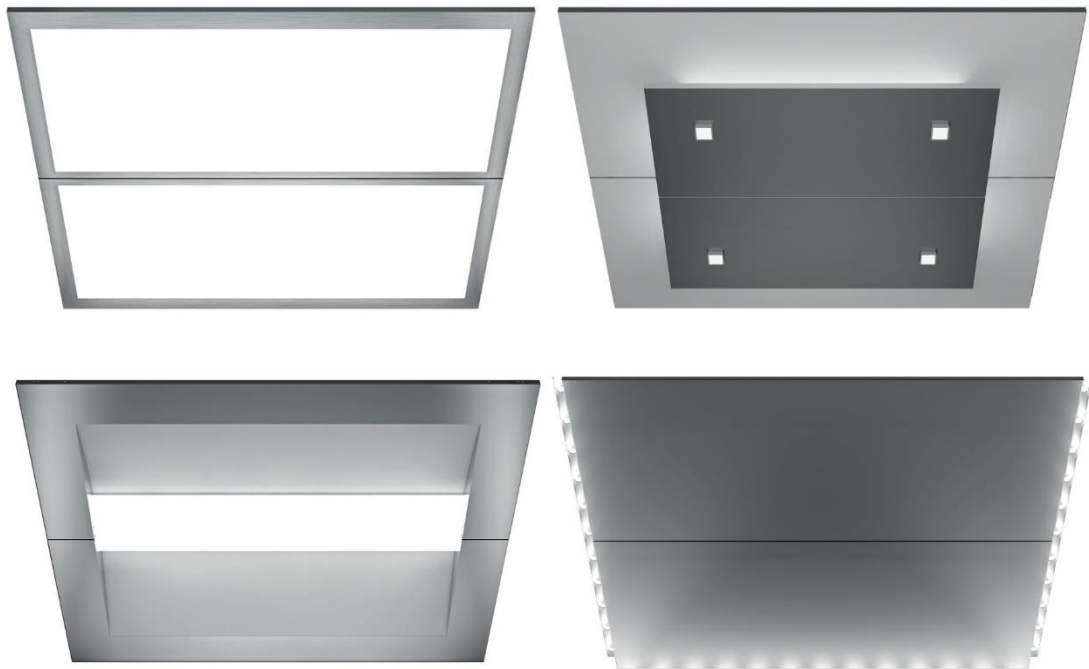
Hissi on pohjimmiltaan vain väline kuljettaa tavaroita ja ihmisiä vertikaalissa ulottuvuudessa. Korkeissa rakennuksissa, joiden määrä yhä tänä päivänäkin jatkaa kasvuaan, tämä kuitenkin tarkoittaa, että kyseisissä laitteissa vietetään suhteessa hyvin pitkiä ajanjaksoja. Henkilökuljetukseen pääasiassa tarkoitettu hissi on myös usein ensimmäinen asia johon rakennuksessa saavutaan eteisaulan jälkeen. Hissistä muodostuu näin yksi rakennuksen koetuimmista tiloista ja näin ollen se symboloi omalta osaltaan koko rakennuksen laatua tai vähintäänkin auttaa muodostamaan tietynlaisen vaikutelman siitä. Kyseisen tilan suunnitteluratkaisuja tehdessä onkin monessa tapauksessa annettava erityishuomiota ratkaisujen tuottamalle visuaaliselle ulkomuodolle ja vaikutelmalle. Tämän työn tarkoituksena onkin tutkia ja selvittää erilaisia vaihtoehtoja tietynlaisen valaistuksen tuottamiseksi niissä valmistus- ja huoltoystävällisyyttä kuitenkin unohtamatta.

Tämä edellä mainittu tietynlainen valaistus on suuri ja mahdollisimman yhtenäinen valaiseva pinta. Ulkonäöllisten seikkojen lisäksi tällaisen pinnan avulla pystyttäisiin vähentämään pistemäisten valonlähteiden kohdalla välillä ongelmaksi nousevaa korkean intensiteetin aiheuttamaa silmälle epämiellyttävää häikäisyä. Koska hissejä valmistetaan tiettyjen

standardikokojen lisäksi usein myös omilla yksilöllisillä mitoillaan, ja suuren tarkoituksessa tässä tapauksessa lähes koko hissikorin sisäkaton kattavaa, tarvitsee tämän valaisevan pinnan olla mitoiltaan ja mahdollisesti myös muodoiltaan varioituvissa näiden käyttökohteiden vaatimusten mukaisesti. Normaaleja, usein n. 2-4 neliometriä pinta-alaltaan olevia, koreja suurempiin siirryttäessä tämä todennäköisesti tulisi siis tarkoittamaan useammasta paneelista koostuvaa rakennekokonaisuutta.

1.1 Tavoitteet

Valaiseviin pintoihin perustuva valaisu ei tietenkään ole täysin uusi ilmiö hisseissä, vaikkakin valaisinteknologian kehityksen myötä vasta suhteellisen lähiaikoina esille tullut vaihtoehto. Tämän työn tavoitteena onkin perehtyä uusimpiin kehityksen käännteisiin valaisinteknologian saralla ja tarjota mahdollisia vaihtoehtoisia tapoja tuottaa kyseisenlaisia ratkaisuja vanhojen jo olemassa olevien sijaan. Mikäli nämä vaihtoehdot eivät menesty vertailussa nykyisten mallien kanssa, tutkimuksen fokus siirtyy näiden jo olemassa olevien kehittämiseen. Tavoitteena projektissa olisi siis saada laajempi kuva nykyisin tarjolla olevista valaisinvaihtoehdoista ja mahdollisimman pitkälle asti suunniteltu valaisinehdotelma.



Kuva 1. KONE:n tuotevalikoimasta löytyviä hissikorin LED-valaisimia [mukaillen 1].

1.2 Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksen kirjallisuustutkimuksellisessa osiossa hyödynnetään mahdollisimman tuoreita tieteellisiä artikkeleja, kirjoja ja muita luotettaviksi arvioituja lähteitä. Näiden etsimisessä hyödynnetään niin yliopiston Finna-tietokantaa, kuin myös erinäisten alan yhteisöjen ja kaupallisten toimijoiden jakamaa informaatiota. Näin saavutettuja tietoja pyritään myös vertaamaan toisiinsa aktiivisesti vanhaksi menneen tai muuten virheellisen tiedon karsimiseksi, sillä kehitys usean aiheeseen liittyvän osakokonaisuuden kohdalla on hyvinkin hektistä.

Suunnitteluprojektissa pyritään näiden taustatietojen perusteella järjestelmällisen koneensuunnittelun oppeja hyödyntäen kehittämään halutut ominaisuudet ja ehdot täyttävä lopputuote. Projektissa tullaan myös rakentamaan prototyyppejä erinäisten ominaisuuksien ja vuorovaikutusten testaamiseksi ja ratkaisujen validoimiseksi. Suunnittelussa myös hyödynnetään niin yrityksen paikallista asiantuntemusta koneen- ja valaisinsuunnittelun saralla, kuin mahdollisesti erinäisten ammatillisten kontaktien tietotaitoa.

1.3 Rajaukset

Tämän työn suurimpana rajauksena voidaan pitää keskittymistä valon tuottamiseen ledien avulla tasomaisesti hissikorin sisätilan alueelle. Tuotetussa valossa keskitytään pääasiassa valkoiseen valoon ja mahdolliset muut värit jätetään enimmäkseen tuoterakenteen mahdollisesti mahdollistamiin jatkokehityskohteisiin. Valkoisen valon eri värielämykset, tasaisuus ja laatu kuuluvat kuitenkin rajauksen piiriin. Valon säätö ja ohjaus on pääasiassa jätetty työn rajauksen ulkopuolelle, mutta valaisimen komponenttien valaisuvoimakkuuden tulee olla säädettävissä. Valaisimen kiinnityksessä rajaus on tehty sen rajapintaan sisäkaton kanssa. Valaisimessa itsessään kiinni olevat kiinnityskomponentit, joiden avulla se voidaan kiinnittää, avata tai tarvittaessa tukea, sisältyvät vielä työn laajuuteen, mutta sisäkattoon asennettavissa rakenteissa tehdään muutoksia vain mikäli niissä olevia edellä mainittujen kiinnikkeiden vastakappaleita tarvitsee muokata.

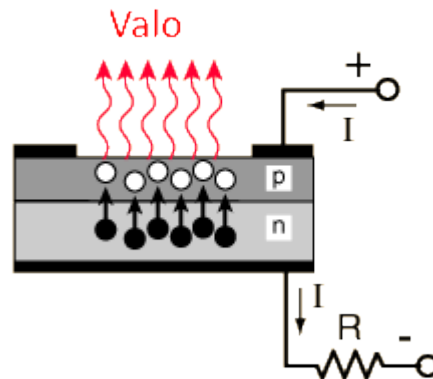
2 LED-VALAISTUS

LED on lyhenne englanninkielisistä sanoista Light Emitting Diode eli valoa säteilevä diodi. Ensimmäiset LEDit kehiteltiin 60-luvulla, mutta yleisempään käyttöön ne tulivat vasta 70-luvun puolella. Nämä alkuaikojen LEDit olivat valoteholtaan varsin vaatimattomia ja väri vaihtoehdoiltaan rajoittuneita. Niitä hyödynnettiin pääasiassa erinäisissä valokylteissä, merkkivaloissa yms. Ajan myötä LED-teknologia on kuitenkin kehittynyt huomattavasti ja tänä päivänä varsinkin valkoisen valon tehokkaan tuoton mahdollistuttua on siitä tullut varteenotettava vaihtoehto lähes mihin tahansa valaisinsovellukseen.

Tässä kappaleessa perehdytään ensin LEDien toimintaperiaatteisiin, fyysisiin rakenteisiin ja käytön kannalta oleellisiin ominaisuuksiin. Lisäksi tämän jälkeen esitellään muutama tämän teknologian alaluokka ja käydään läpi mitä erilaisia periaatteellisia ratkaisuja on tuottanut tässä projektissa halutunlainen valaistus LEDien avulla. Tämän jälkeen esitellään lyhyesti rasteroinnin periaate, sillä kyseistä menetelmää hyödynnetään useissa valaisimien optisissa osissa. Lopuksi käydään läpi yleisemmällä tasolla valmistus- ja kokoonpanoystävällisen suunnittelun periaatteita työn suunnitteluprojektin pohjustukseksi.

2.1 Toimintaperiaate

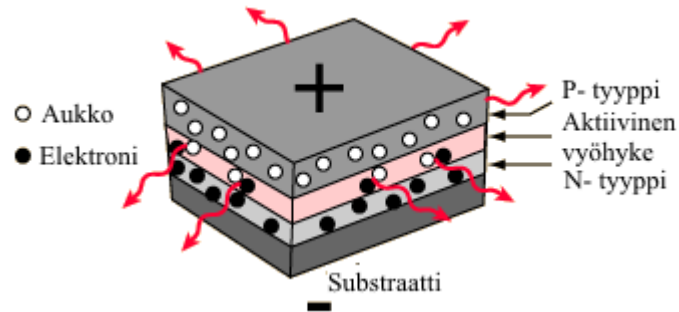
LEDit ovat puolijohteita, jotka tuottavat valoa kun niistä johdetaan läpi sähkövirtaa (I). Niiden toiminta perustuu P-tyypin eli positiivisesti varautuneen ja N-tyypin eli negatiivisesti varautuneen materiaalin vuorovaikutukseen. Tällaisen yhdistelmän läpi voidaan johtaa sähkövirtaa vain yhteen suuntaan (päästösuuntaan) ja näin tehtäessä negatiivisesti varautuneen puolen vapaat elektronit yhdistyvät positiivisen puolen ”aukkojen” kanssa vapauttaen fotoneita. Nämä fotonit voivat puolestaan ilmentyä aallonpituudesta riippuen esimerkiksi näkyvänä valona. Kuvassa 2 on havainnollistettu tämä mekanismi. [2, 3, 4, 5]



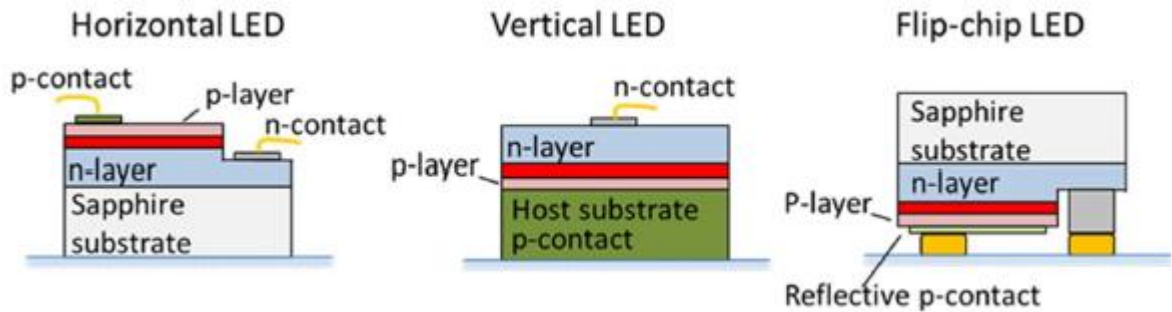
Kuva 2. LEDin toimintaperiaate [mukaiillen 4].

2.2 Rakenne

LED-valaisimen rakenteen voi jakaa karkeasti neljälle tasolle, vaikkakin paikoittain lähteestä riippuen osissa kohtia tämä jaottelu ja termistö voi olla hieman päällekkäin menevää. Alimmalla tasolla valoa tuottavana ytimenä on itse LED-laatta (engl. LED die). Tämä laatta voi yksikertaisimmillaan koostua, kuten kuvassa 3 oleva esimerkki, pinoon kasatuista p- ja n-tyyppin puolijohdemateriaaleista, niiden välille sijoittuvasta aktiivisesta vyöhykkeestä (engl. active region) ja alustasta. Vaikka peruseriaate pysyykin samana erilaisissa laatoissa, voidaan siinä olevia materiaaleja kasata useilla eri tavoilla. Kuvassa 4 on esitetty yleisiä suurteholedissä käytettäviä laattavariaatioita. Kuvassa punaisella kuvatut kerrokset ovat laattojen aktiivisia säteileviä alueita, joissa valon ja lämmön tuotto tapahtuu. Ensimmäisessä variantissa (horizontal LED) koko laatan sähkövirran kierto on eristetty jo valmiiksi safiiralustan toimesta ja täten mahdollistaa sirun pohjan käyttämisen suoraan jäähdytykseen. Kaksi muuta tarvitsee erikseen eristää alustan puolelta, koska niissä sähköisessä kontaktissa hyödynnetään pohjan puolta toisin kuin ensimmäisessä, jossa erilliset kontaktit tarvitsee vetää pinon ulkopuolelta sekä p- että n-tasoille. [2, 6, 7]



Kuva 3. Yksinkertainen pinnoon kasattu LED-laatan rakenne [mukaillen 7].



Kuva 4. Yleisiä suurteholedissä käytettyjä laattavariaatioita (contact = kontakti, layer = taso, sapphire = safiiri, substrate = substraatti, reflective = heijastava, horizontal = horisontaalinen, vertical = vertikaalinen, flip-chip = käänteissiru) [2].

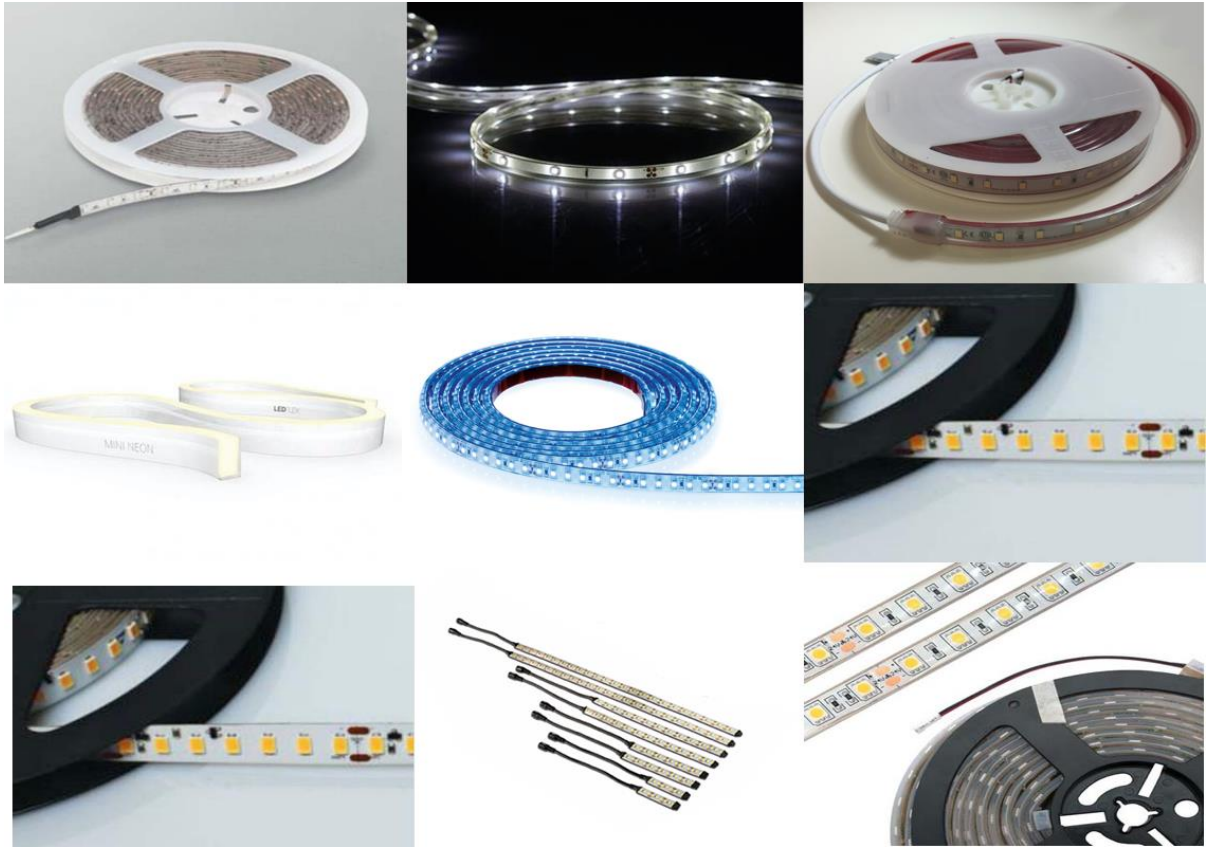
Seuraavana tasona voidaan pitää LED-pakkausta (engl. LED package). Tässä vaiheessa vaihtoehdot moninkertaistuvat entisestään, mutta periaatteellisella tasolla pakkauksen tehtävänä on tarjota sen ytimenä toimivalle LED-laatalle suojaava valoa läpi päästävä kerros, joka myös mahdollisesti suuntaa syntyvää valoa ja muuttaa sen väriä, lämpönielu (engl. heat sink/ heat slug) helpottamaan syntyvän lämmön sietoa ja johtumista laatalta pois päin, sekä näiden, ja muiden mahdollisten kokonaisuutta tukevien rakenteiden, läpi vievät kontaktipinnat sähkökytkentää varten. Kuvassa 5 on esitetty kaksi erilaista LED-pakkausesimerkkiä. Nämä molemmat esimerkit ovat nk. pintaan asennettuja laitteita (engl. surface-mounted device, SMD) eli ne asennetaan tasaisella eristävällä tasolla sijaitsevaan virtapiiriin, eli yleensä jonkinlaiseen hyvin ohueen piirilevyyn. Periaatteellisella tasolla vastaavanlaisia ovat myös yleisimmin

valaistuksen yhteydessä käytettävät kokoonpanot eli korkean kirkkauden (engl. high-brightness, HB) LEDit, jotka voidaan joissain tapauksissa myös laskea omaksi luokakseen. Suurimpana erona SMD-LEDeihin nämä vain yleensä omaavat suuremmat dimensiot, kehittyneemmän optisen järjestelmän ja suuremmille lämmöntuotoille soveltuvan jäähdytyksen. Näiden lisäksi LED pakkaukset voivat olla esimerkiksi kapselimaisia, kuten useissa merkki- ja infrapunavalosovelluksissa käytettävät ovat. [3, 6, 8]

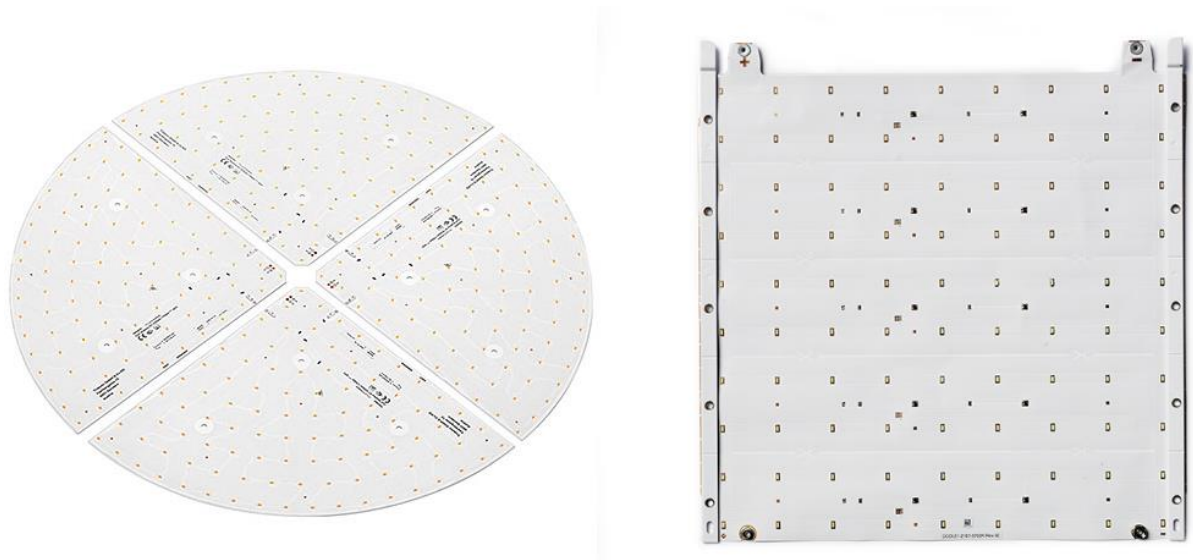


Kuva 5. Kaksi erilaista LED-pakkausesimerkkiä (Heat Slug = lämpönielu, or = tai) [mukailten 3 ja 6].

Kolmantena tasona voidaan pitää LED-moduuleita (engl. LED module). Näiden ja LED-pakkauksien välinen raja voi joskus olla hieman häilyvä, sillä jotkin korkean kirkkauden LED-pakkaukset saattavat jo itsessään olla tarpeeksi tehokkaita ja omata tarvittavat optiikat moduulina toimiakseen. Suurin osa LED-moduuleista kuitenkin koostuu useista LED-pakkauksista, näitä yhdistävästä virtapiiristä ja mahdollisista LEDin toimintaa jollain tavoin edesauttavista optisista, mekaanisista tai elektronisista komponenteista. Eräinä esimerkkeinä tällaisista moduuleista voitaisiin pitää vaikka muiden valaisinmuotojen lamppujen korvaamista varten muotoiltuja LED-moduuleita. Tällaisten perinteisten lamppujen dimensioita noudattavien moduulien lisäksi LED-teknologia myös mahdollistaa aivan uudenlaisia muotoiluvaihtoehtoja. Esimerkiksi sarjaan kytketyt LED-pakkaukset, jotka on kiinnitetty erinäisiin tasomaisiin taustoihin, ovat avanneet monia uusia tapoja suunnitella valaisimia. Nauhamaiseen taustaan kiinnitetyistä, eli LED-nauhoista (engl. LED strips), on esimerkkejä kuvassa 6 ja tasomaisemmista varianteista kuvassa 7. [3, 6, 8]



Kuva 6. Erilaisia nauhamaisia LED-moduuleja [9].



Kuva 7. Esimerkkejä levymäisistä LED-moduuleista [mukaiillen 10 ja 11].

Viimeisenä tasona voidaan pitää itse LED-valaisinta (engl. LED luminaire). Tällainen valaisin koostuu yhdestä tai useammasta LED-moduulista, niiden ohjaukseen käytettävästä laitteistosta ja hyvin tapauskohtaisesti muista komponenteista. Variaatioita on tietysti todella suuri määrä, mutta tällaisia komponentteja voivat olla esimerkiksi erinäiset heijastimet (engl. reflectors), linssit, diffuuserit (engl. diffusers) tai muut mahdolliset optiikkaan liittyvät osat, joiden avulla valon lopullinen suuntaus ja laatu saavutetaan. Muita usein löytyviä osia ovat erinäiset lämmönhallintaan liittyvät komponentit, visuaalista ulkomuotoa varten lisätyt koristeet ja tietysti kaikki nämä yhdistävä ja kasassa pitävä runko. [2, 3]

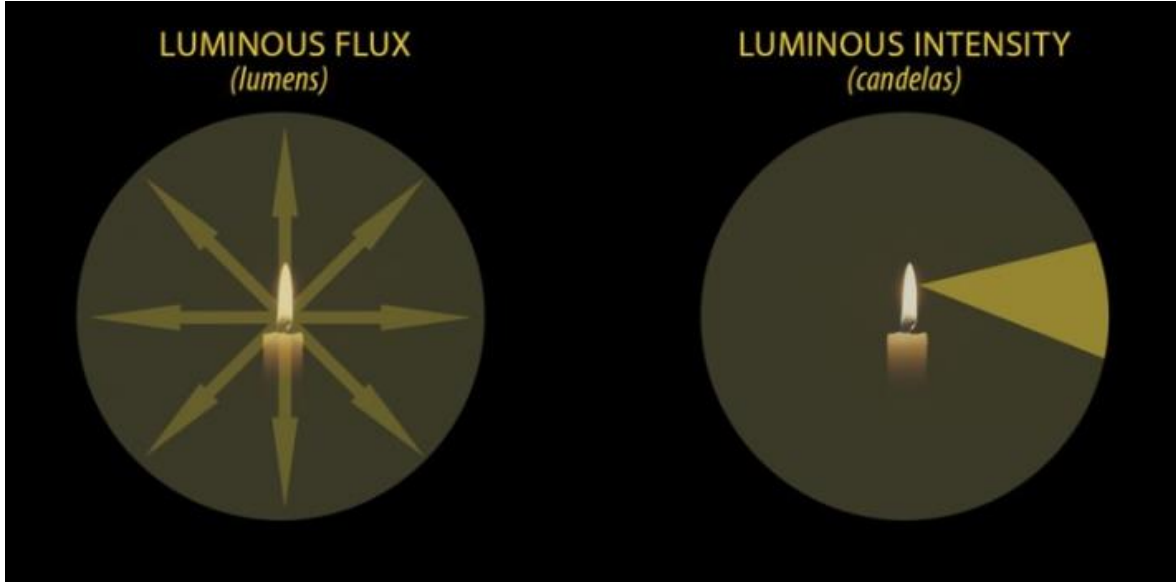
LED-moduulien liitännätyyppin mukaan ne voidaan jakaa kolmeen osaan suhteessa valaisimeen. Kiinteät moduulit (engl. integral) ovat nimensä mukaisesti pääasiassa kiinteä osa kokonaisuutta ja eivät ole vaihdettavissa tai niitä ei ole ainakaan tarkoitettu vaihdettavaksi. Sisäänrakennetut (engl. built-in) moduulit on suunniteltu pääasiassa vaihdettaviksi komponenteiksi valaisimen sisällä, mutta ei toimimaan itsenäisesti. Tämä kategoria pitää sisällään esimerkiksi suurimman osan muiden valaisintyyppien lappujen korvikkeiksi suunnitelluista komponenteista. Itsenäiset (engl. independent) moduulit on suunniteltu niin että niiden käyttö valaisimen ulkopuolella on mahdollista. [3]

2.3 Ominaisuudet

Tässä osiossa käydään aluksi lyhyesti läpi valon voimakkuuteen yleisesti liittyviä määreitä ja sen jälkeen tarkemmin juuri LEDien kohdalla esiintyviä tärkeimpiä ominaisuuksia.

2.3.1 Valoteho

Valovirta (engl. luminous flux) määrittää valomäärää, eli esimerkiksi paljonko valoa valaisin tuottaa. Näin mitattu valomäärä kuitenkin rajoittuu nk. näkyvään valoon, eli n. 380 – 780 nm aallonpituuksiseen säteilyyn. Koska valoteho määrittää vain kohteen tuottaman valon absoluuttista määrää, tarvitaan sen lisäksi usein muita määreitä puhuttaessa siitä millaisena valaistus käytännössä ilmenee. Yksi tällaisista määreistä on valon intensiteetti (engl. luminous intensity). Se kuvaa sitä, kuinka suuri määrä valovirrasta kohdistuu tiettyyn suuntaan. Havainnolliste näistä kuvassa 8. [12, 13]



Kuva 8. Valovirran ja valon intensiteetin käsitteet havainnollistettuna (Luminous flux = valovirta, luminous intensity = valon intensiteetti) [13].

Siinä missä valovirtaa ja intensiteettiä käytetään usein valaisinkomponentteja ja valaisimia vertaillen, tilojen valaistusasteesta puhuttaessa yleisesti käytetty määre on valaistusvoimakkuus (engl. illuminance). Valaistusvoimakkuus kuvaa sitä, kuinka suuri valovirta osuu tietylle alueelle. Usein esimerkiksi erinäiset säädökset ja standardit ilmoittavatkin juuri eri tiloille raja-arvoja valaistusvoimakkuuden arvoina. [12, 14]

Valon intensiteetin yksikkönä käytetään yleisesti kandela (cd). Kandela on SI-järjestelmän perusyksikkö, ja se on määritelty sellaisen säteilijän valovoimaksi, joka säteilee monokromaattista $540 \cdot 10^{12}$ Hz taajuista sähkömagneettista säteilyä $1/683$ W/sr säteilyintensiteetillä tiettyyn suuntaan. Tämä arvo juontaa juurensa vanhaan yksikköön, joka oli määritelty yksittäisen kynttilän tuottaman intensiteetin mukaan, mutta määrittää yksikön arvon hyvin paljon tarkemmin. Valovirran yksikkönä puolestaan on lumen (lm) ja yksi lumen vastaa valomäärää, jonka 1 kandelan teholla steradianin suuntaan säteilevä valonlähde tuottaa. Valaistusvoimakkuuden yksikkönä käytetään luksia (lx). Yksi lux vastaa yhden lumenin valovirran osumista neliömetrin pinta-alalle. [12, 13]

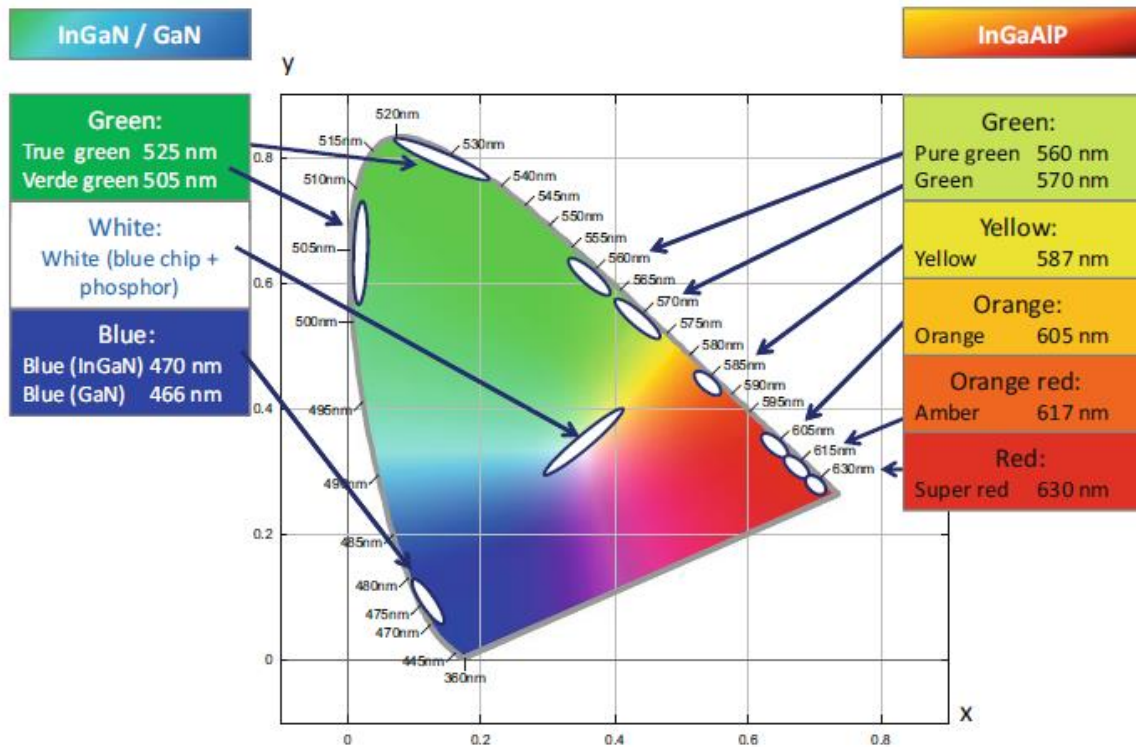
2.3.2 Kestoikä

LEDeistä puhuttaessa usein yhdeksi niiden tärkeimmistä eduista nostetaan esiin niiden pitkäikäisyys. Toisin kuin monilla muilla valonlähteillä, LEDien elinikä ei yleensä pääty niiden toiminnan lakkaamiseen, vaan niiden tuottaman valotehon laskemiseen alle jonkin tietyn määritellyn rajan. Koska LEDit voivat esimerkiksi toimia vielä menetettyään yli 90% niiden alkuperäisestä valotehosta, on edellä mainittujen rajojen määrittely tärkeää keskusteltaessa LEDien käytännöllisistä kestoijista. Yleisimmin käytettyjä tällaisia rajoja ovat 90%, 80% ja 70% alkuperäisestä valotehosta. Näihin asteikkoihin on myös syytä kiinnittää huomiota LEDejä vertaillessa, sillä esimerkiksi 50 000h kestoian 90% asteikolla omaava LED on todellisuudessa huomattavasti paremman kestoian omaava, kuin 80 000h 70% asteikolla omaava. [3, 8]

LEDien kestoikien määrittelyssä käytetään lyhempiä mittausaikoja, kuten esimerkiksi 6 000h, joista lopulliset tulokset ekstrapoloidaan. Nämä mittaukset myös tehdään hyvin hallituissa olosuhteissa, joissa esimerkiksi lämpötila on aina 25°C. Todellisuudessa näin saatujen tuloksien toteutuminen ei siis ole aina taattua, sillä esimerkiksi kyseinen lämpötila nousee usein käytössä korkeammaksi ja LEDeihin voi kohdistua erinäisiä muita ylimääräisiä rasituksia esimerkiksi johtuen mekaanisista voimista tai kosteudesta. Lisäksi itse LED-laatan vaurioitumisen lisäksi esimerkiksi käytetyt muut materiaalit, kuten fosforipinnoite tai sähköä johtavat komponentit voivat kulua ja laskea kokonaisuuden kestoikää. Edellä mainitun fosforikerroksen värjäytyminen sen altistuessa pitkäaikaiselle LEDistä säteilevälle lämpörasitukselle esimerkiksi voi muuttaa tuotetun valon väriä ja täten tuottaa ongelmia useissa sovelluksissa. [2, 6, 8]

2.3.3 Aallonpituus

LEDien säteilemä valon aallonpituus riippuu niissä käytetyistä materiaaleista. Kun LEDin aktiivisella vyöhykkeellä vapaat elektronit yhdistyvät positiivisen puolen ”aukkoihin”, näin vapautuvan energian suuruudesta riippuu niiden vapauttaman säteilyn aallonpituus. Täten valitsemalla materiaaleja sen mukaan, että näin saadaan vapautettua haluttu määrä energiaa, voidaan hallita tuotetun valon väriä. Kuvassa 9 on esitetty esimerkkejä siitä, millaisten värien tuottamiseen käytetään mitään materiaaleja. [15, 16]

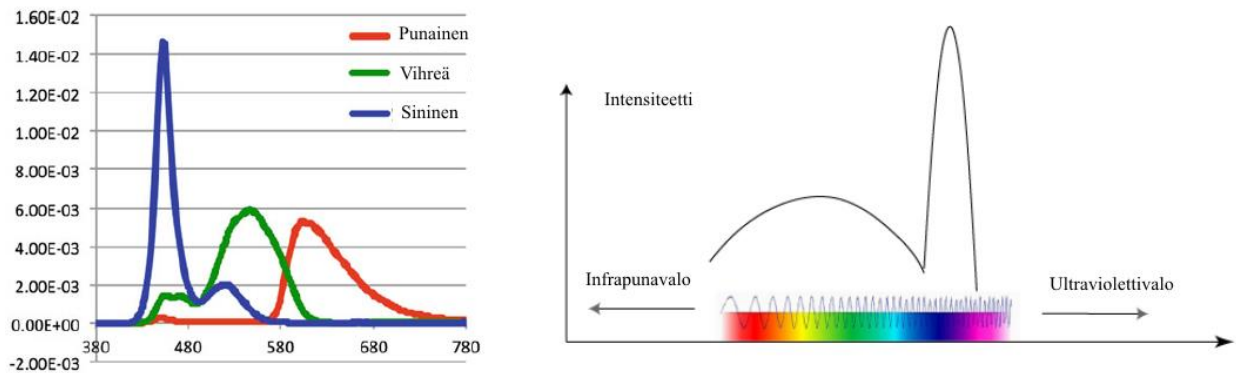


Kuva 9. Eri värien tuottamiseen käytettyjä materiaaleja LEDeissä (Green = vihreä, pure = puhdas, true = todellinen, chip = siru, yellow = keltainen, white = valkoinen, yellow = keltainen, blue = sininen, orange = oranssi, red = punainen, amber = meripihka, phosphor = fosfori) [15].

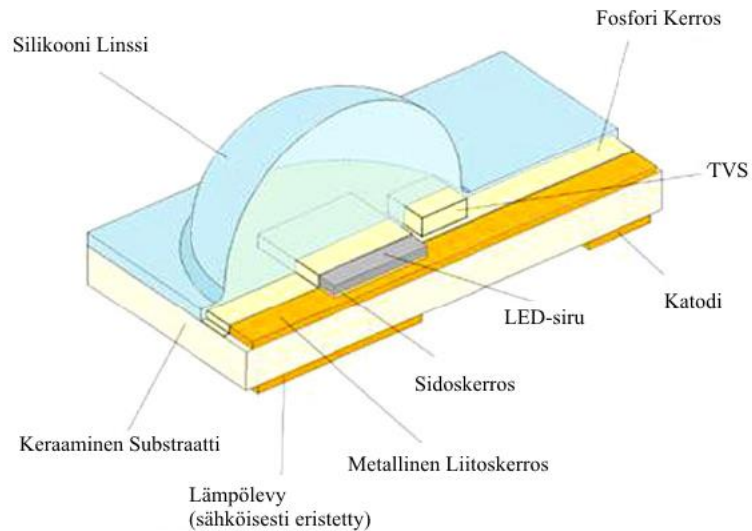
2.4 Valkoinen LED

Valkoinen valo on valoa, joka sisältää kaikkia valon aallonpituuksia. Nykyisin käytössä olevat LEDit eivät pohjimmiltaan kykene tuottamaan tällaista valoa, mutta valkoisen valon saavuttamiseen niiden avulla on kuitenkin kaksi pääasiallista tapaa. Ensimmäinen tapa on yhdistää useampia eri valon lähteitä ja pyrkiä saavuttamaan näiden yhdistelmällä mahdollisimman tarkasti kaikkia valon näkyviä aallonpituuksia tasaisesti sisältävä spektri. Yleisin esimerkki tästä on käyttää vihreää, sinistä ja punaista valoa tuottavia LEDejä. Tällaisen yhdistelmän mukanaan tuoma etu on mahdollisuus muokata tuotettua väriä muuttamalla näiden eri LEDien voimakkuuksia suhteessa toisiinsa. Toisaalta näin saatu valkoinen valo ei tietenkään ole täysin tasalaatuista, vaan sen spektrissä on erinäisiä huippukohtia, kuten kuvan 10 vasemmanpuoleisessa esimerkijakaumassa. Toinen tapa on johtaa LEDin valo jonkin väliaineen läpi valkoisen valon spektrin saavuttamiseksi. Tällä periaatteella toimivat LEDit ovat

lähes poikkeuksetta sinistä valoa tuottavia LEDejä, joiden valo johdetaan fosforikerroksen läpi. Tällaisen valon kohdalla ongelmana on sinisen valon voimakkuus suhteessa muihin värisävyihin, esimerkki tällaisesta spektrijakaumasta kuvan 10 oikeassa laidassa. Tämä jälkimmäinen menetelmä on hyvin laajasti valaistusteollisuuden käytössä tapauksissa, joissa pääasiallisena tavoitteena on juurikin vain tuottaa valkoista valoa. Esimerkkikuvaus tällaista valoa tuottavasta sirusta kuvassa 11. [2, 8, 17]

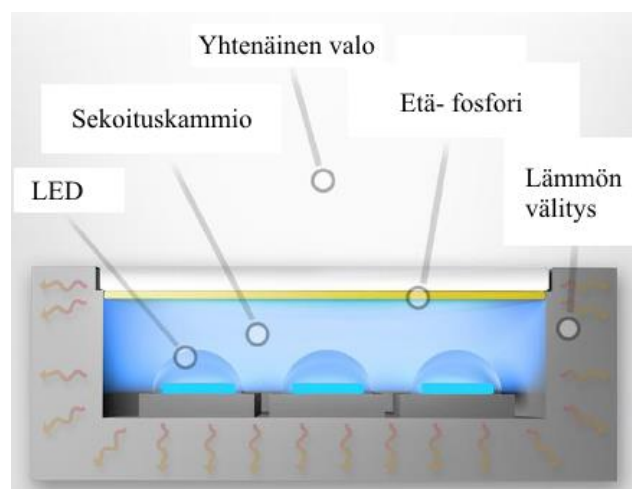


Kuva 10. LEDien eri menetelmillä tuottamien valkoisten valojen spektrit. Vasemmalla oleva spektri kuvaa punaisen, vihreän ja sinisen LEDin yhdistämällä tuotettua spektriä ja oikealla oleva fosforilla päällystetyllä sinisellä LEDillä tuotettua. [mukaiillen 8 ja 17]



Kuva 11. Esimerkki valkoista valoa tuottavasta LED-pakkauksesta [mukaillen 3].

Haasteena valkoisen valon tuottamiselle johtamalla sinisen LEDin valo fosforikerroksen läpi on käytetyn fosforikerroksen tasalaatuisuus ja kestävyys. Esimerkiksi LEDin tuottama lämpö voi riittää kuluttamaan fosforikerrosta, jolloin tuotetussa valossa ilmenee väri vaihtelua. Yksi tapa ratkaista tällainen ongelma on käyttää etäfosforimenetelmää (engl. remote phosphor), jossa fosforikerros asemoidaan erilleen LED-sirusta. Esimerkki tällaisesta ratkaisusta kuvassa 12. [3, 17]



Kuva 12. Valkoista valoa tuottava LED-ratkaisu, jossa käytetty fosforikerros on asetettu erilleen LED-siruista [mukaillen 3].

2.4.1 CRI

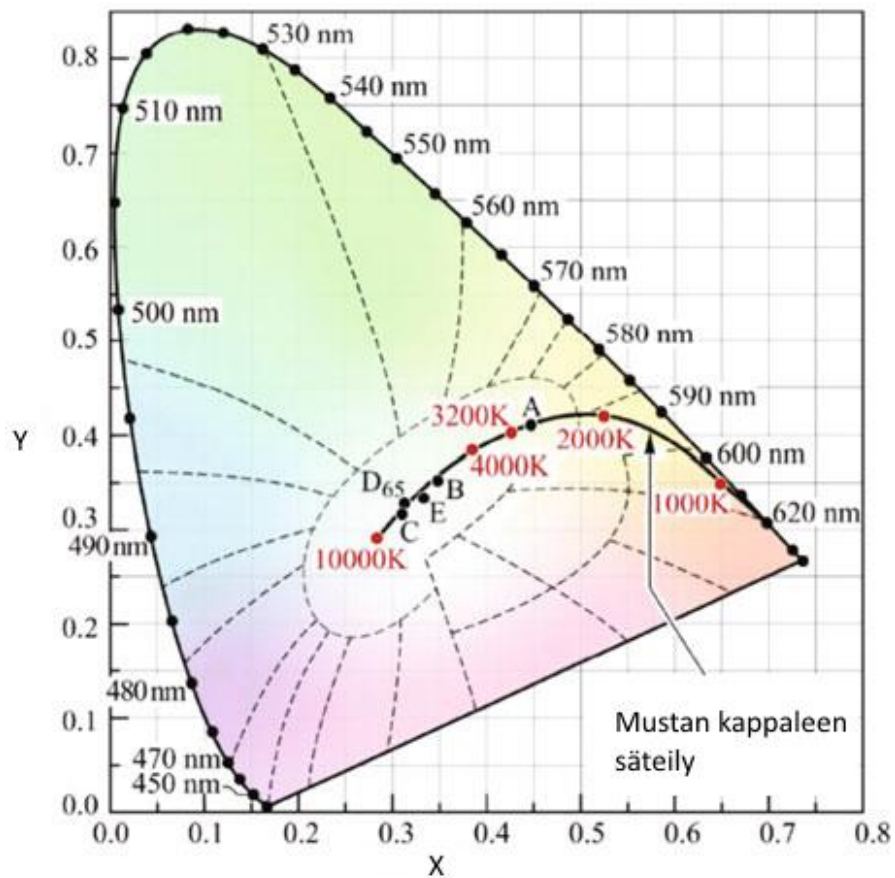
Valon renderöinti-indeksi (engl. Colour Rendering Index, CRI) kuvaa valon kykyä tuottaa mahdollisimman tarkasti ideaalisen tai luonnollisen valonlähteen mukaisesti värejä. Toisin sanoen valkoista valoa tuottavien LEDien kohdalla tämä tarkoittaa sitä kuinka hyvin näiden valon spektri vastaa luonnollisen valkoisen valon spektriä. Johtuen valkoisen valon tuotossa aiheutuvista huippukohtista niiden spektriin, esimerkiksi sinisen LEDin ja fosforin yhdistelmässä sinisen ja keltaisen kohdilla, on tällaisten valojen CRI-luokitus kohtalaisen alhainen. Tätä ongelmaa on pyritty ratkaisemaan esimerkiksi käyttämällä erilaisia fosforyhdistelmiä ja lisäämällä punaisia siruja, mutta näiden kohdalla kokonaisuuden valoteho kärsii. Tästä johtuen valkoisten LEDien kohdalla joudutaan joissain tapauksissa valitsemaan suuremman valotehon ja paremman CRI:n väliltä. [2, 3, 16]

CRI ei ole kriittinen suure tarkkailtaessa valoa suoraan, mutta koska valkoisia LEDejä käytetään usein valaistuksen yhteydessä, nousee se tärkeään rooliin. Hyvinkin heikon CRI:n omaava valaisimen valo voi näyttää silmään samalta kuin todella korkean CRI:n, kun sitä tarkastellaan suoraan. Pääasiallinen ero tulee vastaan tarkkailtaessa valon käyttäytymistä sen heijastuessa. Tällaisessa tilanteessa valon spektri vaikuttaa siihen minkä värisenä sen avulla valaistut asiat nähdään. Tämä johtuu siitä, että valon osuessa kohteeseen se voi joko absorboitua siihen tai heijastua. Näistä heijastumista muodostuu kappaleen havaittava väri. Täten mikäli osuvasta valosta puuttuu joitakin aallonpituuksia, ei kyseisiä aallonpituuksia myöskään heijastu. Näin ollen sama kappale voidaan havaita hyvinkin erilaisena siihen osuvan valon spektristä riippuen. [2, 8, 18]

2.4.2 Väriämpö

Koska valkoisena havaittu valo voi vaihdella ominaisuuksiltaan varsin huomattavasti, pyritään sen laatua usein määrittelemään erinäisillä tarkentavilla määreillä. Valaisimista puhuttaessa tällöin käytetään usein termiä väriämpötila. Väriämpötila on määritelty sen mukaan minkä tyyppistä valoa sellainen ideaalinen musta kappale säteilee, jonka pintalämpötila on kelvineinä kyseisen suuruinen. Kuvassa 13 on esitettyä erilaisten väriämpötilojen sijoittuminen kromaattiseen koordinaatistoon. Kuten kyseisestä kuvasta voidaan havaita, matalat

väriämpötilat alkavat koordinaatiston punertavasta osasta ja lämpötilan noustessa siirtyvät oranssin, keltaisen ja valkoisen alueen läpi aina sinertävälle alueelle. Valkoista valoa käsiteltäessä sen väriämpötilan mukaan tarkkaillaan kyseisen käyrän valkoisen valon alueelle osuvaa aluetta. Täten esimerkiksi 2 700K väriämpötilään oleva valkoinen valo on kellertävää ja 6 500k väriämpötilään oleva huomattavasti lämpimämpi versio puolestaan sinertävää. Tästä voi johtua sekaannuksia ajoittain, sillä ”punertavia” tai ”kellertäviä” valoja mielletään usein lämpimämmiksi ja ”sinertäviä” puolestaan kylmemmiksi, vaikka väriämpötiloja käsiteltäessä asia on juurikin päinvastoin. [6, 19]



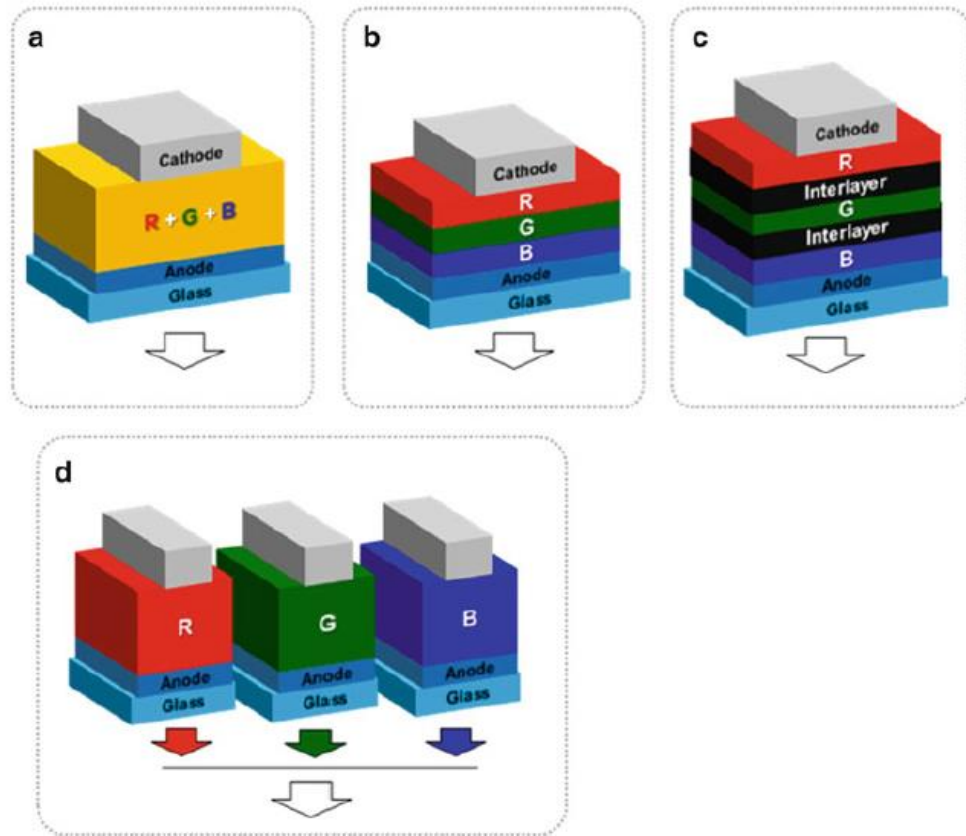
Kuva 13. Erilämpöisten mustien kappaleiden säteilyn sijoittuminen kromaattiseen koordinaatistoon [mukaiillen 6].

2.5 Muita LED-tyyppejä

LEDien aktiivisessa vyöhykkeessä käytetään perinteisesti inorgaanisia yhdisteitä, kuten esimerkiksi erilaisia galliumin yhdisteitä. Tällaisten perinteisten LEDien lisäksi on kuitenkin kehitelty myös erilaisia materiaaleja kyseisessä vyöhykkeessä hyödyntäviä varianteja. Tässä osiossa esitellään seuraavaksi lyhyesti kaksi tällaista varianttia, joiden käytön uskotaan yleistyvän tulevaisuudessa erinäisissä käyttökohteissa.

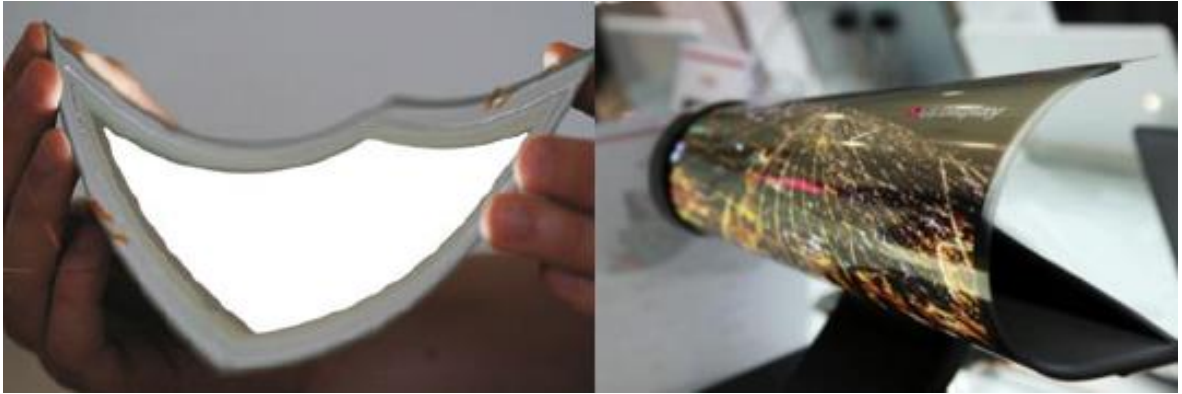
2.5.1 OLED

OLED on lyhenne sanoista Organic Light Emitting Diode, eli orgaaninen valoa säteilevä diodi. Tällaisten LEDien toimintaperiaate on vastaava kuin perinteisten LEDien, mutta erona on niiden aktiivisessa vyöhykkeessä käytettävät materiaalit. Nämä materiaalit ovat yleensä erinäisiä orgaanisia kalvoja, joiden ominaisuuksista riippuen ne tuottavat eri aallonpituuksista säteilyä. Yleensä yksittäisen tällaisen kalvon tuottama valo kattaa aallonpituuksia n. 70 – 100 nm laajuudelta. Erilaisia tällaisia kalvoja yhdistelemällä voidaan saada aikaan hyvin moninaisia lopputuloksia. Näiden kalvojen tuottamien suhteellisen laajojen spektrien ansiosta onkin mahdollista jo esimerkiksi kolmen kalvon rakenteella saada aikaan hyvin korkean CRI:n omaavaa valkoista valoa. Muutamia esimerkkejä tällaisista mahdollisten yhdistelmien periaatteista kuvassa 14. [8, 20, 21]



Kuva 14. Erilaisia mahdollisuuksia yhdistellä eri aallonpituuksilla säteileviä kalvoja valkoisen valon tuottamiseksi (cathode = katodi, anode = anodi, glass = lasi, R on lyhenne sanasta red eli punainen, G on lyhenne sanasta green eli vihreä ja B on lyhenne sanasta blue eli sininen) [20].

Orgaanisten LEDien kalvomainen rakenne mahdollistaa tasaisien valaisevien pintojen lisäksi myös taivuteltavien kokonaisuuksien valmistamisen. Lisäksi, koska OLEDit kykenevät tuottamaan itsessään haluttuja värejä, voidaan niitä myös hyödyntää erilaisissa näytöissä. Esimerkiksi LCD-näyttöihin (engl. liquid crystal display, eli nestekidenäyttö) verrattuna ne tarjoavat vähemmän virtaa kuluttavan ja yksinkertaisemmän rakenteen omaavan vaihtoehdon, sillä OLED:it tuottavat itse tarvittavan valon ja värin, eivätkä täten tarvitse erillistä taustavalaisua. Kuvassa 15 on esitelty muutama esimerkki tällaisista OLED sovelluksista. [21, 22]



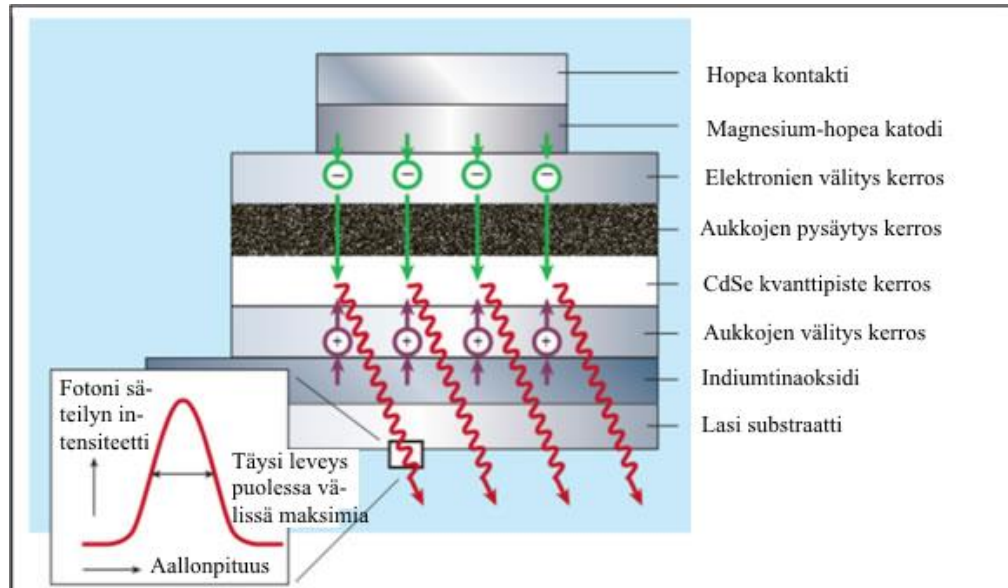
Kuva 15. Vasemmalla taipuisa valkoista valoa tuottava OLED-valaisin [mukaillen 21] ja oikealla taivutettava OLED-näyttö [mukaillen 22].

Etujensa vastapainona OLED:llä on myös muutamia vahvasti niiden käyttöä rajoittavia heikkouksia. Näistä kaksi suurinta, ainakin vielä nykyisin, ovat hinta ja kestoikä. OLED:ien korkea hinta johtaa juurensa sekä niissä käytettävistä materiaaleista että niiden valmistuksessa tarvittavista prosesseista. Tämän takia varsinkin valaistuksessa käytettävien sovelluksien hinta verrattaessa kilpaileviin ratkaisuihin nousee hyvinkin paljon korkeammaksi. OLEDien kestoikä on riippuvainen niiden säteilemästä energiasta. Täten sovelluksissa, joissa vaaditaan korkeampaa kirkkautta, OLED-tuotteilla on ratkaisevasti heikompi kestoikä, eivätkä ne siksi sovellu esimerkiksi ulkotilojen valaistukseen erityisen hyvin. [20, 22, 23]

2.5.2 QLED

QLED, tai jossain tapauksissa myös QD-LED muodossa, on lyhenne sanoista Quantum Dot Light Emitting Diode, eli valoa säteilevä kvanttipistediodi. Kuten OLEDin tapauksessa, niin myös QLEDin perustoimintaperiaate on perinteisiä LEDejä vastaava ja sen ratkaiseva eroavuus on lähinnä vain aktiivisen vyöhykkeen materiaali. QLEDissä tällaisena materiaalina toimii nimen mukaisesti kvanttipisteitä sisältävä kerros. Elektronien ja aukkojen tässä kerroksessa yhdistymisestä aiheutuvan säteilyn spektri on hyvin kapea ja aallonpituus on riippuvainen kerroksen kvanttipisteiden koista. Yksi QLEDien suurimmista eduista onkin se, että valmistusvaiheessa näitä kokoja hallinnoimalla voidaan tuotettua valoa säädellä hyvinkin tarkasti ja saada aikaan erittäin puhtaita värejä. Muita QLEDien etuja ovat muun muassa matala virrankulutus ja erittäin ohut rakenne. Toisaalta tietyillä kirkkaustasoilla QLEDit ovat vielä

varsin tehottomia ja niiden rakenteen vakauteen ja kestoikään liittyy vielä haasteita. Kuvassa 16 on esitetty esimerkkirakenne QLEDistä. [24, 25, 26]



Kuva 16. Esimerkki QLEDin rakenteesta [mukaillen 24].

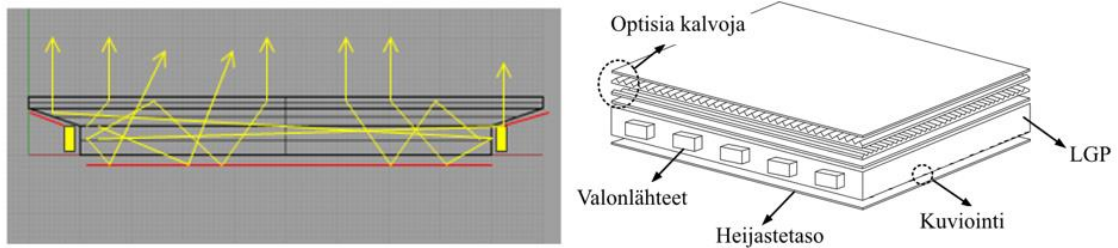
2.6 LED-valaisintyyppejä

Koska LEDien valoa tuottava pinta-ala on varsin pieni, joudutaan valaisimissa usein käyttämään useista LED-pakkauksista koostuvia kokonaisuuksia. Lisäksi näiden tuottaman valon ohjaamisessa halutulla tavalla käytetään usein esimerkiksi erinäisiä heijastavia pintoja ja linsejä. Kun tällaisesta valaisimesta halutaan tehdä tasomaisesti valoa tuottava, löytyy tähän kaksi pääasiallista vaihtoehtoa. Tässä osiossa avataan lyhyesti näiden tapojen toimintaperiaatteita ja käydään läpi niiden tärkeimpiin komponentteihin liittyviä huomioitavia asioita.

2.6.1 Laidasta valaistu

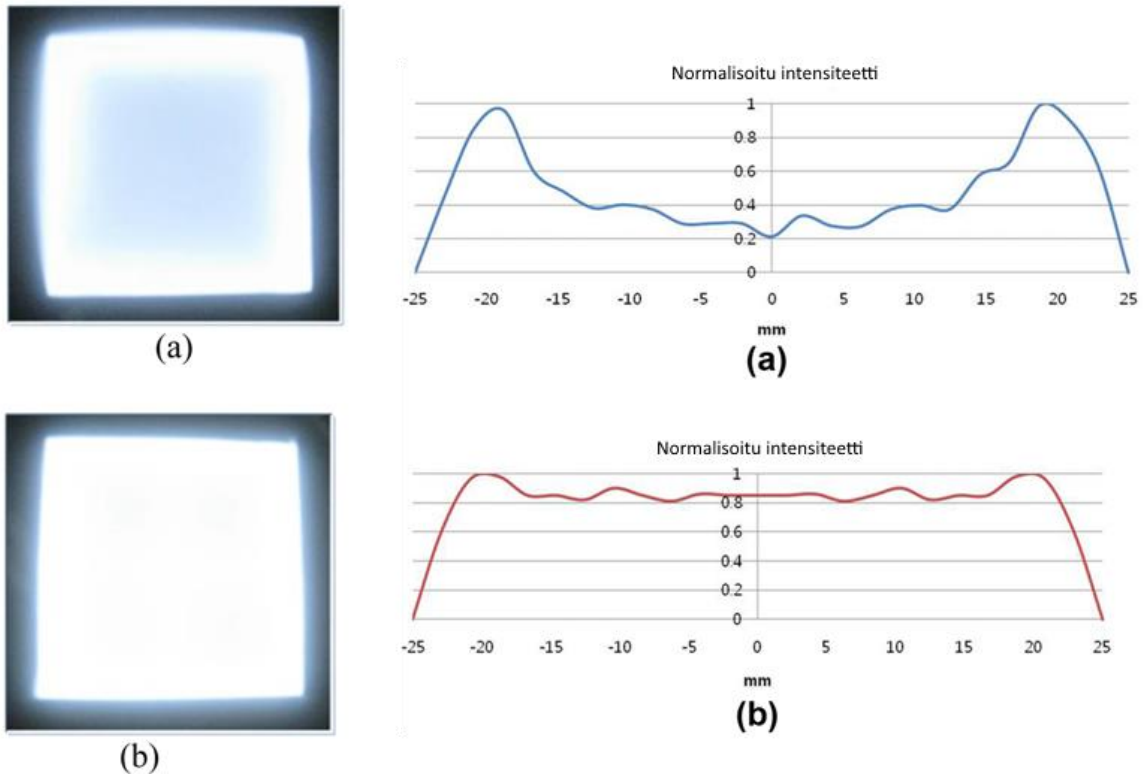
Laidasta valaistun variantin toiminta perustuu valoa ohjaavan levymäisen komponentin ympärille. Tätä komponenttia kutsutaan valonohjauslevyksi (engl. Light guide plate, LGP). Tähän levyyn ohjataan valoa sen laidoilta ja siinä olevan kuvioinnin tai sen toiseen pintaan kiinnitetyn heijastuslevyn avulla valo ohjataan haluttuun suuntaan. Tätä toimintaperiaatetta on

havainnollistettu kuvassa 17 vasemmalla ja saman kuvan oikeassa laidassa on esitettyä yksi esimerkki tällaisessa rakenteessa käytetyistä komponenteista. Tällaisia muita käytettyjä komponentteja ovat usein esimerkiksi erinäiset optiset kalvot tai levyt, joiden tehtävänä voi olla esimerkiksi hajottaa tai värjätä valoa. [27, 28]



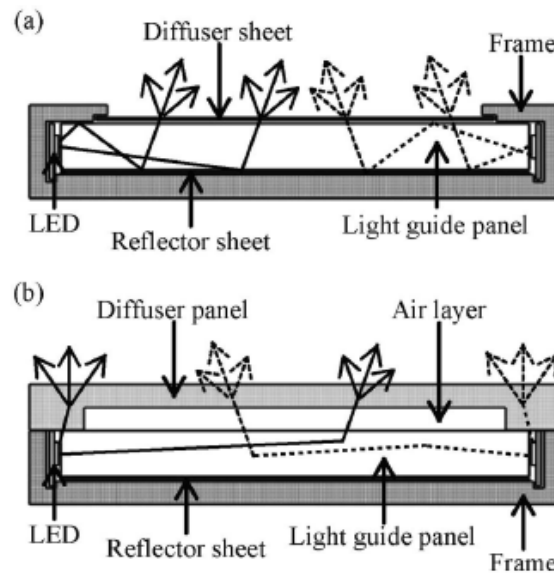
Kuva 17. Vasemmalla havainnolliste valonsäteiden kulusta yhdenlaisessa versiossa laidasta valaistavaa valaisinmallia [mukaiillen 27] ja oikealla esimerkki kyseisen rakenteen komponenteista [mukaiillen 28].

Valonohjauslevyssä oleva kuviointi voi olla esimerkiksi hyvin korkeatarkkuuksisella lastuavalla työstöllä tehtyjä uria tai rasteroinnilla tuotettuja pisteitä. Kuvioinnin tyypistä riippumatta sen tiheys ei useinkaan ole vakio koko levyn pinta-alalta. Tämä johtuu siitä, että levyn mittojen kasvaessa sen sisemmissä osissa heijastuva valo alkaa erottumaan ulkoreunoja huomattavasti heikommaksi. Tämän takia kuviointi usein tihenee levyn keskiosaa kohden ja tästä johtuen suuremmat LGP:t tarvitsee valmistaa valaisimen mittojen mukaisiksi, eikä vain leikata suuremmasta tasaisesti kuvioidusta levystä sopivan kokoisia paloja. Kuvassa 18 on esitetty esimerkki siitä, miten muuten samanlaisessa testitilanteessa valonohjauslevyn homogeeninen ja epähomogeeninen kuviointi vaikuttavat valaisevan pinnan valon intensiteetin tasaisuuteen. [27, 28]



Kuva 18. Kuvan yläalaidassa (a) valon intensiteettijakauma käytettäessä homogeenisellä kuvioinnilla varustettua LGP:tä ja alalaidassa (b) käytettäessä LGP:tä, jonka kuviointi tihenee keskustaa kohden [mukaillen 27].

Tällaisissa valaisimissa valonohjauslevy nousee usein varsin suureen osaan koko valaisimen kustannuksista, mikäli joudutaan poikkeamaan yleisimmin käytössä olevista vakiomitoista. Yhtenä ratkaisuna tähän on esitetty rakennetta, joka koostuisi pienemmistä vakiokokoisista palasista, joita yhdistelemällä pystyttäisiin saavuttamaan erilaisia kokonaismittoja. Tällöin näiden pienempien palojen mitoilla olevia valonohjauslevyjä voitaisiin tuottaa suurempia eriä ja täten saada niiden kustannuksia matalammiksi. Kuvassa 19 on esitetty yhden tällaisen rakenteen eroja yleisemmin käytössä olevaan rakenteeseen verrattuna ja kuvassa 20 tällaisen rakenteen palojen liitoskohdan erottuvuutta valaistuna ja ilman. [29, 30]



Kuva 19. Kuvan yläalaidassa on esimerkki yleisemmin käytössä olevasta sivulta valaistavan valaisimen rakenteesta (a) ja alalaidassa mallista, jonka olisi tarkoitus olla yhdistettävissä muihin samanlaisiin rakenteisiin mahdollisimman huomaamattomasti suuremman yhtenäisen pinta-alan saavuttamiseksi (b) (Diffuser sheet = diffuuseri taso, frame = kehys, reflector sheet = heijastustaso, light guide panel = valonohjauspaneeli) [30].

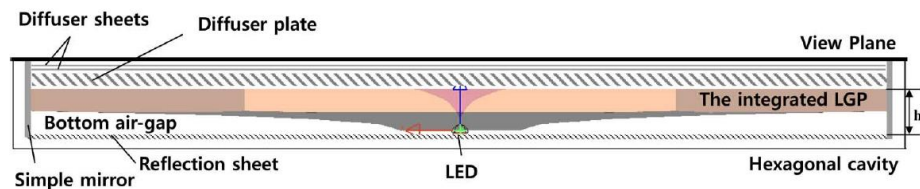


Kuva 20. Yhdistettäväksi suunniteltujen valaisinpaneelien liitoskohta valaistuna ja ilman [mukaiillen 30].

2.6.2 Suoraan valaistu

Suoraan valaistussa variantissa valo tuotetaan suoraan haluttuun suuntaan. Koska LEDit ovat pistemäisiä valonlähteitä, vaatii tällaisessa tapauksessa tasaisen valaisevan pinnan saavuttaminen järjestelyjä. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi jaotteleamalla suuri määrä LEDejä kyseisen pinta-alan laajuudelle, käyttämällä erinäisiä diffuusereja valon hajottamiseen, erikseen valoa ohjaamaan kehitettyjä komponentteja tai jotain yhdistelmää edellä mainituista. Usein tällaisissa ratkaisuissa myös käytetään muuhun rakenteeseen suhteutettuna varsin suuria välimatkoja komponenttien välillä, jotta valo pääsisi leviämään paremmin esimerkiksi ennen sen osumista diffuusereihin. Näiden ilmarakojen tai vaihtoehtoisesti suuren määrän valoa manipuloivien komponenttien ansiosta tällainen rakenne usein on paksumpi kuin sivulta valaistavat versiot. [27, 29]

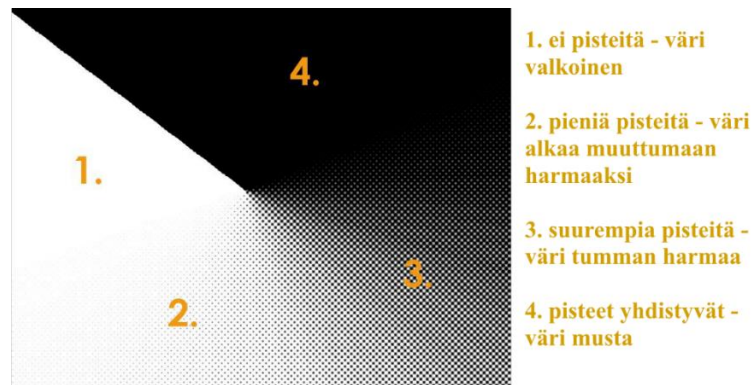
Koska valaisinpaneeleista pyritään tekemään aina vain ohuempia, esimerkiksi näyttötekniikan vaatimuksien takia, myös suoraan valaistujen LED-paneelien rakennetta on pyritty ohentamaan erinäisin keinoin. Erilaisia lähestymistapoja tähän ovat esimerkiksi lisätä käytettyjen LEDien määrää, suunnitella paneelin rakenne itsessään paremmin valoa ohjaavaksi tai suunnitella valaisevien komponenttien ja näkyvän pinnan väliin paremmin pienemmässä tilassa valoa hajauttavia komponentteja. Kuvassa 21 on esitetty esimerkki, jossa tätä päämäärää on lähestytty käyttämällä tarkoitusta varten suunniteltua valonohjauslevyä ja muotoilemalla loppurakenne tätä tukevaksi. [29]



Kuva 21. Design, jossa on pyritty kaventamaan suoraan valaistua taustavaloyksikköä valonohjauslevyn muotoilun ja taustalla olevan ilma-avulla (Diffuser sheets = diffuuseritasot, diffuser plate = diffuuserilevy, view plane = tarkkailutaso, bottom air-gap = pohjan ilmarako, reflection sheet = heijastustaso, simple mirror = yksinkertainen peili, the integrated LGP = integroitu valonohjauslevy, hexagonal cavity = kuusikulmainen onkalo) [mukaiillen 29].

2.7 Rasterointi

Rasterointi on tekniikka, jossa useita pisteitä käyttämällä luodaan eri värisävyisiä pintoja. Esimerkiksi mustavalkokuvassa pystytään esittämään eri harmaan sävyjä säätämällä tällaisten rasteripisteiden kokoa ja etäisyyttä toisistaan. Kuvassa 22 on esitetty karkea esimerkki tällaisesta värin muutoksesta, joka on saatu aikaan yksinkertaisesti suurentamalla rasteripisteiden kokoa. [31]



Kuva 22. Esimerkki harmaan eri sävyistä, jotka on saatu aikaan käyttämällä erikokoisia rasteripisteitä [mukaillen 31].

Perinteisesti rasterointi on ollut painotekniikka, mutta sen periaatetta hyödynnetään myös esimerkiksi digitaalisessa kuvankäsittelyssä. Tässä tapauksessa voidaan esimerkiksi useammista pikseleistä koostuvia alueita käsitellä yksittäisinä pikseleinä, joiden värisävyä voidaan säätää käyttämällä erilaisia yhdistelmiä pisteitä niiden osissa. Kuvassa 23 on esitetty tästä yksinkertainen esimerkki 2x2-ruudukon muodossa. LED-valaisimiin liittyen rasterointia hyödynnetään esimerkiksi optisten osien värjäyksessä tai valonohjauslevyn taustan kuvioinnissa. Jälkimmäisessä tapauksessa rasteroinnin tiheyttä hallitsemalla pyritään hallitsemaan levystä heijastuvan valon tasaisuutta. [32, 33]

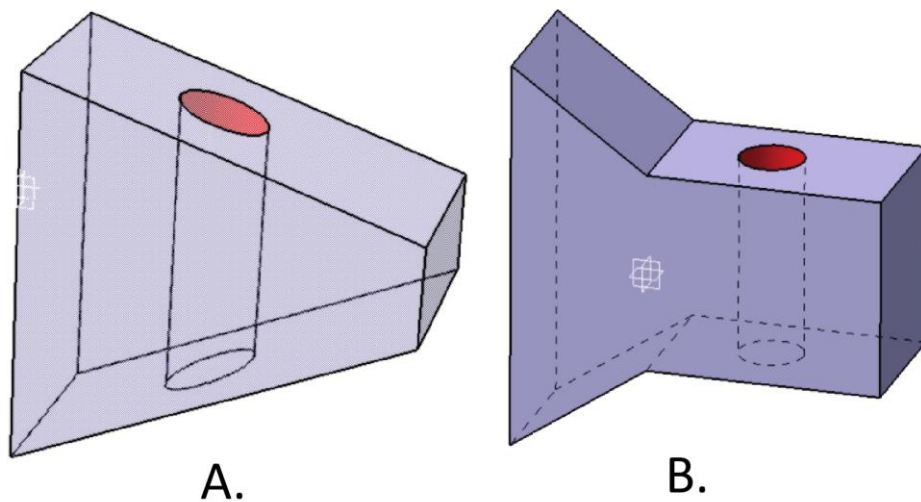


Kuva 23. Yksinkertainen 2x2-pikseliruudukosta koostuva esimerkki, jossa koko ruudukon värisävyä voidaan hallinnoida eri määrillä täytettyjä osia [32].

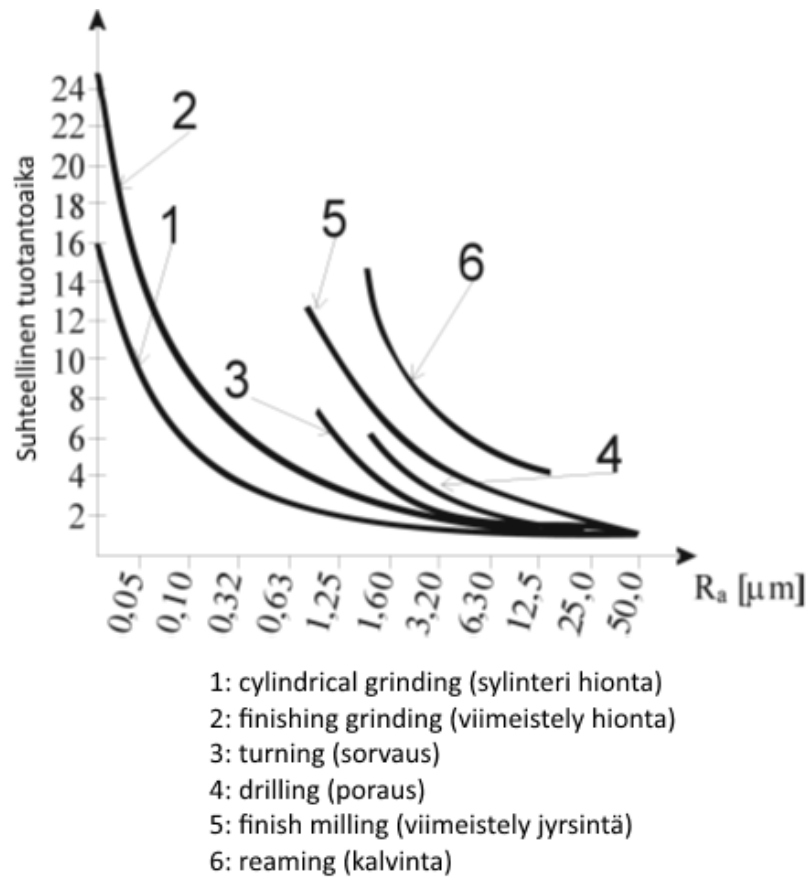
2.8 DFMA

DFMA on lyhenne sanoista Design For Manufacturing and Assembly, eli valmistus- ja kokoonpanoystävällinen suunnittelu. Nimensä mukaisesti DFMA:n periaate pohjautuu siihen, että tuotteen suunnitteluvaiheessa otetaan jo mahdollisimman hyvin huomioon sen valmistus- ja kokoonpanovaiheen mahdolliset haasteet ja vaatimukset.

Suunnitteluvaiheen valinnoilla on hyvin suuri vaikutus lopullisen tuotteen kustannuksiin ja laatuun. Useissa tutkimuksissa tälle vaikutukselle annetaan 70% tai suurempikin lukuarvo tuotteen lopullisiin kustannuksiin vaikuttavia tekijöitä tarkasteltaessa. Yllättävän pienilläkin rakenteellisilla valinnoilla voi olla hyvin suuria valmistuksellisia vaikutuksia. Kuvassa 24 on esimerkiksi esitetty kaksi hyvin erilaista ratkaisua valmistusystävällisyyden kannalta. Kohdassa A oleva design on huomattavasti haastavampi valmistaa kuin kohdan B ja lopputuloksen laatu voi poiketa suunnitellusta huomattavasti. Toisaalta esimerkiksi yksinkertaisilla toleranssivalinnoilla voi olla myös suuri vaikutus valmistettavan tuotteen läpimenoaikaan. Kuvassa 25 on havainnollistettu eri valmistusmenetelmien kohdalla eri pinnanlaatuvaatimusten vaikutuksia niiden suhteelliseen tuotantoaikaan. Täten esimerkiksi tarpeettoman tiukan toleranssin valinta voi aiheuttaa pidentyneitä valmistusaikoja. [34, 35]



Kuva 24. Esimerkki valmistuksen kannalta ongelmallisemmasta (A) ja helpommin toteutettavasta (B) design-ratkaisusta [34].



Kuva 25. Pinnanlaatuvaatimusten vaikutus suhteelliseen tuotantoaikaan eri valmistusmenetelmillä [mukaiillen 34].

Useat tutkimukset ovat osoittaneet, että virheiden tunnistus ja korjaus suunnitteluvaiheessa on huomattavasti edullisempaa verrattuna siihen, että kyseiset toimenpiteet suoritettaisiin vasta tuotteen mentyä tuotantoon tai jopa käyttöön. Tämän faktan ollessa hyvin lähellä itsestäänselvyyttä, saattaa kuitenkin kyseisen hintaeron suuruusluokka joissain tapauksissa yllättää, sillä näiden virheiden korjaaminen vasta tuotantoprosessin loppupuolella voi ajoittain olla satoja tai jopa tuhansia kertoja kalliimpaa. Tällaisten virheiden vähentämiseksi voidaan esimerkiksi uusista tuotteista tuottaa erinäisiä prototyyppisiä niiden vikojen havainnoimiseksi mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. Lisäksi näiden prototyyppien avulla pystytään tarkastelemaan esimerkiksi tuotteen kokoonpanoystävällisyyttä ja sen kestävyysominaisuuksia. [34, 36]

Alla olevaan listaan on kasattu ja yhdistelty useamman lähteen listaamia tapoja toteuttaa valmistus- ja kokoonpanoystävällistä suunnittelua [34, 35, 36, 37]:

- Osien kokonaismäärän vähentäminen
- Modulaaristen designien hyödyntäminen
- Standardikomponenttien hyödyntäminen
- Osien suunnittelu niin, että ne suorittavat useaa eri funktiota
- Osien suunnittelu useassa eri yhteydessä hyödynnettäviksi
- Osavalmistuksen kannalta helpompien muotojen hyödyntäminen
- Mahdollisimman yksinkertaisen kokoonpanon luominen
- Tarpeettoman tiukkojen toleranssien välttäminen
- Johdotusten ja kaapelointien yksinkertaistaminen
- Ylimääräistä säätöä vaativien kohtien vähentäminen
- Osien suunnittelu niin, että niiden väärin asentaminen on hankalaa
- Liitoksien suunnittelu yksinkertaisesti suoritettaviksi

Alla olevaan listaan on puolestaan koottu näillä aiemmin mainituilla toimenpiteillä ja ylipäätään DFMA- ideologialla tavoiteltavia lopputuloksia [35, 36, 37] :

- Valmistus- ja kokoonpano virheiden vähentäminen
- Valmistuskustannuksien minimoiminen
- Tuotteen laadun parantaminen
- Läpimenoaikojen lyhentäminen

2.8.1 Modulaarisuus

Modulaarisessa suunnittelussa pyritään yhdistämään standardisoinnin ja kustomoinnin molempien mukanaan tuomia etuja. Modulaarisuuden pohjana toimii idea jakaa jokin suurempi kokonaisuus pienempiin osakokonaisuuksiin. Koska näistä osakokonaisuuksista erilaisia variaatioita voidaan yhdistellä hyvin monella eri tavalla, voidaan tällä tavoin tarjota hyvinkin laaja lopputuotevalikoima, silti kasvattamatta valmistettävien osakokonaisuuksien määrää samassa suhteessa. [38, 39]

Modulaarisuus voidaan jakaa erilaisiin alaluokkiin. Alla olevassa listassa on kuvattu lyhyesti yksi tällainen jaottelutapa [38, 39]:

- Component-swapping-modulaarisuus, eli komponenttien keskinäiseen vaihdeltavuuteen perustuva modulaarisuuden tyyppi. Täten samankaltaisille tuotteille voidaan tarjota erilaisia ominaisuuksia vaihtamalla joitakin tiettyjä osia toisiin.
- Component-sharing-modulaarisuus, eli samojen komponenttien hyödyntämiseen useissa eri kohteissa perustuva modulaarisuuden muoto. Tässä tapauksessa joidenkin tiettyjen komponenttien valmistusvolyymia voidaan nostaa, mutta toisaalta suunnittelussa voidaan joutua tekemään kompromisseja näiden samojen osien mahdollistamiseksi.
- Fabricated-to-fit-modulaarisuus, eli versio, jossa esimerkiksi jotkin tietyt mitat tuotteesta on suunniteltu dimensioiltaan varioitaviksi tapauskohtaisten tarpeiden mukaan.
- Bus-modulaarisuus, eli modulaarisuuden muoto, jossa jokin määrä komponentin kontaktipinnoista mahdollistaa siihen haluttaessa kiinnitettävän erinäisen määrän osia erinäisiin kohtiin.
- Sectional-modulaarisuus, eli modulaarisuuden ilmenemismuoto, jossa useita eri komponentteja voidaan yhdistellä toisiinsa halutulla tavalla suunnittelemalla niille yhtenäiset rajapinnat.

Modulaarisen tuoterakenteen mukanaan tuomat edut voivat jakautua tuotteen koko elinkaaren laajuudelle. Se esimerkiksi keventää toistuvasti samantyyppisten tuotteiden suunnittelua, mahdollistaa eri osakokonaisuuksien valmistamisen erillään, helpottaa huollettavuutta ja mahdollisia tuotteen päivityksiä uudemmilla vastaavilla komponenteilla ja lopulta saattaa tarjota helpomman kierrätyksen ja uusiokäytönkin joillekin kokonaisuuden moduuleille. Esimerkiksi valaisimesta vioittuneen lampun vaihtaminen ja kierrättäminen on usein huomattavasti helpompaa kuin koko valaisimen vaihtaminen ja kierrättäminen. Lisäksi mikäli kyseiseltä valaisimelta vaadittaisiinkin lisää valotehoa, voidaan siihen vaihtaa tehokkaampi lamppu jälleen koko valaisimen vaihtamisen sijaan. [38, 39]

3 SUUNNITTELUPROJEKTI

Tämän työn suunnitteluprojektin tavoitteena oli selvittää erilaisia vaihtoehtoja toteuttaa tasomainen valaistusratkaisu hissikorissa. Tässä osiossa käydään aluksi läpi vaatimuksia ja suunnittelua ohjaavia toiveita liittyen valaisimen ominaisuuksiin. Tämän jälkeen vertaillaan esille tulleita vaihtoehtoja toteuttaa nämä vaatimukset. Lopuksi esitellään jatkokehitykseen valitut vaihtoehdot, joista tarkemmin omissa case-osioissaan.

3.1 Vaatimukset ja toiveet

Projektin suunnittelutyötä ohjaavista vaatimuksista suurin ja eniten rajoittava oli vaatimus laajasta mahdollisimman tasaisesti valaisevasta pinnasta. Projektin alussa tärkeimpänä tehtävänä olikin selvittää erilaisia tapoja tuottaa tällainen valaiseva pinta ja sitten vertailla näitä muiden vaatimuksien ja toiveiden pohjalta.

Halutun valaistustyyppin lisäksi valaisimen suunnittelua rajoitti myös vaatimus täyttää asiaankuuluvat standardit, kuten ainakin EN 81-20, ja mahdollisuuksia toimia esimerkiksi palomieshississä standardin EN 81-72 mukaisesti tulisi ainakin selvittää. Nämä standardit asettavat rajoituksia esimerkiksi käytettäville materiaaleille niiden paloluokkien mukaan ja 100:n luksin minimimäärän valaistukselle yhden metrin korkeudessa hissien lattiasta. Näiden lisäksi yksi merkittävä hissien ympäristönä asettama erityisvaatimus valaisimelle on yhteensopivuus hissien kattoluukun kanssa.

Viimeinen varsinainen vaatimus oli valaisimen varioitavuus eri kokoihin hisseihin sopivaksi. Tähän liittyen myös valaisimen rakenteen mahdollisesti sallima muodoiltaan varioitavuus olisi positiivinen asia, mutta ei pakollinen vaatimus. Muita suunnittelua ohjaavia toivomuksia olivat rakenteen paksuus, mielellään alle 100mm, ja keveys sekä huolto- ja valmistusystävällisyyden huomioon ottaminen.

3.2 Valaistustapojen vertailu

Projektissa tavoitteena olevan tasaisen mahdollisimman yhtenäisen valaisupinnan saavuttamiseksi valaisimelle nousi esiin kolme pääasiallista vaihtoehtoa. Jokaiselle näistä

vaihtoehtoista, niiden lyhyelle esittelylle ja hyvien ja huonojen puolien suhteessa toisiin läpikäynnille, on omistettu oma osionsa seuraavaksi. Tämän jälkeen käydään läpi tehtyjä johtopäätöksiä ja tarkennuksia liittyen jatkokehitykseen valittaviin vaihtoehtoihin.

3.2.1 Sivulta/laidalta valaistu (engl. side/edge-lit)

Kyseinen malli pohjautuu valon tuottamiseen valaisimen reunoilta ja sen jälkeen sen ohjaamiseen haluttuun suuntaan jollain komponentilla, yleensä valonohjauslevyllä (engl. light guide plate, LGP). Tällainen rakenne voi olla hyvinkin ohut, sillä se koostuu yleensä pääasiassa kahdesta tai kolmesta levystä kasattavasta kerrosrakenteesta ja tätä kasassa pitävästä rungosta. Lisäksi näitä rakenteeseen tarvittavia komponentteja on saatavilla useiltakin valmistajilta ja valonohjauslevyä lukuun ottamatta niiden mittojen varioiminen on hyvinkin helppoa. Huonona puolena tässä vaihtoehdossa on juurikin valonohjauslevyn painavuus, kalleus ja se että se täytyy valmistaa tietyille mitoille sopivaksi mikäli tuotetun valon halutaan olevan tasalaatuista koko pinta-alaltaan.

3.2.2 Suoraan valaistu (engl. direct lit)

Nimensä mukaisesti tässä ratkaisussa valo tuotetaan suoraan haluttuun suuntaan ja hajautetaan jollain tavalla tasaiseksi, esimerkiksi erinäisillä valoa hajottavilla/ohjaavilla tasoilla tai tuottamalla valoa jo valmiiksi useasta laajalle pinta-alalle tasaisin välein levitetystä kohteesta. Näistä jälkimmäistä vaihtoehtoa käytetään oletuksena lopuissa vertailuissa, koska tämän vaihtoehdon suurin etu suhteessa sivulta valaistuun tässä tapauksessa on juurikin mahdollisuus toimia ilman erillistä valon ohjaus-/hajotuskomponenttia valoa tuottavien komponenttien ja näkyvänä pintana toimivan levyn välissä. Tästä johtuen tämän vaihtoehdon hyvinä puolina voidaan pitää mahdollisesti hyvinkin yksinkertaista ja kevyttä runkorakennetta, sekä laidasta valaistua parempaa tehokkuutta (lm/W). Huonoina puolina toisaalta nousevat esiin vaadittavat dimensiot ja/tai vaadittavien valaisevien komponenttien määrä. Tämä johtuen siitä, että mitä pienemmällä komponenttimäärällä halutaan saada valo jakautumaan tasaisesti, sitä suurempi asetusetäisyys (engl. setback distance) tarvitaan ja vastaavasti toisinpäin mitä pienempään tilaan valaisin halutaan mahtumaan, sitä suurempi määrä valonlähteitä tarvitaan. Lisäksi tämän valonlähteiden tasaisen jaottelun toteuttaminen voi muodostua haasteelliseksi ja sen suhteen

joudutaan todennäköisesti tekemään kompromisseja tarjolla olevan komponenttivalikoiman takia.

3.2.3 Tasolla/kalvolla valaistu

Tässä vaihtoehdossa itse valoa tuottava komponentti on taso-/kalvomallinen ja tuottaa valoa koko pinta-alaltaan. Tämä vaihtoehto soveltaa OLED- teknologiaa ja mahdollistaa sivulta valaistuakin ohuemman rakenteen, omaa mahdollisuuden hyvin luonnolliseen valoon (korkea CRI-arvo) ja tarjoaa valon- ja värinsäätöön monia vaihtoehtoja. Toisaalta sopivien komponenttien saatavuus ja hinta nousee tämän vaihtoehdon suureksi ongelmaksi vielä tänä päivänä. OLED-tuotteita ei vielä valmisteta tarpeeksi suurella volyymilla, varsinkaan tarvittavassa mittakaavassa, että tämä vaihtoehto pystyisi kilpailemaan tässä tapauksessa kahden muun esillä olevan kanssa. Näin ollen hinta ja saatavuus pudottavat tämän vaihtoehdon pois laskuista tämän projektin osalta.

Tämä vaihtoehto oli kuitenkin syytä tuoda esiin, sillä OLED-teknologian mahdollisuus tuottaa valoa tasaisesti hyvin ohuilla pinnoilla on juurikin tässä projektissa tavoiteltu ominaisuus. Lisäksi kyseisen teknologian saralla tapahtuu jatkuvasti kehitystä ja kyseiseen teknologiaan pohjautuvien sovelluksien tuotanto on kasvamassa vuosi vuodelta. Sitä, milloin tarjolla olevien tuotteiden laatu, hinta ja saatavuus tavoittavat rajan, jolloin niistä tulee varteenotettava vaihtoehto tällaiseen sovellukseen voidaan vain arvailla, mutta tilannetta kannattaa ainakin tarkastella muutaman vuoden kuluttua uudestaan.

3.2.4 Valinnat jatkokehitykseen

Sivulta valaistava ratkaisu oli selkeä valinta jatkokehityksen kohteeksi, sillä se tarjoaa mahdollisuuden kapeaan rakenteeseen ja tasaiseen valontuottoon. Tällä periaatteella toimivia valaisimia myös käytetään jo osassa yrityksen tuotteista ja erinäisiin rakenteen komponentteihin liittyen yrityksellä on jo olemassa kontakteja toimitusverkoston suhteen.

Myös suoraan valaistu variantti päädyttiin ottamaan jatkokehitykseen, sillä se tarjosi mahdollisuuden jättää rakenteesta erillisen valonohjauslevyn pois ja täten mahdollistaa ainakin

kevyemmän rakenteen. Lisäksi alustavien konseptitason ratkaisujen pohjalta kävi selväksi, että tässä vaihtoehdossa olisi huomattavasti suurempi osuus osista mahdollista valmistaa yrityksen omalla tehtaalla, verrattuna siihen, että sivulta valaistavassa variantissa suurin osa komponenteista on lähes väkisinkin muualta ostettavia.

4 CASE 1: SUORAAN VALAISTU

Tässä osiossa keskitytään alussa suoraan valaistavan valaisinvaihtoehdon kehitysvaiheisiin ja näissä tehtyihin suunnitteluratkaisuihin. Lopussa esitellään prototyyppiä varten tehtyjä valintoja ja malliin liittyviä kysymyksiä, joihin pyritään saamaan vastauksia prototyypin avulla.

4.1 Periaate ja lähtökohdat

Suurin syy sille, miksi suoraan valaistua varianttia lähdettiin jatkokehittämään, oli mahdollisuus yksinkertaisemmasta rakenteesta, josta pystyttäisiin suurempi osa valmistamaan ohutlevytuotteiden valmistukseen suunnatulla tuotantokalustolla. Lisäksi kokonaisuuteen suhteutettuna varsin raskaan valonohjauslevyn poisjätö verrattaessa sivulta valaistavaan voisi mahdollistaa suuremman paneelikoon ja täten yhtenäisemmän ja mahdollisesti yksinkertaisemmalla rakenteella toteutettavan valaisupinnan verrattuna suuremmasta määrästä pienempiä paneeleja koostuvaan kokonaisuuteen. Lisäksi tällaisella yksinkertaisemmalla ja ilman valonohjauslevyä toteutetulla rakenteella pystyttäisiin mahdollisesti laskemaan valaisinkokonaisuuden kustannuksia.

Aiemmin samalla peruseriaatteella toimivia valaisimia tehtäessä on ainakin muutamissa tapauksissa turvauduttu osan komponenteista kiinnittämiseen suoraan hissien kattoon tai muihin hissikorin rakenteisiin. Tässä projektissa tehtiin periaatteellinen ratkaisu ja keskityttiin täysin omana modulaarisena komponenttina toimivan valaisimen suunnitteluun. Täten valaisimen kontaktipinnat muuhun hissikoriin olisivat rajoitettuja ja esimerkiksi muutokset kattorakenteeseen tai hissien korkeuteen olisi helpommin kompensoitavissa. Käytännössä tämä tulisi tarkoittamaan saranoiden varassa avattavaa hissien sisäkatosta korin sisäpuolella roikkuvaa rakennetta, joka olisi valittavissa tai vaihdettavissa muihin samalla standardikiinnityksellä oleviin ratkaisuihin vaatien mahdollisimman vähän erityisjärjestelyjä.

4.2 Osakokonaisuuksia

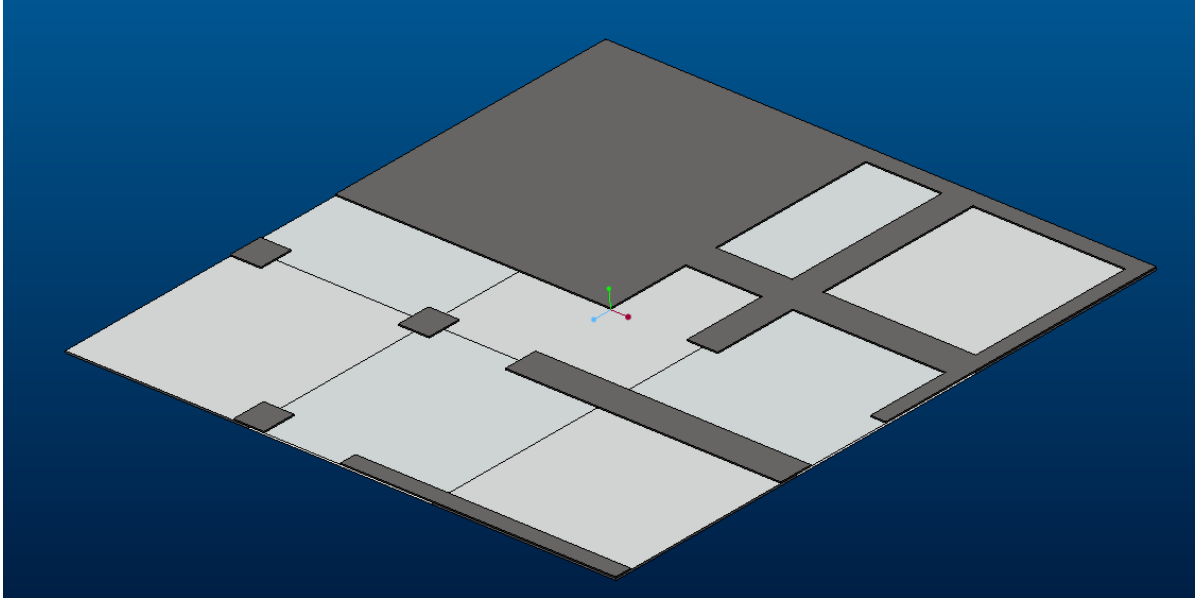
Tämän valaisimen ytimenä periaatetasolla toimivat kaksi pakollista osakokonaisuutta. Valoa tuottava osa ja pintamateriaalina toimiva valo hajottava pinta. Joillakin mahdollisista komponenteista nämä kaksi funktiota ovat yhdistettyjä, mutta tällaisten hyvin spesifien

komponenttien ympärille koko valaisimen suunnittelu voisi johtaa riippuvuuteen juuri tietyistä toimittajasta ja vähentäisi tarjottavissa olevien variaatioiden määrää huomattavasti. Lisäksi tällaiset moduulit, joihin tutkimuksen aikana törmättiin, olivat pääasiassa tarkoitettuja huomattavasti pienemmän mittakaavan valaistukseen ja eivät tarjonneet täysin tasaista valaisevaa pintaa, jota projektissa tavoiteltiin. Näiden kahden pakollisen funktion lisäksi kolmanneksi pakolliseksi osakokonaisuudeksi muodostui valaisimen kattoon kiinnittävät ja tarvittaessa avauksen mahdollistavat komponentit. Lisäksi tarvitaan vielä nämä kaikki yhteen sitova ja paikoittava runko. Alla olevassa osiossa on lähestytty valaisimen jatkokehitysprosessia näistä neljästä osakokonaisuudesta käsin.

4.2.1 Runko

Yksinkertaisimmillaan tämän valaisimen rungon tarvitsee vain pitää pintalevy paikallaan suhteessa valaisinkomponentteihin ja tarjota katon puolelle tuleville kiinnityskomponenteille tarpeeksi tukeva sijoituspaikka. Valaisinkomponentit tulisi saada levitettyä valaisimen pinta-alalle mahdollisimman tasaisesti. Tällaisen levittämisen helpoiten mahdollistavia LED-moduuleja löytyy joko nauha- tai levymuodossa. Alla olevassa kuvassa 26 on havainnollistettu erilaisten näille moduuleille soveltuvien kiinnityspintojen periaatteita. Yläreunassa oleva tasainen kiinteä levy soveltuu sekä nauhoille että laatoille. Se myös itsessään toimii tarvittaessa heijastavana taustana ja estää valoa karkaamasta ei-haluttuihin suuntiin. Tästä seuraava vaihtoehto olisi ristikkorakenne, josta yhdenlaisesta vaihtoehdosta on havainnolliste kuvan oikeassa reunassa. Tämän vaihtoehdon variantista, jossa ristikon sijaan kiinnityspintana toimii yhdensuuntaisista ohuista levyistä koostuva säleikkö, on puolestaan esimerkki kuvan alalaidassa. Tällaisilla rakenteilla voitaisiin pudottaa huomattava määrä kiinnityspinnan painosta, mutta menetettäisiin lujuusominaisuuksia. Lisäksi nauhamallisia LED-moduuleja käytettäessä nämä vaihtoehdot vaatisivat jonkin ylimääräisen rakenteen tiivistävän komponentin, mikäli katon suuntaan valon heijastuminen muodostuisi ongelmaksi tai vaadittava rakenteen IP-luokitus ei sallisi kyseisenlaista avointa rakennetta. Levymäisille komponenteille nämä tosin avaisivat mahdollisuuden asentaa ne valaisimesta katsottuna ulkopuolelta, eli niin että laatat saataisiin kiinnitettyä niiden reunoista rakenteeseen valaisevan pinnan takaa niin, etteivät ristikon tai säleikön dimensiot peittäisi LEDejä. Tällöin myös niiden vaihtaminen

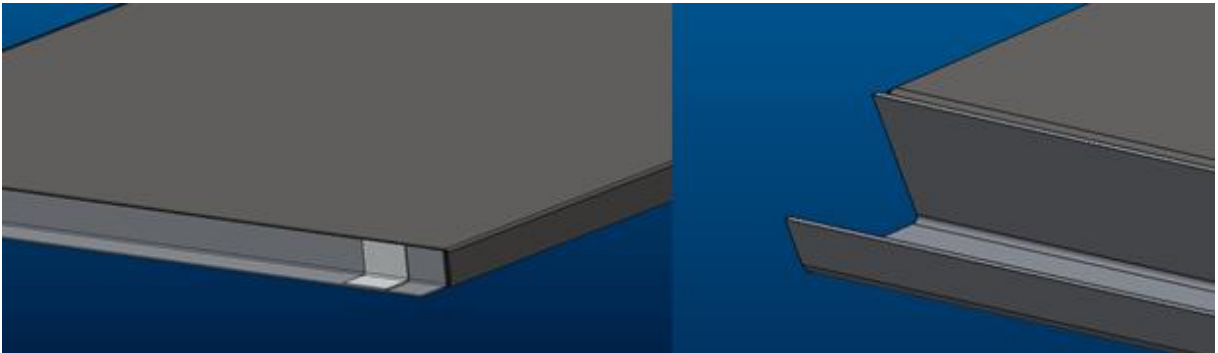
tarvittaessa ilman että muuta rakennetta tarvitsisi purkaa olisi mahdollista. Viimeisenä esille tulleena vaihtoehtona oli hahmotelma pelkistä laattamaisista LED-moduuleista, jotka on kiinnitetty jollain tavalla pääasiassa vain toisiinsa ja muodostaisivat täten yhtenäisen tason (kuvan vasemmassa reunassa esimerkki).



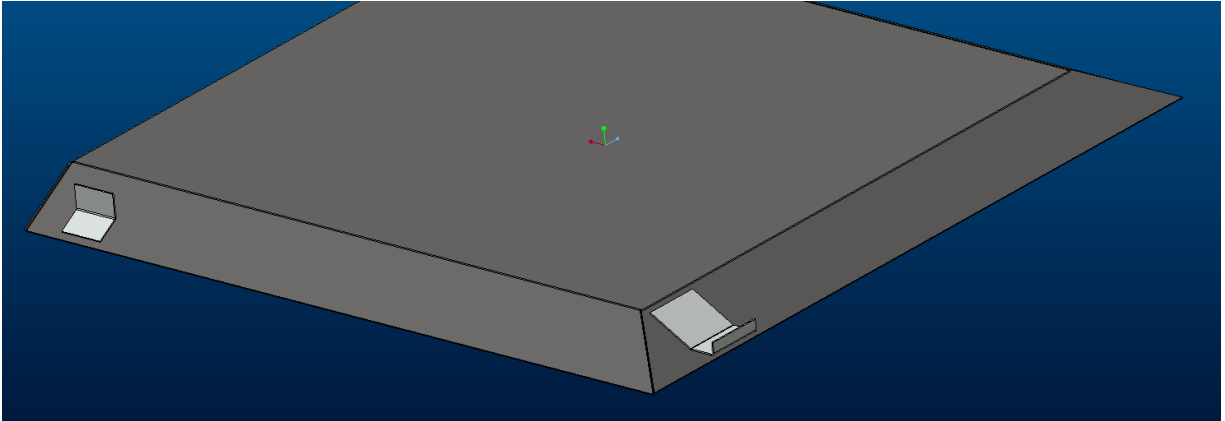
Kuva 26. Hahmotelmia erilaisista vaihtoehdoista suunniteltavan valaisimen taustaksi.

Puhtaasti mekaanisten seikkojen lisäksi taustaa suunniteltaessa oli otettava valaisinkomponenttien lämpötilanhallinta huomioon, koska tällaisessa suoraan valaistavassa valaisinmallissa LED-komponenttien määrä väkisin kasvaa kohtalaiseksi mikäli halutaan pysyä vakiovalaisimien kanssa samassa korkeusluokassa (70... 150mm). Tätä haastetta toisaalta automaattisesti helpotti omalta osaltaan rungon hyvin avoin ja ohut rakenne, mutta toisaalta lämmön johtumista valaisinmoduuleista pois voisi helpottaa esimerkiksi metallisella välittäjäaineella. Tämä funktio toteutuisi helpoimmillaan valittaessa suoraan kiinteä levymäinen tausta valaisimen rungolle. Tällöin tausta toimisi valaisevien komponenttien kiinnityspinnan lisäksi myös näistä lämpöä pois johtavana valaisimen kokoon nähden pinta-alaltaan varsin suurena tasona.

Koska suoraan valaistavassa variantissa valaisevien komponenttien ja pintamateriaalin välinen etäisyys on avainasemassa koko valaisimen korkeuden kannalta, pyrittiin kiinnityskomponenttien tuoma korkeuden lisäystä hillitsemään. Tällöin mikäli ei haluta kiinnittää kiinnityskomponentteja suoraan rungon taustaan lisäämään korkeutta, esille nousi kaksi vaihtoehtoa upottaa nämä ainakin osittain rungon jo muista syistä olemassa olevien dimensioiden sisään. Kuvassa 27 on muutama esimerkki toisesta näistä, eli kiinnityksille tehtäisiin rungon laitojen ulkopuolelle joko taustasta taivuttamalla tai erillisistä komponenteista koostuvat kehykset. Tällöin valaisimen korkeus määräytyisi pääasiassa vain valaisinkomponenttien asetusetäisyyden (engl. setback distance) mukaan, mutta valaisimen pinta-alasta jouduttaisiin osa uhraamaan kehyksille. Toinen, josta hahmotelma kuvassa 28, puolestaan hyödyntää sitä, ettei valaisinkomponentteja tarvitse välttämättä asetella aivan taustan laitoihin asti, koska valo aukeaa näistä tietyssä kulmassa. Tämän valon aukeamiskulman ansiosta laidat voisi muotoilla sen mukaisesti viistoon kulmaan ja tämän viisteen ulkolaitaan sijoittaa kiinnityskomponentit korkeussuunnassa osittain valaisimen jo muutenkin pakollisten dimensioiden sisään, silti lisäämättä välttämättä laitoihin erillisiä kehyksiä.



Kuva 27. Hahmotelmia valaisimen kiinnityskomponenttien sijoittamiseen tarkoitetuista kehyksistä.

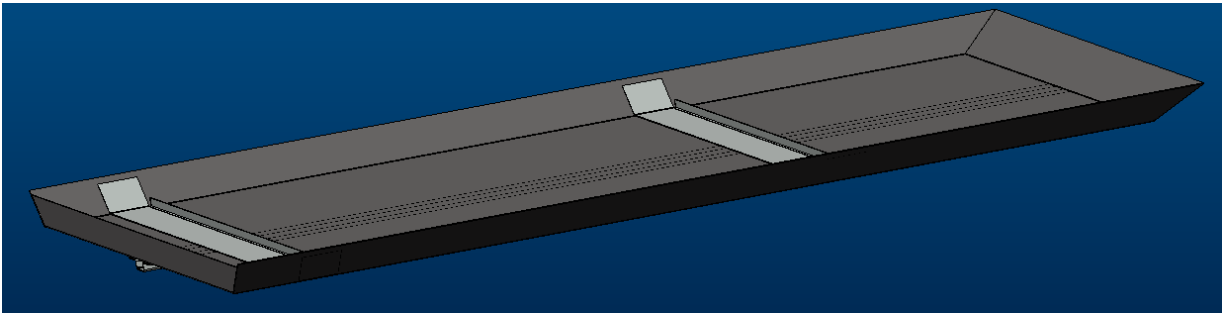


Kuva 28. Hahmotelma vaihtoehdosta ”upottaa” valaisimen kiinnityskomponentit viistoon muotoiltuihin laitoihin.

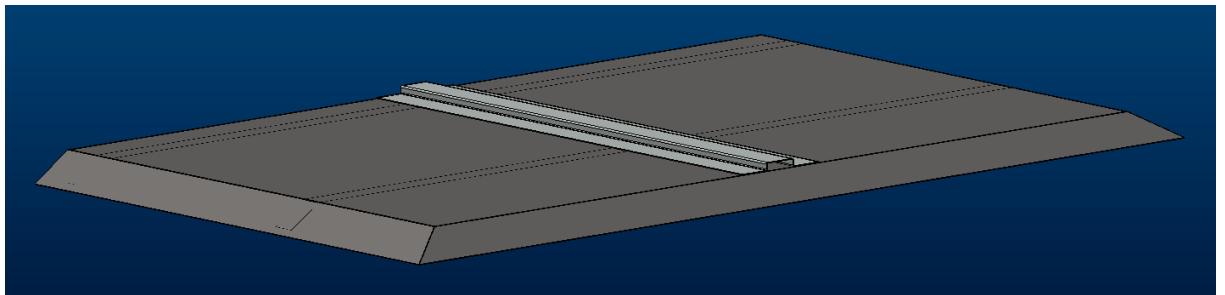
Koska kiinteän taustalevyn pinta-ala kattaa koko valaisimen, on sen osuus valaisimen kokonaispainosta hyvinkin merkittävä. Tämän takia terästä kevyemmän materiaalin valitseminen kyseiseen rooliin oli varsin selkeä valinta. Tämä valinta kohdistui alumiiniin hyvinkin nopeasti, sillä keveyden lisäksi sillä olisi hyvät lämmönjohto-ominaisuudet ja sitä löytyisi yrityksen standardimateriaalivalikoimasta. Tämä kuitenkin nosti esiin saman ongelman kuin ristikko- tai säleikkömallisissa taustaratkaisuisissa tulisi vastaan, eli rakenteen jäykkyyden. Koska tämän ongelman ratkaiseminen suuremmalla aineenpaksuudella omalta osaltaan kumoaisi kevyemmän materiaalin valinnalla saadut hyödyt rakenteen painossa ja runkoon kohdistuvat suurimmat kuormitukset ovat kuitenkin hyvin lokaaleja, päädyttiin tätä haastetta lähteä ratkaisemaan suunnittelemalla erilaisia jäykistekomponenttinvaihtoehtoja.

Jäykistekomponenttien tärkeimpinä tehtävinä olisi jäykistää valaisimen runkoa ja vahvistaa sitä kiinnityskomponenttien kiinnityskohdista. Jäykistämisessä harkittiin myös erinäisiä runkoon tehtäviä uria yms. jäykistäviä muotoja, mutta käytettävissä oleva konekanta ja konstruktiolta myöhemmissä vaiheissa mahdollisesti vaadittavat mittatarkkuudet ohjasivat suunnittelun omiin erillisiin komponentteihin. Kuvissa 29 ja 30 on esiteltynä useasta erillisestä jäykistelistasta muodostuva kokonaisuus, jossa valaisimen ulkopuolelta sitä tuettaisiin pitkittäisessä suunnassa yksinkertaisella hattuprofiililla ja vastaavasti sisäpuolelle sijoitetuilla jäykistelistoilla poikittaisessa suunnassa. Nämä sisäpuolen jäykistelistat olisivat myös sijoiteltuina niin, että ne asettuisivat laidoille kohtiin joista kiinnityskomponentit liitetään runkoon ja jakaisivat näiden

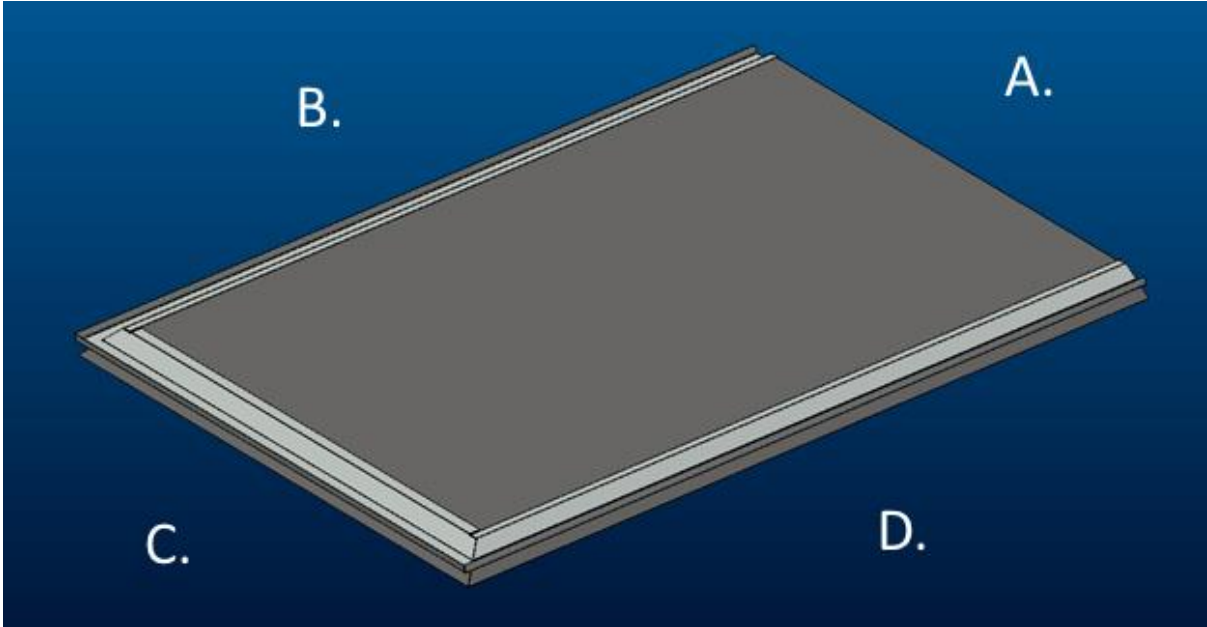
aiheuttaman rasituksen tasaisemmin koko rungon alueelle. Tämä ja muut erilaiset usean jäykistelistan yhdistelmät kuitenkin hylättiin itsenäisinä vaihtoehtoina, sillä kuvassa 31 hahmoteltu vaihtoehto tarjosi huomattavasti valmistusystävällisemmän tavan lähestyä ongelmaa. Tässä vaihtoehdossa valaisimen laitoja kiertäisi erillinen lujemmasta materiaalista tehty kehysrakenne, joka jäykistämisen lisäksi myös tarjoaisi suoraan kiinnityspaikat kiinnityskomponenteille ja mahdollisesti haluttaessa myös pintamateriaalille. Tämän pintamateriaalin liitosmahdollisuuden ansiosta tämän kehikon olisi siis mahdollista toimia eräänlaisena suurimman osan koko valaisimen rasituksista kantavana rankana ja se helpottaisi varsinkin rungon taustaosaan kohdistuvia kuormia. Aiemmin mainittuja irrallisia jäykistelistoja voitaisiin kuitenkin mahdollisesti käyttää tukemassa tällaista kehikkoa, mikäli valaisimen dimensioita kasvatettaessa se vaatisi lisätukea. Kuvassa olevassa mallissa kehikko on sovitettu viistoilla laidoilla tehtyyn kiinnikkeiden upotusratkaisuun, mutta sama periaate toimisi myös kuvan 27 mallisessa valaisimen laitojen ulkopuolelle asettuvassa kehyksessä.



Kuva 29. Hahmotelma valaisimen rungon sisälle tulevista jäykistelistoista useista erillisistä jäykistelistoista muodostuvassa vaihtoehdossa.



Kuva 30. Hahmotelma kuvan 29 jäykisteratkaisussa valaisimen ulkopuolelle tulevasta jäykistelistasta.



Kuva 31. Hahmotelma kehysmallisesta jäykisteratkaisusta ja tulevia osia varten valaisimen laitojen nimeäminen.

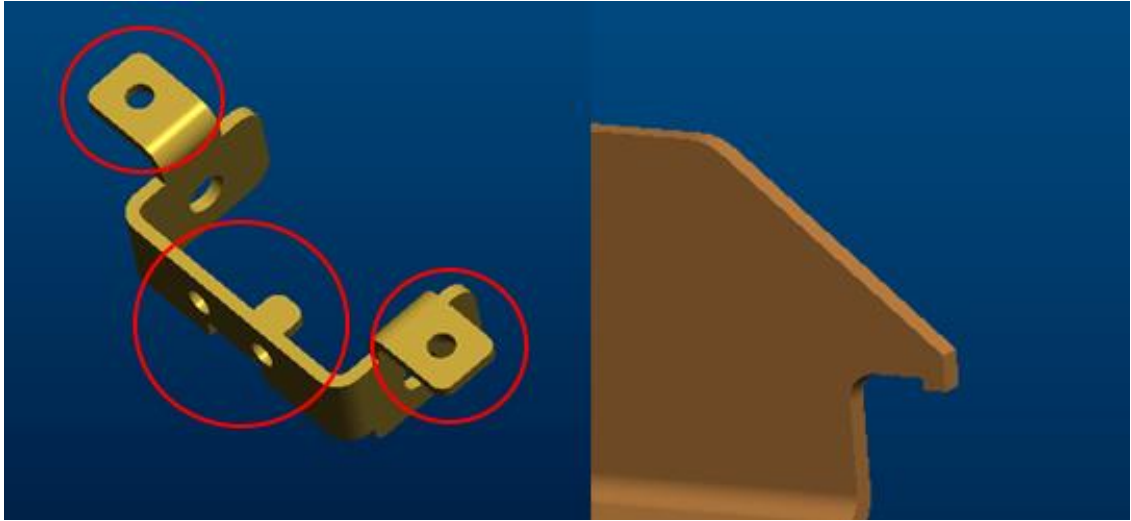
Kuvassa 31 on myös esitetty valaisimen laitojen nimeäminen tulevien selvityksien helpottamiseksi. Laita A:han voidaan viitata myös valaisimen etulaitana ja sen merkittävä ominaisuus on se, ettei sen puolelle ole tarvetta sijoittaa mitään kiinnityskomponenteista. Täten kyseiselle laidalle ei myöskään ole kehysmallisen jäykisteen tapauksessa välttämätöntä syytä tehdä jäykistelilistää. Tämän laidan tasaiseksi jättäminen myös jättää helpomman option tulevaisuudessa integroida siihen mahdollisesti kaareva tai jokin muu projektissa muuten pääasiassa esiintyvistä suorakulmaisesta muodosta poikkeava muoto.

4.2.2 Kiinnityskomponentit

Koska projektin valaisimen kiinnittäminen kattoon haluttiin ensisijaisesti toteuttaa tutkimuksen tilaajayrityksen kehittämällä ja käyttöönsä vakioimilla komponenteilla, jäi niihin liittyväksi pääasialliseksi suunnittelukohteeksi niille sopivien kiinnityskohtien luominen runkoon. Kyseiset kiinnikkeet koostuvat neljästä kappaleesta, joiden avulla valaisin pystytettäisiin tukemaan sen jokaisesta neljästä nurkasta ja tarvittaessa avaamaan huoltotöiden tai kattoluukun avauksen yhteydessä. Näistä neljästä komponentista kaksi on valaisimen C-laidalla sijaitsevia saranoita, joiden varassa kyseinen avausliike tapahtuisi. Toiset kaksi ovat laitojen B ja D A-

laidan puoleisissa päädyissä sijaitsevia lukitusmekanismeja, joiden avaaminen mahdollistaa valaisinpaneelin vapauttamisen saranoiden varaan.

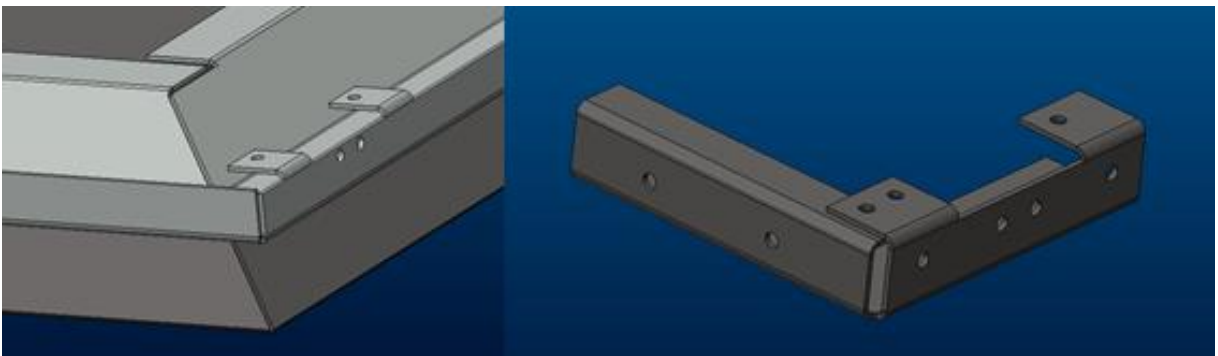
Kiinnitysten vaatiman korkeuden kannalta ratkaisevana tekijänä ovat saranat. Täten mitä matalammalle ne pystyttäisiin sijoittamaan runkoon, sitä vähemmän valaisinkokonaisuuden korkeus kasvaisi kiinnikkeiden takia. Toisaalta näiden saranoiden kohtiin kohdistuu kaikkein suurimmat rakenteeseen kohdistuvista rasituksista, sillä koko valaisin roikkuu avattaessa näiden saranoiden varassa. Täten näiden kohtien kestävyys ja muodossaan pysyvyyteen on syytä kiinnittää erityistä huomiota. Kuvassa 32 on esitetty vasemmalla saranan valaisimeen liittyvän osan kiinnityskohdat, joiden mukaan kiinnityskohdan geometria tulee muotoilla. Lukko-osien pääasiallinen lukitusmekanismi sisältyy niiden sisäkaton puoleiseen osaan. Tämän mekanismin vastinpalan pääasiallinen toiminnallinen osa on tietty geometria sen päädyssä, johon lukitus kiinnittyy ja joka mahdollistaa mekanismin toiminnan. Tämä geometria on kuvattu kuvan 32 oikeassa reunassa. Tämä geometria ei ole mitoiltaan erityisen suuri tai monimutkainen ja täten lukon vastinpalan mitoitus ja muotoilu on varsin vapaa muokattavaksi tilanteeseen sopivaksi. Rajoittavina tekijöinä tässä tapauksessa toimivat pääasiassa kaksi asiaa. Ensimmäisenä lukon avausmekanismiin tulee olla päästävässä käsiksi ilman erityisiä avausvälineitä, eli lukon on oltava tarpeeksi lähellä valaisimen laitaa, eikä sen edessä saa olla mitään sitä peittävää osaa. Toiseksi lukon katon puoleinen osa on huomattavasti vastinpalaa leveämpi kiinnittymiskohdaltaan ja sen dimensiot on otettava huomioon vastinpalaa ympäröivässä rungon rakenteessa.



Kuva 32. Vasemmalla saranan kiinnityskohdan geometrian kannalta ratkaisevat saranan kiinnityspisteet. Oikealla lukitusmekanismin vastakappaleen ratkaiseva geometria.

Kiinnityskomponenttien tukeva kiinnitys ja niihin kohdistuvien rasitusten jakautuminen paremmin rakenteen jäykemmille osille olivat yksiä avainsyitä, miksi rungon jäykisteratkaisussa päädyttiin kehysmalliseen ratkaisuun. Lukon vastinpalan geometrian sovittaminen levymäisen kappaleen laitaan jättää palan lopun geometrian vapaasti jäykistelistään kiinnittämisen kannalta suunniteltavaksi. Täten jäykistelistää suunniteltaessa ei näihin kohtiin tarvitse tehdä lukon vastinpalaa varten erillisiä design-ratkaisuja. Sarana puolestaan vaatii tiettyjä muotoja sijoittuakseen ja ensimmäinen yksinkertainen tapa tarjota nämä muodot oli valmistaa ne suoraan jäykistelistään, josta hahmotelma kuvassa 33 vasemmalla. Jäykistelistojen laitojen sovittaminen yhteen valaisimen nurkassa osoittautui kuitenkin haasteelliseksi, ja vaatisi todella hyvää mittatarkkuutta sekä niiden liittämistä yhteen, mikäli rakenteesta haluttaisiin yhtenäinen. Tämä johtuen siitä, että kehikkomaisen jäykistelistan valmistaminen yhdestä osasta olisi hyvin hankalaa, varsinkin valaisimen laitojen dimensioiden kasvaessa. Jäykistelistojen asettuminen kohdilleen nurkassa olisi hyvin tärkeää, mikäli kyseinen liitos haluttaisiin toteuttaa hitsaamalla ja tällöin rakenne ei olisi tarvittaessa purettavissa ja asennettavissa muuhun runkoon pienemmissä osissa. Kun jäykistelistojen mekaanista liittämistä alettiin suunnittelemaan, helpoimmaksi tavaksi osoittautui toteuttaa se hyödyntäen ylimääräistä nurkkapalaa. Tämän nurkkapalan ansiosta jäykistelistojen nurkkaa kohden tulevat laidat pystyittäisiin suunnittelemaan niiden valmistusta ja toleransseja helpottaen. Tällainen

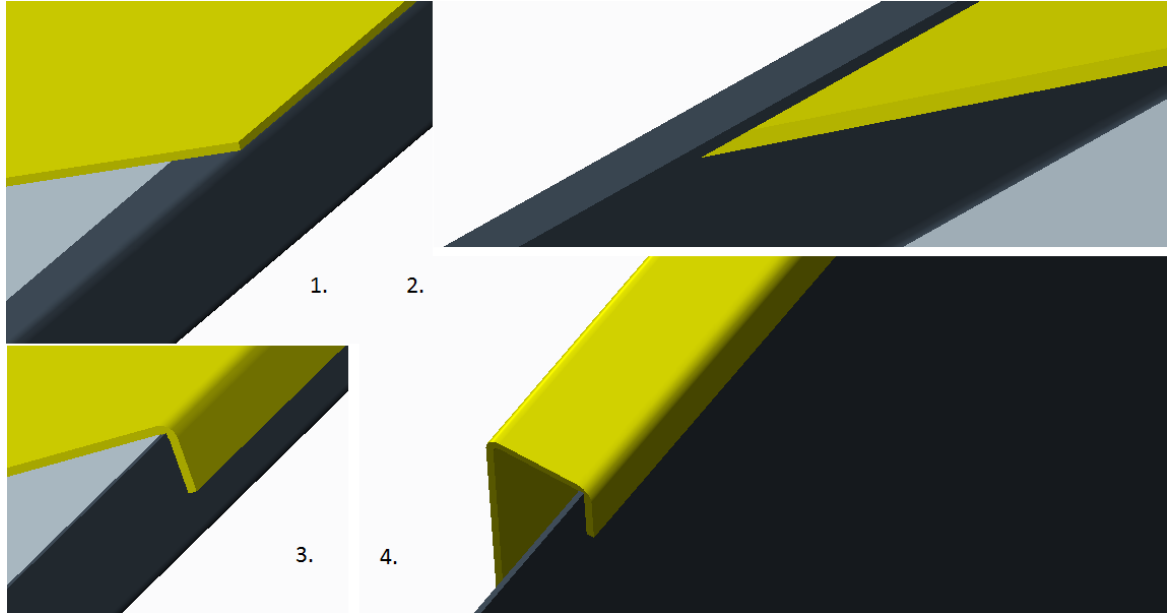
nurkkapala voitaisiin nimittäin suunnitella paikoittuvaksi jäykistelistojen ulkolaitojen mukaan ja yhdistämään ne vaikka niiden väliin jäisi useamman kymmenen millimetrin epämääräisen muotoinen rako. Lisäksi tämä nurkkapala osoittautui otolliseksi paikaksi kiinnittää sarana, sillä se tarjosi hyvin jämään kiinnityspohjan, joka tukisi itsensä kahden eri laidan jäykistelistoihin ja tällaiseen pienempään kappaleeseen olisi hyvin paljon helpompi valmistaa tarvittava kiinnitysgeometria, kuin laidan pituiseen jäykistelistaan. Kuvassa 33 on oikealla esitetty hahmotelma tällaisesta nurkkapalasta.



Kuva 33. Vasemmalla alkuperäinen hahmotelma saranan kiinnityskohdasta, joka olisi valmistettu suoraan rungon jäykistelistoihin. Oikealla kuva nurkkapalasta, johon tämä kiinnitys päädyttiin siirtämään.

4.2.3 Näkyvä pinta

Viimeinen valaisimen rungon kannalta suuri suunnittelukysymys oli sen ja pintamateriaalin kiinnityskohta ja tämän aiheuttamat vaatimukset. Alustavasti pintamateriaalia oli käsitelty pääasiassa vain tasaisena levymäisenä komponenttina, mutta esille nousi kysymys siitä voitaisiinko tätä levyä myös muotoilla erilaisten liitosvaihtoehtojen tarjoamiseksi. Kuvassa 34 on hahmoteltu muutamia näistä periaatteellisista tavoista liittää tämä pintamateriaali runkoon.



Kuva 34. Erilaisia periaatteita kiinnittää valaisimen näkyvä pinta sen runkoon. Kuvissa pintamateriaali on keltaisella ja rungon puoleinen kiinnityspinta tumman harmaalla.

Kuvassa 34 merkityssä kohdassa 1 pinta on vain levymäinen komponentti ja kiinnitettäisiin yksinkertaisesti itsensä suuntaisesti taivutettuun osaan runkoa. Tämän liitoksen tulisi mitä todennäköisimmin olla mekaaninen ja täten kiinnityskohdan eteen tulisi myös asettaa jonkinlainen koristelista. Runkoratkaisussa, jossa kiinnityskomponentit on upotettu kokonaan valaisinta ympäröivään kehykseen, tämä koristelista olisi jo olemassa muutenkin. Tämän lisäksi vaihtoehtona olisi myös pinnan itsensä liitoksen jättäminen pois ja koristelistojen liitoksien vahvistaminen pinnan kannattelun kestäväksi. Tällainen ratkaisu olisi periaatteessa kohdassa 2 esitetyn tyyppinen. Kohdan 2 periaatteena nimittäin olisi asemoida pinta paikoilleen sen alapuolelle sijoitetulla vastinkappaleella. Tämä vastinkappale voisi olla esimerkiksi rungosta taivutettu särmä tai edellä mainittu koristelista. Tällainen liitos vaatii tältä pinnan alle asettavalta osalta joko mahdollisuutta irrottaa, tai jollain muulla tavalla siirtää se pois tieltä, pinnan paikalleen asettamisen tai irrottamisen ajaksi. Toinen vaihtoehto olisi mitoittaa rungon dimensiot siten, että pinta pystyttäisiin siirtämään sen sisälle asettamalla se johonkin muuhun asentoon ja lopulta valaisimen sisällä käännettäessä lopulliseen orientaatioon se asettuisi vastinosien varaan.

Vaihtoehdot 3 ja 4 vaativat pintamateriaalin muokkaamista johonkin muuhun muotoon. Materiaalista riippuen tämä voi tarkoittaa joko lämpömuovaamista, hitsaamista/liimaamista tai särmäämistä. Kohdassa 3 näkyvää pintaa on muotoiltu siten, että sen laidoista lähtisi särmä jossain kulmassa, kuvassa 90°, ja pinnan kiinnitys runkoon tapahtuisi näiden särmien kohdalta. Suurena mahdollisena etuna, joka tällaisessa tapauksessa saavutettaisiin aiempiin vaihtoehtoihin verrattuna, olisi mahdollisuus kehyksettömään rakenteeseen. Tämän vaihtoehdon yhdistäminen runkoon, jossa kiinnityskomponenttien upottamiseen on käytetty viistoja laitoja, mahdollistaisi täysin valaisevasta pinnasta koostuvan näkyvän pinnan valaisimelle. Lisäksi laitojen muoto myös jäykistäisi pintamateriaalia mahdollistaen suuremman pinta-alan käytön ilman että kyseinen pinta alkaisi roikkumaan huomattavasti. Kohdassa 4 on tämä pintamateriaalin muovaus vielä viety askelta pitemmälle ja näihin laitoihin tehtyihin säirmiin on tehty vielä toiset särmät, jotka asettuisivat runkoa vasten kannatellen pintaa mahdollisesti ilman tarvetta mekaaniseen liitokseen. Tämä ratkaisu tarjoaisi mahdollisesti ainoana vaihtoehdoista kohtalaisen helpon tavan asettaa pinta paikoilleen ja irrottaa se valaisimen rungon ollessa paikoillaan katossa asennettuna. Tämä kuitenkin vaatii pinnan muokkaukselta ja sen mittatarkkuudelta huomattavasti enemmän ja toisaalta rakenteelta tarpeeksi joustavuutta, jotta sen voisi taivuttaa paikoilleen, mutta samalla tarpeeksi jäykkyyttä ettei se pääsisi putoamaan itsekseen. Vaihtoehdot 3 ja 4 voisivat myös toimia runkoratkaisun kanssa, jossa kiinnityskomponentit on upotettu pinnan tasolla oleville kehyksille, mutta tässä tapauksessa erillisen koristelistan sijasta valaisimen laidoilla olisi tummemmat vyöhykkeet pintamateriaalia.

Koska suoraan valaistavan version yksi tärkeimmistä ominaisuuksista oli sen kevyempi rakenne ja mahdollisuus suurempaan paneelikokoon, rajattiin mahdolliset pintamateriaalivaihtoehdot erinäisiin tarkoitukseen sopiviin muoveihin. Lasinen pinta toisi rakenteelle hyvin paljon enemmän painoa, tarvitsisi vielä itsensä lisäksi mahdollisesti muita valoa hajottavia levyjä ja asettaisi sen kiinnityksille lisää haasteita. Tällaisia muoveja tutkittaessa päädyttiin kahteen yleisesti valaisimissa käytettyyn vaihtoehtoon. Ensimmäinen oli akryyli, jonka hyvien optisten ominaisuuksien lisäksi sitä olisi tarjolla hyvin suuri valikoima haluttaessa visuaalisesti erilaisia versioita. Akryyli myös olisi mahdollisesti muotoiltavissa joko lämpömuovaamalla tai

liimaamalla ja kestäisi mekaanista liittämistä. Toisena vaihtoehtona esiin nousi polykarbonaatti (PC). Se olisi akryyliä kestävämpi vaihtoehto ja sen muotoiluun voitaisiin käyttää särmäystä.

4.2.4 LED-komponentit

Kuten rungon kohdalla sen taustaosasta puhuttaessa tuli esiin, helpoiten tarjolla olevista LED-moduulivaihtoehdoista valaisimen vaatima levälleen tasaiselle pinnalle sijoittelu olisi toteutettavissa joko laatta- tai nauhamallisilla vaihtoehdoilla. Laattojen hyvinä puolina olisi niiden soveltuvuus useammalle eri taustatyypille ja lähes kaikissa laattavaihtoehdoissa niiden itsensä valmiiksi luoma valkoinen heijastetausta. Asennettavuuden ja saatavuuden kannalta laatat kuitenkin ovat jaettavissa kahteen osioon. Toisen osio on vakio kokoiset laatat, joita on saatavissa helpommin ja edullisempaan hintaan, mutta joiden pienet koot johtavat suureen määrään moduuleja per valaisin ja aiheuttavat ongelmia valaisimien dimensioiden varioitavuudelle kiinteiden kokojensa takia. Lisäksi suuri moduulimäärä aiheuttaa laattojen itsensä fyysisen asentamisen lisäksi huomattavan määrän sähköistykseen liittyvää työtä. Nämä laatat ovat myös järjestäen valoteholtaan hyvin paljon ylitehoisia (lm/m^2) tähän valaisintyyppiin. Toisaalta valotehon, ledien välityksen, laattojen ja valaisimen mittojen yhteensopivuuden sekä asennuksen kannalta optimi vaihtoehto olisi mittatilaustyönä tehdyt valaisinkohtaiset LED-laatat. Näiden tapauksessa hinta ja saatavuus kuitenkin nousevat hyvin suuriksi ongelmiksi ja ainakin tämän projektin puitteissa sulkevat pois vaihtoehdoista.

Nauhamallisten LED-moduulien yksi erittäin huomattava vahvuus on niiden tarjolla oleva valikoima ja saatavuus. Nauhoja löytyy hyvin erilaisilla tehoilla, komponenttien välityksillä, värilämmöillä ja muilla spekseillä, joista on tarvittaessa tapauskohtaisesti mahdollista valita haluamansa. Nauhat myös asettavat vähemmän haasteita liittyen valaisimen mittojen variointiin, sillä ne voidaan leikata keskimäärin n. 5..15mm tarkkuudella haluttuun mittaan ja ovat taipuisia, joten mahdollinen ylimääräinen osa on helppo tarvittaessa vaikka liittää rungon sisälaitaan. Tämä helppo oikeille mitoille säätäminen yhdistettynä monien nauhojen sisältämään valmiiseen liimapintaan kiinnitystä varten tekee nauhoista varsin valmistusystävällisen vaihtoehdon. Toisaalta niiden ja pinnan asetusetäisyydestä (engl. setback-distance) riippuen, niitä tarvitaan varsin monta, alustavan karkean arvion mukaan vähintään 7 nauhaa per metri

mikäli valaisimen korkeus halutaan pitää vaadituissa mitoissa, ja täten niiden sähköistys teettää huomioitavan määrän työtä.

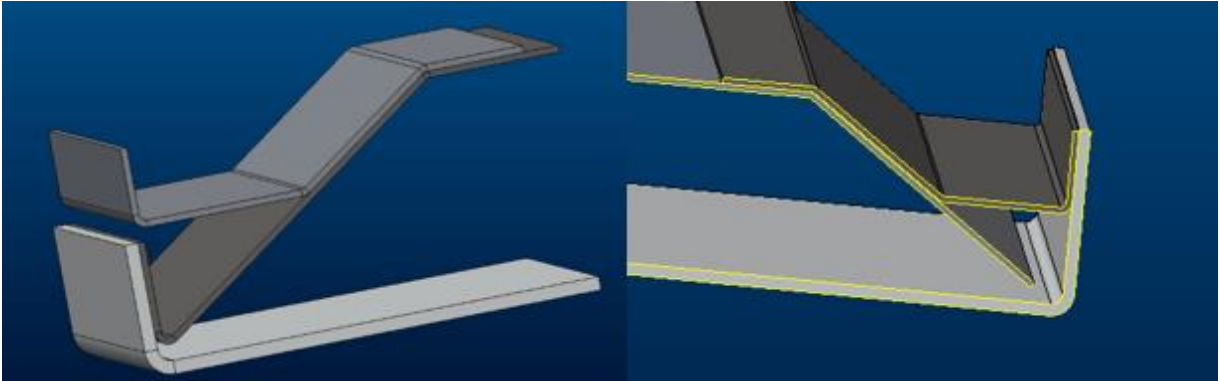
4.3 Prototyyppi

Jo projektin hyvin aikaisesta vaiheesta asti kävi selväksi, että suoraan valaistavaan valaisinmalliin liittyen olisi suuri määrä osakokonaisuuksien toiminnallisuuksia ja vuorovaikutuksia keskenään, joita päästäisiin parhaiten lähestymään käytännön testaamalla. Täten kyseisestä mallista lähdettiin viemään prototyyppiä eteenpäin ja tätä prototyyppiä silmällä pitäen tehtiin joissain osissa kompromisseja liittyen tuttujen toimittajien ja aiemmin hankittujen komponenttien käyttämiseen ja toisaalta osassa lähdettiin kokeilemaan erikoisempia ratkaisuja, joita ei ole ennen tehty, osittain myös siitä syystä että näitä ratkaisuja olisi mahdollisesti mahdollista hyödyntää joissain muissakin yhteyksissä tulevaisuudessa.

4.3.1 Rakenne

Suoraan valaistavan mallin yhtenä tärkeänä pointtina ollessa mahdollisuus suuremmasta paneelikoosta, päädyttiin prototyypin ulkomitoiksi määrittämään 1400x1400mm. Täten prototyypin yhteydessä päästäisiin tarkastelemaan valmistusmenetelmien lisäksi myös erinäisten komponenttien käyttäytymistä tällaisessa mittakaavassa.

Kriittisin prototyypin rakenteen erikoisemmista ratkaisuista liittyi valaisimen pintamateriaaliin. Tästä päädyttiin viemään eteenpäin laidoistaan muovattua versiota, joka mahdollistaisi koko näkyvän pinnan muodostumisen pelkästä valaisevasta pinnasta. Tästä johtuen myös rungon kohdalla valittiin prototyyppiin tätä päämäärää tukeva vaihtoehto. Kuvassa 35 on vasemmalla esitettynä periaatekuva tästä yhdistelmästä, jossa pintalevy on taivutettu 90° laidasta ja kiinnitettäisiin tästä taitoksesta taustalevystä taitettuun laitaan. Myöhemmin jäykistevaihtoehdon ja pinnanmuovausvaihtoehtojen jatkoselvittelyiden jälkeen päädyttiin siirtämään tämä kiinnityspiste kyseisen kuvan oikeassa laidassa kuvatun kaltaisesti suoraan rakennetta kiertävään jäykistelistaan ja täten myös yksinkertaistamaan taustalevyn laidan muotoa.

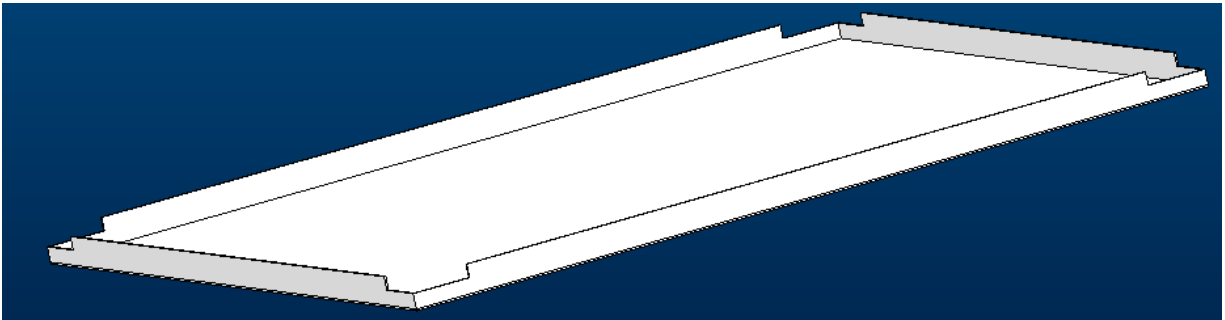


Kuva 35. Vasemmalla hahmotelma valaisimen pintamateriaalin kiinnittämisestä sen laidassa olevasta taitoksesta taustalevyn laitaan. Oikealla versio, jossa tämä liitoskohta on siirretty jäykistelistään.

Muovattuun pintamateriaaliin liittyen tässä vaiheessa projektia oli vielä kolme pääasiallista vaihtoehtoa. Akryylistä lämpömuovaamalla taitettu, erillisistä akryylipaloista liimattu tai polykarbonaatista särmätty. Näistä akryylisten versioiden hyviin puoliin lukeutuvat polykarbonaattia paremmat optiset ominaisuudet ja jo ennestään moniin kohteisiin hyväksytyt muokkaamattoman materiaalin itsensä ulkonäkö. Toisaalta akryyli on helpommin naarmuuntuvaa ja hauraampaa. Akryylin muovausmenetelmien välillä erona ovat erilaiset visuaaliset lopputulokset ja selkeä ero muototarkkuudessa. Liimaamalla päästään paljon tarkempiin muototarkkuuksiin, kuin lämmön avulla taivuttamalla, mutta tämän menetelmän kustannukset olivat kysymysmerkinä. Polykarbonaatti puolestaan tarjoaisi vaihtoehtoista helpoimman muovausvaihtoehdon, eli särmäyksen ilman erillistä lämmitystä. Tämä myös olisi siis ainut vaihtoehto, joka realistisesti mahdollistaisi aiemmin pintamateriaalin yhteydessä esiin tulleen vaihtoehdon tehdä laitoihin kaksi särmää. Lisäksi polykarbonaatin huomattavasti parempi paloluokka mahdollistaisi sen käyttämisen tarkempia aiheeseen liittyviä vaatimuksia sisältävissä kohteissa.

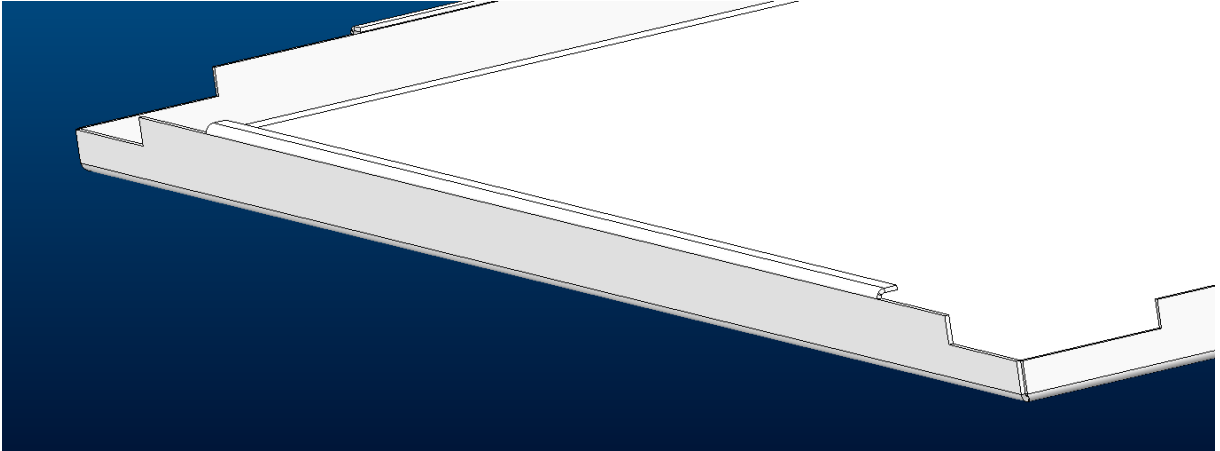
Lisäselvityksien pohjalta päädyttiin hylkäämään akryylin lämmöllä taivutus vaihtoehtoista pääasiassa kahdesta syystä. Molemmat näistä pohjautuvat kyseisen pinnan hankalaan muotoon, jossa jokainen laita olisi taivutettuna. Ensinnäkin prosessista johtuen näihin taivutuksiin syntyisi jännityksiä ja laitojen muototarkkuus olisi varsin heikko. Tämä ongelma kertaantuu entisestään

rakenteen hankalien nurkkien kohdalla, joiden tiivistäminen siistiksi tällaisten laitavutuksien jälkeen olisi hyvin hankalaa ja tähän ongelmaan ei löydetty mitään tarpeeksi hyvää ratkaisua tämän projektin puitteissa. Toisaalta akryylin liimaaminen ei kärsisi tästä ongelmasta ja liimasauma ei myöskään aiheuttaisi pohjamateriaalille venymiä, jotka voisivat ilmetä valon epätasaisena läpäisyinä. Tässä kohtaa tarkennettakoon, ettei akryylin liimaaminen ole teknisesti liimaamista, vaan kemiallista hitsausta. Liitoksessa käytettäisiin MMA-monomeeria joka polymerisoituisi PMMA:ksi (akryyliksi) ja näin toteutettu liimasauma voisi olla varsin huomaamaton ja kestävä. Näiden saumojen, mittatarkkuuksien ja kyseisen muotoisen pinnan yleisesti ottaen käyttäytymistä halutussa mittakaavassa kuitenkin haluttiin päästä tarkastelemaan ja täten prototyyppiin päädyttiin tilaamaan tällainen pinta, josta mallinnus kuvassa 36.



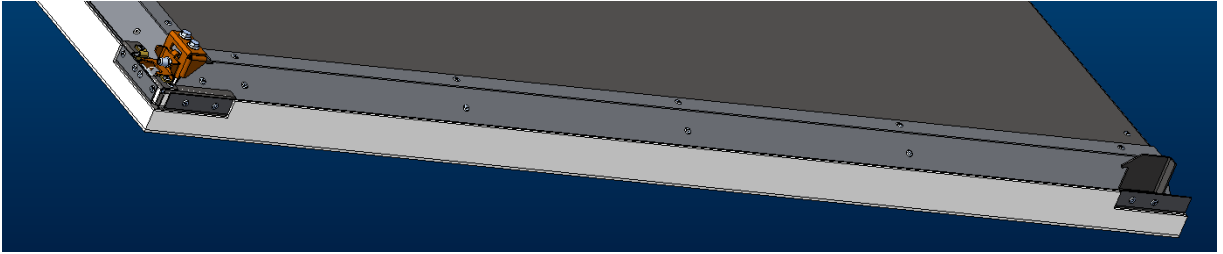
Kuva 36. Viidestä erillisestä akryylipalasta liimatun valaisimen pintavaihtoehdon malli.

Polykarbonaatin taivuttamisen kohdalla vastaan tuli useita samoja haasteita kuin akryylin lämpömuovauksessa, kuten nurkkien visuaalisuus ja taitoskohtiin syntyvät jännitykset ja venymät. Levytyökeskuksella kylmänä särmääminen kuitenkin tarjoaisi mahdollisuuden parempiin mittatarkkuuksiin ja mahdollisuuden kokeilla kahden taitoksen laitaa. Näin ollen päädyttiin prototyyppiä varten myös tilaamaan tällainen polykarbonaatista särmätty pintavaihtoehto. Havainnolliste tällaisen version laidan erosta akryyliseen versioon kuvassa 37.

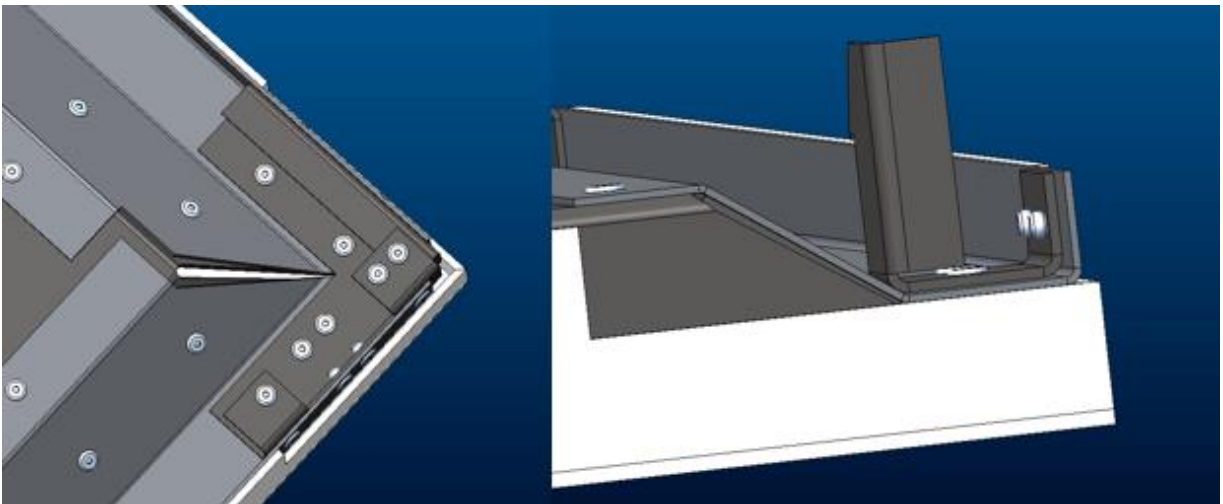


Kuva 37. Kahteen kertaan särmäämällä toteutettu laitamuoto polykarbonaattisessa pintavaihtoehdossa.

Kuvissa 36 ja 37 pintamateriaalissa näkyvät leikkaukset nurkkien lähistöllä on tehty helpottamaan kiinnityskomponenttien liittämistä jäykistelistoihin. Nämä mahdollistavat näiden komponenttien liitoksiin käsiksi pääsemisen pinnan ollessa paikallaan ja toisaalta poistaa vaatimuksen näiltä liitoksilta olla upotettuja jäykistelistan sisälle, niin ettei yhdenkään liitoksen johdosta jäykistelistan laidan tasopinnan ulkopuolelle ulotu mitään. Kuvassa 38 on esitetty tämä vuorovaikutus mallin muodossa. Kiinnityskomponenteista myös tehtiin viimeistellyt versiot prototyypissä käytettäviin kulmaan asetettuihin kehysmallisiin jäykistelistoihin yhteensopiviksi. Kuvassa 39 on vasemmalla havainnollistettu saranan asennuskohtana toimivan nurkkapalan asettuminen jäykistelistoihin ja sen ansiosta sallittu valmistusystävällisempi jäykistelistojen päätyjen muoto. Jäykistelistoilla on myös täten suurempi valmistustoleranssi, sillä nurkkapalaa voidaan käyttää yhdistämään ne vaikka nurkan puoleisten laitojen muodot heittäisivät tai jäykistelistan kokonaispituus olisi vajaa. Kuvan 39 oikeassa laidassa puolestaan on havainnollistettu sitä, kuinka osa kiinnityskomponenttien korkeudesta on upotettu viiston laidan ansiosta valaisimen muiden dimensioiden sisään kokonaisuuden madaltamiseksi.



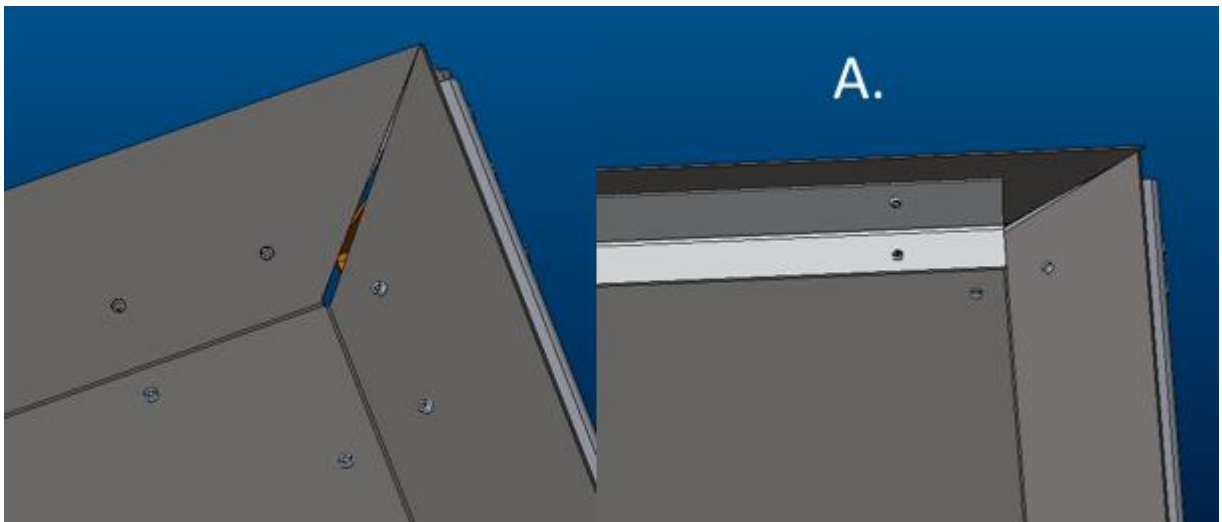
Kuva 38. Havainnolliste pinnan laitojen leikkausten tarkoituksesta suhteessa kiinnityskomponenttien liitoksiin.



Kuva 39. Vasemmalla kuvaus nurkkapalan asettumisesta suhteessa jäykistelistoihin ja oikealla havainnolliste siitä kuinka osa kiinnityskomponenttien korkeudesta on upotettu valaisimen viistoon laitaan.

Prototyypin alussa viitatuista komponentteihin liittyvistä kompromisseista suurin liittyi valittuihin LED-moduuleihin. Projektin aikana ilmeni ongelmia erinäisten erikoisempien LED-moduulien hintakyselyissä ja lopulta päädyttiin käyttämään aiemmin monissa kohteissa käytettyjä tutun toimittajan LED-nauhoja. Tämä toisaalta sulki pois erilaisten moduulien vaikutusten tarkastelun, mutta mahdollisti kuitenkin tärkeimmät testit liittyen rungon asetustaisuuteen ja pintamateriaalin vaikutukseen valaistuksen yhteydessä. Tämä myös varmisti rungon taustavaihtoehdoista kiinteän levymäisen vaihtoehdon käytön. Tämän levyn laitatavuuksien nurkat myös pystyttäisiin prototyypin tapauksessa jättämään aukinaisiksi johtuen jäykistelistoihin liittyvästä nurkkapalaratkaisusta. Tämän ansiosta pystyttiin välttämään

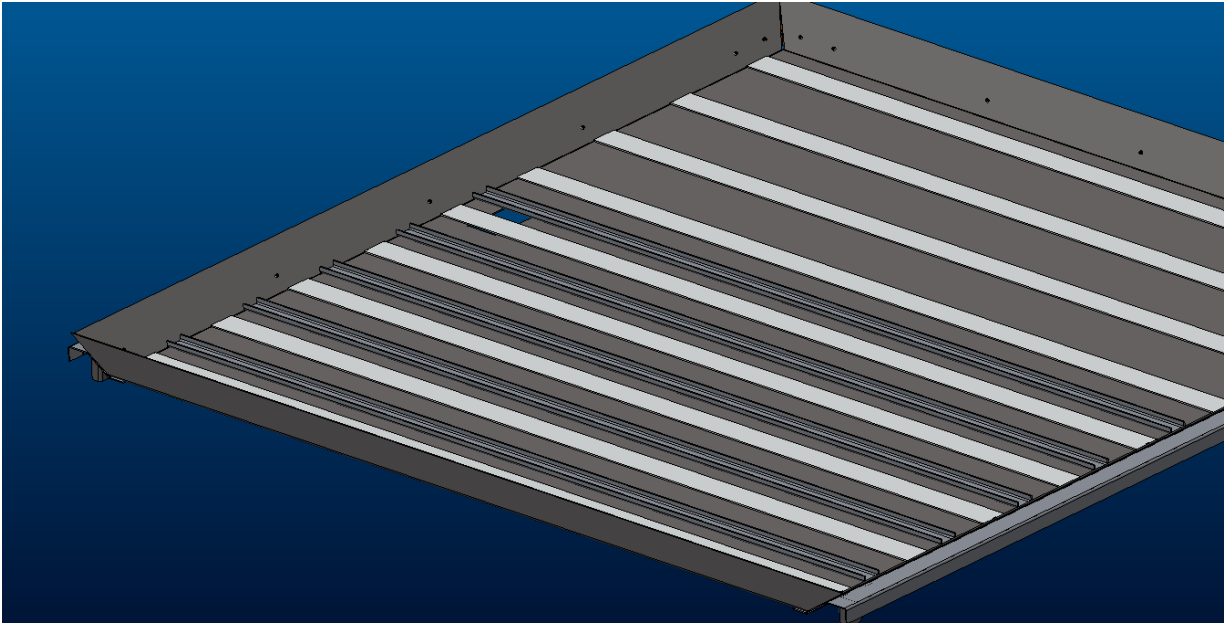
tarve hitsata alumiinia ja toisaalta helpotettiin taustalevyn muotoja niin, että ne olisi mahdollista toteuttaa lävistämällä. Kuvassa 40 on esitetty vasemmalla kuinka taustalevyn nurkka pystytään jättämään aukinaiseksi jäykistelistojen tukiessa sitä. Tämä nurkkien avoimeksi jättäminen kuitenkin aiheutti kysymyksiä liittyen valaisimen etulaidan (A-laidan) tukevuuteen, sillä sitä eivät tue kehysjäykistelistat ja sen pitäisi silti pysyä tarpeeksi tukevana, jotta siihen pystytään tarvittaessa kiinnittämään pinnan laita. Kuvan 40 oikealla puolella on kuvattu tätä ongelmaa ratkaisemaan valaisimen sisälle lisätty jäykistelistat.



Kuva 40. Vasemmalla taustalevyn avonainen nurkka ja oikealla valaisimen sisälle etulaitaa tukemaan lisätty jäykiste.

LED-nauhojen eri välitysten vaikutusten testaamisen helpottamiseksi lisättiin valaisimeen vain prototyyppiä varten suunnitellut alumiiniset taustalistat. Näiden ansiosta LED-nauhoja ei tarvitsisi kiinnittää suoraan valaisimen taustaan, kuten normaalisti valaisimen tapauksessa olisi tarkoitus tehdä, vaan ne kiinnitettäisiin näihin taustalistoihin. Tällöin nämä taustalistat pitäisivät nauhat oikeassa asennossa ja niitä voitaisiin liikutella eri etäisyyksille toisistaan testien aikana. Lisäksi taustalistojen yhteydessä avautui mahdollisuus testata miten LED-nauhan pinnan lähelle asetettu valonhajautuskalvo (engl. diffuser film) vaikuttaisi näiden nauhojen toimintaan, kun laajemmalla avautumiskulmalla olevien komponenttien testaamista ei päästy suorittamaan. Kuvassa 41 on havainnollistettu näiden listojen asettumista valaisimen sisäpintaan. Pääasiallinen nauhojen välityksien testailu olisi tarkoitus suorittaa prototyypin ollessa kuvan

mukaisesti käännettynä valaisusuunta ylöspäin, joten näitä listoja ei tarvitsisi erikseen kiinnittää näitä testejä varten. Toisaalta listojen reunoihin jätettiin tarpeeksi tilaa, jotta mahdollisten valaisimen roikutuksien yhteyksissä ne voitaisiin liittää tilapäisesti mekaanisesti. U-uran muotoiset taustalistat on tarkoitettu aiemmin mainitun kalvotestauksen yhteydessä käytettäviksi.

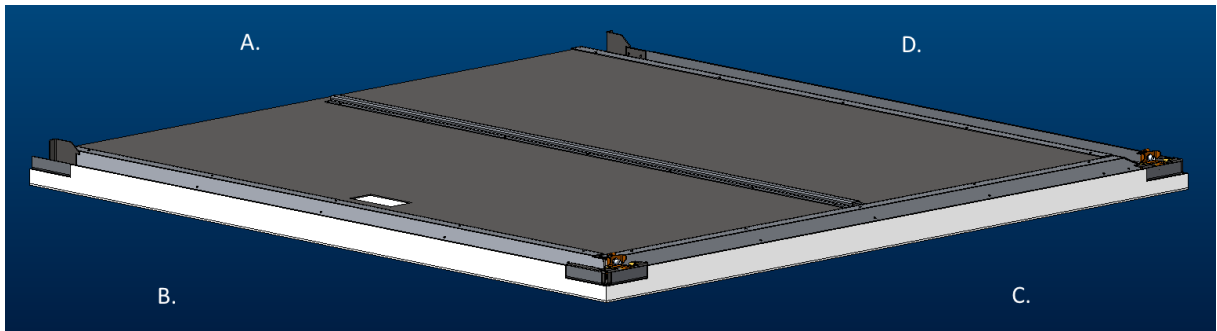


Kuva 41. Testien aikana LED-nauhojen välisten etäisyyksien säätämiseen tarkoitettuja taustalistoja valaisimen rungon taustapintaa vasten.

LED-nauhojen välityksien vaihtelevuuden takia ei näiden johdotuksille voitu suunnitella oikeille kohdille laitoihin osuvia reikiä, vaan prototyypin yhteydessä päätettiin käyttää suurehkoa valaisimen taustassa sijaitsevaa suorakulmaista aukkoa. LED-nauhoille valituille ajureille ja niiden säätömekanismeille ei myöskään suunniteltu runkoon erillisiä kiinnityspaikkoja, sillä ne eivät välttämättä aina olisi samanlaisia, ne haluttaisiin usein sijoittaa muutenkin hissikorin katolle ja tarvittaessa valaisimen rakenne itsessään jättää niille rutkasti sijoitusvaihtoehtoja. LED-nauhojen valaistuksen säätöön ei prototyypin tapauksessa haluttu muita ominaisuuksia kuin mahdollisuus himmentää niitä. Tämän johdosta niille valittiin vakiojännitteinen ajuri, jonka virranjohtoa pystyttäisiin säätämään yksinkertaisen potentiometrin avulla lineaarisesti. Tämä ohjausperiaate olisi toisaalta myös vartenotettava

vaihtoehto lopulliseen valaisimeenkin, sillä pääasiassa himmennuksen ainut tarkoitus on säätää asennushetkellä valovoimakkuus halutulle tasolle ja tämä on hyvin kustannustehokas tapa toteuttaa se.

Viimeinen prototyyppiä varten tehty muutos valaisimen rakenteeseen liittyi taustalevyn valmistukseen. Johtuen yrityksen paikallisesta levykokovalikoimasta, päädyttiin taustalevy jakamaan kahteen osaan. Täten toisaalta myös helpotettiin näiden pienempien osien käsittelyä valmistuksen eri vaiheissa, mutta toisaalta jouduttiin kehittämään ratkaisu niiden liittämiseksi. Alumiinin hitsauksen välttämiseksi, ja mahdollisimman pienien rakenteellisten muutosten tekemiseksi, päädyttiin suorittamaan tämä liitos mekaanisesti ylimääräistä liitoslistaa käyttäen. Koska valaisimen taustan yläpuolelle kiinnityskomponenttien linjojen väliin jää rakenteen ansiosta ylimääräistä tilaa, niin tämä liitoslista päätettiin myös muotoilla toimimaan lisäjäykisteenä. Kuvassa 42 on tämän lisäyksen jälkeen muodostuneesta prototyypissä käytetystä valaisimen mallista yleiskuva.



Kuva 42. Yleiskuva prototyypissä käytetyn valaisimen mallista.

4.3.2 Testattavat asiat

Ensisijaiset testattavat asiat prototyypissä liittyivät muovattuun pintaan ja LED-komponentteihin. Pintaan liittyen kysymyksiä olivat esimerkiksi:

- Millaisen visuaalisen lopputuloksen akryylin liimaus ja polykarbonaatin särmäys tuottavat?
- Miten akryylin liimasaumat ja polykarbonaatin taitoskohdat vuorovaikuttavat valaistuksen kanssa?
- Kuinka jäykkiä tai taipuisia nämä kappaleet ovat?
- Miten polykarbonaatin tapauksessa sen laitojen toinen taitos toimii liitoksen yhteydessä?
- Osoittautuuko jompikumpi vaihtoehdoista toista selkeästi paremmaksi ja miksi?

LED-komponentteihin liittyen puolestaan:

- Millaisilla välityksillä ja asetustäisyyksillä LED-nauhojen tuottaman valon intensiteetti olisi tasainen pintamateriaalin pinnassa?
- Miten LEDien suuntaaminen erilaisissa kulmissa vaikuttaa valaisimen pinnassa havaittavaan intensiteettijakaumaan? (vrt. jos laitimmaisit LEDit eivät valaise pinnan nurkkia tarpeeksi hyvin, olisiko tätä mahdollista ratkaista ylimääräisellä suunnatulla nauhalla?)
- Liittyykö LED-moduulien asennukseen jotain ongelmakohtia, joita ei ennalta osattu ottaa huomioon suunnitteluvaiheessa?

Loput havainnoinnin painopisteistä liittyivät rungon osien valmistettavuuteen ja kasaukseen, sekä sen käyttäytymiseen kasattuna. Tällaisia olivat esimerkiksi havainnot liittyen rungon jäykkyyteen ja sen mahdollisesti aiheuttamiin jatkotoimenpiteisiin sekä rungon käsittelyyn ja sen mahdollisiin helpotuksiin.

5 CASE 2: LAIDASTA VALAISTU

Tässä osiossa keskitytään laidasta valaistavan valaisinvaihtoehdon kehitysvaiheisiin ja osakokonaisuuksissa tehtyihin suunnitteluratkaisuihin. Lisäksi loppuosassa esitellään tästä mallista tehty suuntaa antava prototyyppi ja pääasialliset kysymykset, joihin sen avulla pyrittiin saamaan vastauksia.

5.1 Periaate ja lähtökohdat

Laidasta valaistu variantti otettiin jatkokehitykseen, sillä se tarjosi mahdollisuuden hyvin kompaktiin ja helposti mitoiltaan varioitavaan rakenteeseen. Kyseisellä toimintaperiaatteella toimivia valaisimia on myös käytetty useissa kohteissa aiemminkin onnistuneesti ja erinäisille rakenteen kannalta pakollisille osto-osille oli jo olemassa hankintaverkostoa. Toisaalta tässä vaihtoehdossa huomattavasti suurempi osa osista olisi nimenomaan muualta ostettavia oman valmistuksen sijaan verrattaessa suoraan valaistuu varianttiin.

Myös tätä valaisinvaihtoehtoa suunniteltaessa keskityttiin rajatuin vakiokontaktipinnoin muuhun hissikoriin liitettävän mahdollisimman itsenäisen tuotteen suunnitteluun. Rakenteensa takia oli alusta asti selvää, että tämä vaihtoehto koostuisi kehyksellisistä suoraan valaistua vaihtoehtoa pienemmistä paneeleista, mutta näiden paneelien varioiminen mittojen mukaan ja valaistuksen jakaminen useammalle tällaiselle olisi helpommin toteutettavissa.

5.2 Osakokonaisuuksia

Laidasta valaistavan valaisinmallin kriittisenä ytimenä toimii valo ohjaava komponentti, tässä tapauksessa valonohjauslevy (engl. light guide plate, LGP), ja siihen valo tuottava osa, tässä tapauksessa LED-nauha. Valonohjauslevyn ominaisuuksista riippuen sen molemmiin puolin saatetaan tarvita ylimääräisiä komponentteja. Mahdollisimman yksinkertaisen levyn tapauksessa tämä tarkoittaa sen valaisupuolelle tulevaa pintaa, joka voi yksinkertaisimmillaan toimia vain visuaalisesti halutunlaisena pintana tai toisissa tapauksissa myös hajauttaa siihen tulevaa valoa, ja taustapuolelle tulevaa heijastelevyä, joka voi esimerkiksi olla peilipintainen metallilevy tai mattavärjätty muoviosa. Joissain valonohjauslevyissä osa näistä muiden levyjen funktioista on integroitu siihen, mutta tällaisten yksilöiden ympärille koko rakenteen

perustaminen olisi jälleen liian pitkälle tiettyjen yksittäisten toimittajien ja tuotteiden varaan laskemista ja lisäksi tämän projektin yhteydessä esille tulleet tällaiset levytuotteet olivat myös kalliita ja osa vaikeasti saatavia. Täten suunniteltavan valaisimen pohjana voidaan pitää kolmesta levystä kasattavaa kerrosrakennetta ja tähän valoa tuottavia LED-komponentteja. Tämän lisäksi tarvitaan näitä kaikkia kasassa pitävä ja ne suhteessa toisiinsa paikoittava runko ja tämän kokonaisuuden hissikorin sisäkattoon kiinnittävät komponentit.

5.2.1 Kerrosrakenne

Laidasta valaistavan valaisinvaihtoehdon keskeinen rakenteellinen pohja on kolmesta levystä koostuva kerrosrakenne. Näistä kriittisimpänä valmistuksen kannalta voidaan pitää keskelle asettuvaa valonohjauslevyä. Tällaiset levyt ovat usein 7-9mm paksuisia akryylilevyjä, joiden pintaan on joko rasteroinnilla, lastuavalla työstöllä tai jollain muulla tavalla tuotettu valoa haluttuun suuntaan ohjaava kuviointi. Tämä kuviointi voi olla joko pisteistä, urista tai jostain muusta muodostuva, mutta yleisesti ottaen tihenee levyn keskustaa kohden, jotta katselusuuntaan suuntautuva valo leviäisi sinne tasaisesti. Tästä johtuen tällaiset levyt pitää tehdä juuri tietyille mitoille kuvioituina. Tällaisten levyjen tuottaminen ei ole tämän projektin yhteydessä yrityksen oman valmistuksen piirissä, joten niiden kuviointiin yms. liittyvät yksityiskohdat jäävät suunnittelutyön ulkopuolelle. Näitä levyjä on myös aiemmasta 7-9mm aineenpaksuudesta poikkeavia, esimerkiksi jotkin uutuudet ovat jopa vain 4mm, mutta tässä projektissa keskitytään pääasiassa suunnittelemaan rakenne näiden paksumpien levyjen mukaan, sillä niiden suhteen on enemmän valinnanvaraa vaihtoehdoista ja toimittajista.

Valonohjauslevyn katselupuolelle sijoittuva pintalevy/diffuusori voi olla tapauskohtaisesti hyvin erilainen. Tämä voi johtua esimerkiksi asiakkaan vaatimuksista liittyen valaisimen visuaaliseen ulkonäköön tai johonkin säädökseen liittyvistä materiaalivaatimuksista. Tämän takia, vaikka tässä projektissa pääasiassa keskitytäänkin kyseistä komponenttia varten suunnitteluratkaisuja tehdessä pääasiassa 2-3mm aineenpaksuisiin muovilevyihin, jollaisia on käytetty monissa tapauksissa valaisimien pintalevyinä, pyritään myös mahdollistamaan mitoiltaan erilaisten pintojen valinta. Ääriesimerkkinä tällaisesta voisi pitää esimerkiksi

laminoitua lasia, jonka tapauksessa tämän kappaleen asettamat tila- ja kestävyysvaatimukset muulle rakenteelle ovat hyvin erilaiset.

Kolmanteen levyosaan kohdistuu rakenteesta kahta edellistä osaa huomattavasti vähemmän vaatimuksia. Heijastelevy voi joissain tapauksissa olla esimerkiksi peilipintainen metallilevy, mutta tässä yhteydessä mattapintainen muoviosa riittää todennäköisesti ajamaan tätä asiaa. Tätä osaa kuitenkin käsitellään muuta rakennetta suunniteltaessa pääasiassa 1-2mm aineenpaksuisena yhtenäisenä levyosana tässä yhteydessä. Aiemmin mainittu muiden rakenteen levyjen toimintojen integrointi itse valonohjauslevyyn tulee useimmiten vastaan juurikin tämän heijastetason kohdalla. Tällaista integroitua rakennetta ei käytetä tässä projektissa missään vaiheessa suunnittelun lähtökohtana, mutta niiden olemassaolo tiedostetaan ja valaisinta suunniteltaessa pyritään myös mahdollistamaan tällaisten komponenttien käyttö niin haluttaessa.

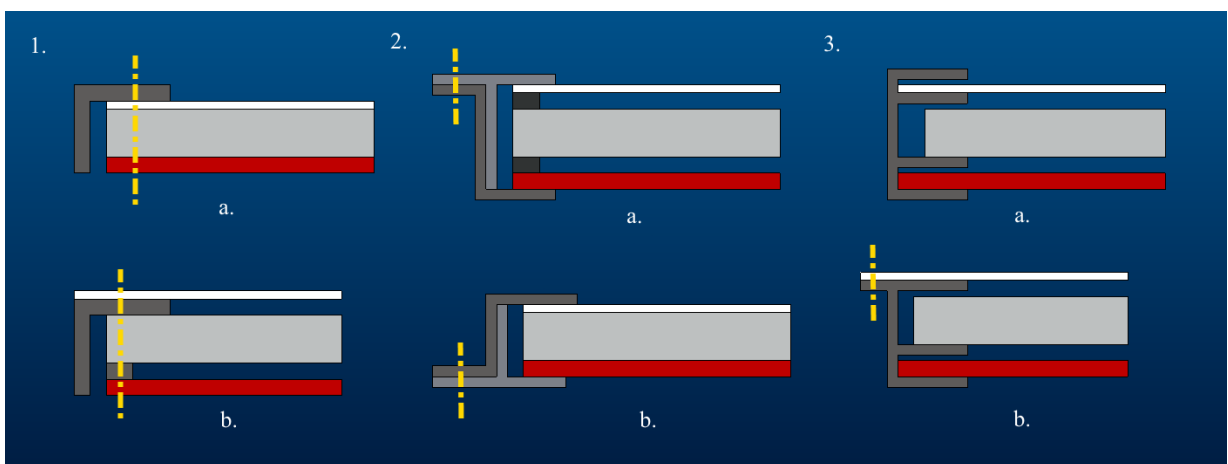
5.2.2 LED-komponentit

Tämän valaisinmallin tapauksessa käytettyjen LED-moduulien kohdalla periaatteellisten vaihtoehtojen määrä on huomattavasti suoraan valaistavaa vähäisempi, koska nauhamaiset LED-moduulit kuuluvat hyvin oleellisena osana tämän valaisintyyppin nykyisin olemassa olevaan peruserätyypin. Vaikka muitakin vaihtoehtoja on toki olemassa valon tuotolle tällaisessakin valaisimessa, on tässä projektissa tavoiteltujen päämäärien kannalta hyvin selvää, että tässä yhteydessä tulnaisiin käyttämään LED-nauhoja. Näiden avulla tuotetaan valoa valmiiksi valonohjauslevyn toiminnallisuuden kannalta sopivalla pinta-alalla, eikä täten tämän lisäksi ylimääräisiä valoa kohdistavia ratkaisuja välttämättä tarvita. Lisäksi LED-nauhojen dimensiot vaativat omalta osaltaan hyvin vähän tilaa valonohjauslevyn laitojen ulkopuolelle muodostuvalta rakenteelta ja niitä on tarjolla suuri määrä eri valotehoja ja -sävyjä tarvittaessa kohteen vaatimuksien mukaisesti valittaviksi.

5.2.3 Kehys

Tämän valaisintyyppin rungon tärkein tehtävä on pitää valaisimen kerrosrakenne kasassa ja valoa tuottavat LED-nauhat oikeassa paikassa suhteessa valonohjauslevyyn. Koska tämän projektin

tavoitteena on tuottaa mahdollisimman yhtenäinen valaiseva pinta, ei kerrosrakenteen levyjen väliin valaisevan osion taakse pystytä helposti sijoittamaan rakennetta kannattelevia komponentteja. Suurin ongelma tällaisten osien kohdalla on se, etteivät ne saisi vaikuttaa valon kulkuun lähes ollenkaan, jotta ne eivät aiheuttaisi havaittavia muutoksia valaisevassa pinnassa. Täten yksinkertaisin tapa tukea tätä levyistä koostuvaa rakennetta on sen reunoilta kehysmäisesti. Tällaisille kehyksille määriteltiin projektin aikana kolme pääasiallista tapaa pitää levymäiset kappaleet paikoillaan. Kuvassa 43 on havainnollistettu esimerkkejä näistä tavoista. Vaihtoehdossa 1 kiinnitys on toteutettu mekaanisesti. Tällaisen liitoksen pääasiallinen etu on sen yksinkertaisuus. Vaihtoehdossa 2 levyjä pitää paikallaan kahden tai useamman profiilin osan puristus toisiinsa nähden. Tällaisen vaihtoehdon hyviä puolia ovat erinäiset mahdollisuudet liittyen rakenteen purkamiseen ja täten huolto- ja valmistusystävällisyyteen ja toisaalta se ettei valoa välittäviä osia tarvitse muokata mistään kohdasta ja täten vaarantaa niiden ongelmaton toimintaa. Vaihtoehdossa 3 osat on sijoitettu kehyksen sisälle ja pysyvät paikoillaan niille suunnitelluissa ”lokeroissa”. Tässä vaihtoehdossa toteutuu sama etu kuin vaihtoehdossa 2 liittyen levyjen muokkaamattomuuteen ja lisäksi levyjen väleihin ei välttämättä tarvitse suunnitella ylimääräisiä eristeitä mikäli ne halutaan pitää erossa toisistaan. Näitä tapoja voi tietysti yhdistellä, kuten esimerkiksi vaihtoehdon 3 kohdassa b, jossa pinta ja valonohjauslevy on sijoitettu profiilin sisään, mutta heijastelevy on kiinnitetty mekaanisesti taustalle.



Kuva 43. 3 periaatteellista tapaa, ja 2 variaatiota jokaisesta näistä tavasta, paikoittaa kerrosrakenteen kehyksen avulla.

Puhtaasti pelkän vaihtoehto 1:n mukaisesti toimivalla rakenteella osoittautui olevan muutamia ratkaisevia ongelmia. Ensimmäisenä suurena jo todettu valonohjaukseen liittyvien toiminnallisten osien muokkautuminen liitoksen aikana. Tämä asettaa vaaroja esimerkiksi tummemmista kaistaleista valaisimen laidoilla, joissa olevat ruuvit peittäisivät kohtia LEDien valokeiloista, tai valonohjauslevyn rakenteen muokkaantumisesta liitoksen johdosta niin ettei se toimi enää täysin alkuperäisen geometriansa mukaisesti. Lisäksi tällaisiin liitoksiin kohdistuisi entistä enemmän riskejä mikäli niitä tarvitsisi avalla ja sulkea useampaan kertaan ja kappaleiden pitäisi olla joko yhdessä pinossa, kuten kuvassa 43 vaihtoehto yhden kohdassa a, tai kiinnitysmenettelyistä tulisi turhan monimutkaisia, kuten vaihtoehdon 1 kohdassa b. Vaihtoehdon 1 hyödyntäminen tosin esimerkiksi pelkän heijastelevyn kiinnityksessä muun rakenteen jälkeen on varteenotettava vaihtoehto jatkoa ajatellen.

Vaihtoehto 2 tarjoaa ennen kaikkea suuren määrän mahdollisuuksia liittyen rakenteen osittaiseen purkamiseen ja täten huollettavuuden helpottamiseen. Esimerkiksi kahdesta osasta koostuva tällainen rakenne voitaisiin avata vain toisesta suunnasta ja tämän puolen profiilin osion mukana voitaisiin poistaa LED-nauha muuta rakennetta avaamatta. Toisaalta joissain tapauksissa poistamalla kaikki toisen puoliskon osat voitaisiin koko kerrosrakenne purkaa tarvittaessa, silti jättäen puolet kehyksestä kasaan, jonka mukaan muut osat voitaisiin taas kasata takaisin. Tämä vaihtoehto myös sallii muihin verrattuna paremmin eri kokoisia komponentteja mahdollistavan rakenteen.

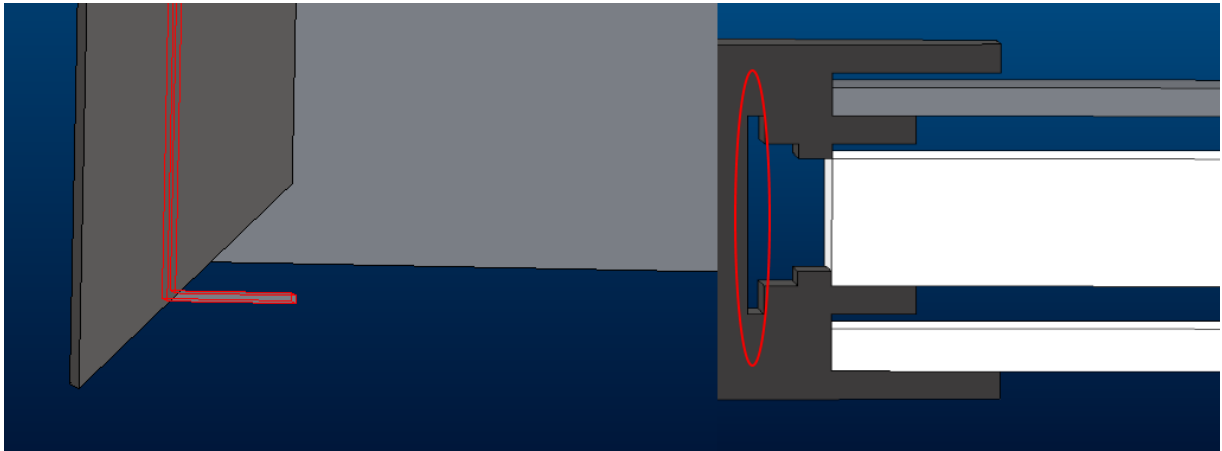
Vaihtoehto 3 on omalta osaltaan yksinkertainen ja rakenteen luotettavasti kasassa pitävä, ilman että valoa johtavia levyjä tarvitsee muokata kiinnityksen yhteydessä. Tämä rakenne myös voidaan suunnitella, joko valmiiksi levyjä toisistaan erossa pitävillä tasoilla varustettuna, tai niille suurempia paikkoja tarjoavana, jolloin eri kokoisia tiivisteitä käytettäessä voidaan levyjen paksuuksia tarvittaessa varioida. Tämän vaihtoehdon pääasiallinen ongelma on se, että se tarvitsee purkaa lähes kokonaan mikäli jotain siitä tarvitsee huoltaa. Kehyksestä tarvitsee poistaa vähintään kokonainen laita mikäli LED-nauhaan halutaan päästä käsiksi ja tällöin muun rakenteen kasassa pysyminen on hyvin kyseenalaista missään tasaista pintaa vasten koko alaltaan tuetusta asennosta poikkeavassa tilanteessa. Lisäksi kerrosrakenteen purkaminen ja

takaisin kasaaminen ja ylipäättään alkuperäinen kokoonpanokin olisivat vaihtoehto kahta työläämpiä toimenpiteitä.

Vaihtoehto 1 olisi toteutettavissa suhteellisen vaivattomasti levyosista valmistamalla, mutta kaksi muuta menevät hieman monimutkaisiksi. Tähän toisaalta oli jo alusta asti varsin selkeä vaihtoehto olemassa, nimittäin kehyksien valmistaminen pursotetuista profiileista. Tällaisiin profiileihin olisi mahdollista suunnitella esimerkiksi kiinnityksiä ja erinäisiä tuentoja varten varsin monimutkaisiakin muotoja ja rungon valmistuksen kannalta valaisimen ulkodimensioiden variominen vaatisi vain profiilin katkaisemista eri pituuksille. Tämä myös sopisi hyvin yhteen materiaalivalinnan kanssa, sillä profiilit tehtäessä tähän valmistusmenetelmään sopivasta materiaalista, kuten alumiinista, ne olisivat kevyempiä, kuin esimerkiksi teräksiset, ja johtaisivat hyvin lämpöä pois muuten väkisinkin varsin ahtaassa tilassa olevilta LED-nauhoilta. Alumiinisten pursotteiden suhteen yrityksellä myös oli aiempia kontakteja ja esimerkiksi kustannuksiin ja vaadittuihin toimitusmääriin liittyviä seikkoja pystyttiin ottamaan huomioon alusta alkaen. Nimenomaan tämä toimitusmäärä aiheutti muutamia rajoitteita suunnittelutyölle. Tämä oli esimerkiksi pääasiallinen syy sille miksi epähomogeeniset valaisinmallit, joissa siis esimerkiksi kaksi laitaa, jotka sisältävät LED-nauhat, ja kaksi muuta laitaa olisivat erilaiset keskenään, päätettiin hylätä ja keskittyä malleihin, joissa kaikki laidat koostuvat samasta profiilista tarvittavien muottien määrän vähentämiseksi. Vaihtoehto 3 olisi sinänsä parempi tämän seikan suhteen verrattaessa vaihtoehto kahteen, sillä siinä pystyttäisiin valmistamaan kaikki tarvittavat profiilit yhtä muottia hyödyntäen.

Vaihtoehto 1 päätettiin viimeistään hylätä siinä vaiheessa, kun selvisi että aiemmissa yrityksessä tehdyissä testeissä valonohjauslevyä hyödyntävissä valaisimissa oli havaittu erinäisiä normaalista poikkeavia valoilmioita, mikäli kyseiset levyt olivat suoraan toisiaan vasten kasattuna. Tämä myös asetti lisävaatimuksia kahdelle muulle vaihtoehdolle. Esimerkiksi, mikäli profiilit itsessään eivät pitäisi levyjä erossa toisistaan, tarvitsisi niiden väliin sijoittaa jonkinlainen tiivistys ja toisaalta rakenteen tukeminen heijastelevyn taustalle asetetuilla jäykistelistoilla ei enää olisi vaihtoehtona, sillä tätä jäykistävää vaikutusta ei saataisi välitettyä valonohjauslevylle ja pinnalle, joista jälkimmäinen olisi nimenomaan kriittisin jäykistystä tarvitseva osa kerrosrakenteesta.

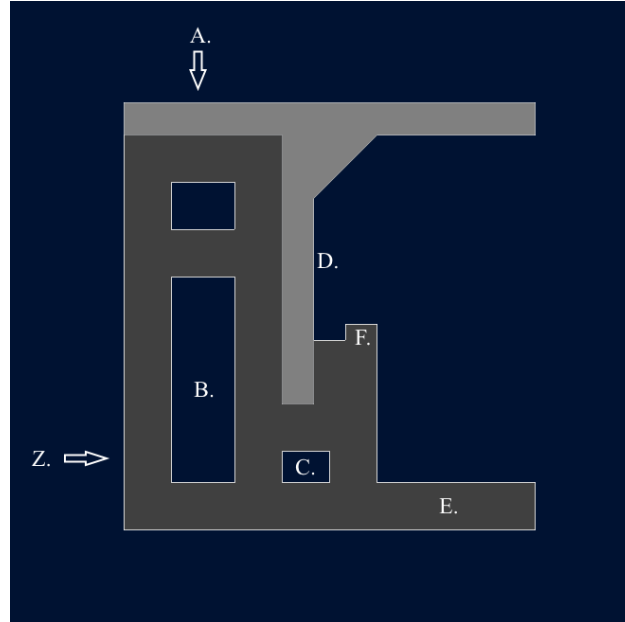
Vaihtoehdon 3 kohdalla pyrittiin sen purettavuuteen liittyvää ongelmaa ratkaisemaan esimerkiksi lisäämällä LED-nauhan taustalle listamainen osa, jonka avulla se voitaisiin mahdollisesti vetää ulos rakenteesta tarvittaessa. Kaikki tähän kehitellyt vaihtoehdot kuitenkin muuttuivat vähintäänkin epäkäytännöllisiksi siinä vaiheessa, kun päädyttiin lopputulokseen, että kaikki valaisimen laidat tulisi valmistaa samasta profiilista. Kuvassa 44 on yksi esimerkki tällaisesta hahmotelmasta, jossa avoimena näkyvälle sivulle olisi asetettu muista profiileista poikkeava yksilö, joka olisi avattavissa tai käännettävissä sivuun niin että molemmista tätä laitaa vierustavista laidoista olisi voinut vetää LED-nauhan ulos tämän laidan kautta. Lisäksi vaihtoehdon 3 kohdalla profiilin valmistaminen niin, että se sallisi levyosissa normaalista poikkeavia aineenpaksuuksia, olisi huomattavasti ongelmallisempaa vaihtoehtoon 2 verrattaessa. Näin ollen laidasta valaistavaa valaisinvaihtoehtoa lähdettiin jatkokehittämään vaihtoehdon 2 mukaisen usealla profiililla yhteen puristetun rakenteen pohjalta.



Kuva 44. Hahmotelma siitä miten LED-nauha olisi mahdollisesti voitu vetää yksiosaisesta profiilista ulos tarvittaessa. Oikeassa laidassa on merkitty ura, johon tätä tarkoitusta varten oleva lista olisi sijoitettu.

Tällaisesta rakenteesta vertailtiin useita eri vaihtoehtoja, mutta lopulta päädyttiin kuvassa 45 esitetynlaiseen periaatteeseen muutamien syiden ja priorisointien takia. Ensimmäinen rakenne päätettiin tehdä takaapäin (kuvassa suunnasta A) avattavaksi. Tällöin valaisinpaneeli pitäisi vähintään avata katosta, jos rakennetta haluttiin päästä avaamaan, mutta toisaalta profiilin alaosa (kuvassa tummemmaksi värjätty osa) pysyisi aina kiinteänä eikä siihen kiinnitettyä näkyvälle

puolelle tulevaa koristelistaa tarvitsisi irrottaa avauksen yhteydessä. Toinen vaihtoehto olisi ollut profiilin irrotettavuus suoraan paneelin ollessa katossa, mutta tämä olisi vaatinut siihen koristelistan puolelta käsiksi pääsemisen ja muutamia muita erilaisia rakenteellisia valintoja. Tätä avattavuuden suuntaa silmällä pitäen suunniteltiin kehyksen ulkolaitaa kiertävä alue, jonka kohdalta profiilin yläosan (kuvassa vaaleammaksi värjätty) ruuvaaminen kiinni alaprofiiliin olisi mahdollista. Tämä kiinnityskohta suunniteltiin tarkoituksella jyrkemmäksi, kuin pelkän yläprofiilin paikallaan pitäminen olisi vaatinut, sillä siten sitä voitaisiin myös myöhemmin hyödyntää kiinnityskomponenttien kiinnityksessä. Tämän rakenteen ideana olisi se, että siihen kiinnitettävällä ruuvilla olisi useampi taso joihin kiinnittyä. Lisäksi tyhjiä profiilia kiertäviä ”onkaloita” voitaisiin hyödyntää profiileiden kiinnityksessä toisiinsa. Tällainen liitos voitaisiin tehdä esimerkiksi sijoittamalla kohtaan B kehyksen nurkassa kahdelle laidalle jatkuva kappale ja kiinnittämällä se suunnasta Z profiileihin. Osittain tämän liitoksen helpottamiseksi ja osittain vähemmän tarpeellisen materiaalin vähentämiseksi profiiliin myös lisättiin kohtaan C tyhjä alue. LED-nauha kiinnitettäisiin kohtaan D, joten sen saisi irrotettua valaisimesta yksinkertaisesti irrottamalla halutun laidan yläprofiilin. Kohta E kannattelisi sen yläpuolelle kasattavaa kerrosrakennetta. Tämän rakenteen levyosien mahdollisia aineenpaksuuden vaihteluita voitaisiin kompensoida käyttämällä eri paksuisia tiivisteitä niiden välillä. Kohtaan F lisätyn ulokkeen tarkoitus olisi suojata LED-nauhaa sitä vasten mahdollisesti kiilautuvien levyosien aiheuttamalta fyysiseltä kuormitukselta.



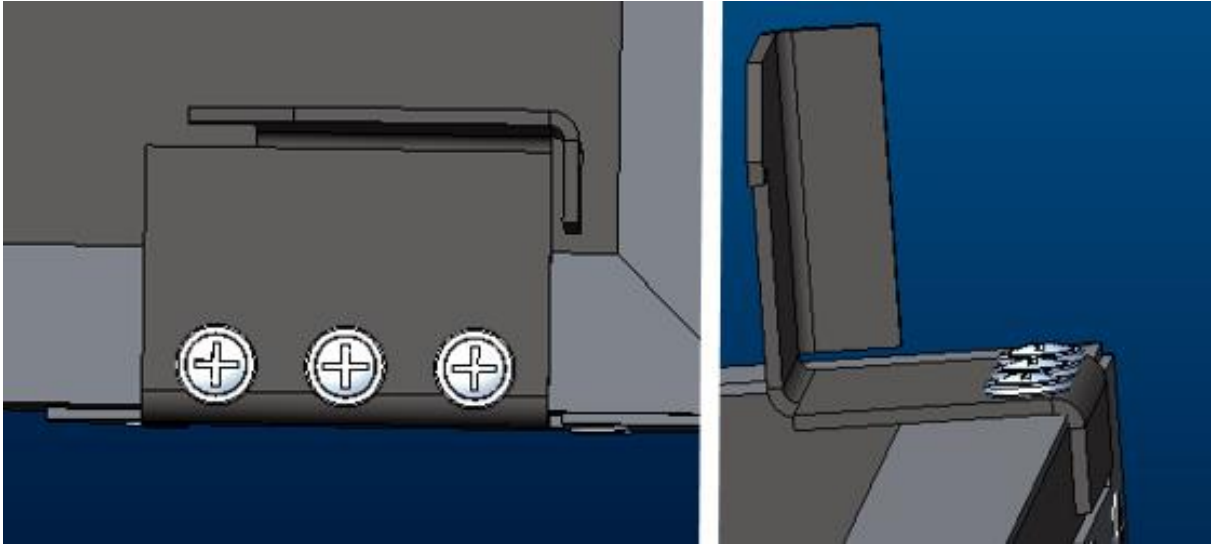
Kuva 45. Kahdesta profiilista koostuvan kehysratkaisun jatkokehitemmä. Kuvan profiilien aineenpaksuus on vasta suuntaa antava.

Valaisimen kehyksien nurkkaliitoksien yhteyteen päätettiin vielä lisätä rakenteen ulkolaitaan teräksiset vahvikepalat. Nämä vahvikepalat myös auttaisivat nurkkien kiinnityksen paikoituksissa. Tämän lisäksi kehyksen näkyvälle laidalle lisättäisiin koristelista. Tämä lista voisi olla tarpeen vaatiessa hyvinkin erilainen ja koska kehyksen rakenteen ansiosta sitä ei tarvitsisi irrottaa valaisimen mahdollisen avauksen yhteydessä, voitaisiin sen liittämiseen käyttää esimerkiksi teippiä tai jotain muuta vastaavaa menetelmää, jota ei ole suunniteltu irrotettavaksi. Tämä koristelista myös antaa mahdollisuuden suunnitella kehyksen ulkoreunoja hieman ylittäviä rakenteita, sillä se peittäisi ne näkyvistä. Lisäksi, mikäli kehys ei esimerkiksi asettuisi täysin siististi nurkista yhteen, vaikka mekaanisesti olisikin nurkkaliitostyyppin ansiosta tukevasti paikallaan, esimerkiksi hieman virheellisen viisteen takia, voitaisiin tästä seuraavat visuaaliset seuraukset peittää koristelistan avulla. Näistä seikoista johtuen koristelista myös mitoitettiin kehyksen dimensioihin nähden hieman ylisuureksi, niin että sen taitteet eivät tulisi kehyksen reunoja vasten vaan paikoitus tapahtuisi puhtaasti suhteessa toisiin koristelisteihin ja kehyksen pohjaan.

Kehyksen sisään tulevien LED-nauhojen johdotus olisi helposti vedettävissä valaisimen taustan puolelta joko katolle tai muuhun haluttuun paikkaan. Ohjaukseen liittyvät komponentit voisi myös tarpeen vaatiessa sijoittaa itse valaisimen taustalle, mutta tällöin pitää ottaa huomioon niiden aiheuttamat muutokset kerrosrakenteen avattavuudessa ja mahdollisesti tarvittavat lisätuennat tai kiinnityspinnat. LED-nauhojen johtojen vetäminen profiilin sisältä tapahtuisi yksinkertaisesti valaisimen nurkassa yläpuolen profiiliin tehdystä aukosta.

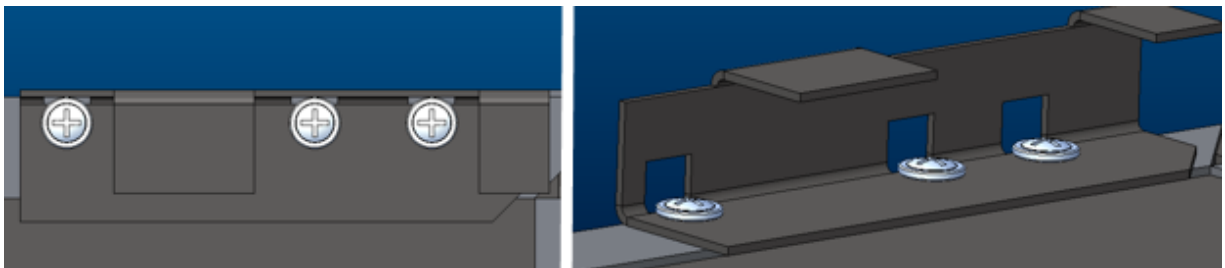
5.2.4 Kiinnityskomponentit

Laidasta valaistavan valaisinvaihtoehdon yhteydessä pyrittiin hyödyntämään samoja yrityksellä yleisessä käytössä olevia kiinnityskomponentteja, kuin projektin muissakin osissa. Tässä valaisinvaihtoehdossa näiden kiinnitykselle jäi kaksi pääasiallista vaihtoehtoa. Joko tehdä valaisimen kehysprofiilia kiertävä toinen kehys, tai kiinnittää ne jollain tavalla olemassa olevaan kehykseen, ilman että ne näkyisivät katselusuuntaan. Tähän liittyvä periaatteellinen päätös oli pyrkiä toteuttamaan liitokset jälkimmäisellä tavalla. Tämä johtuen siitä, että näin saataisiin valaisimen valaisematon kehysosio mahdollisimman pieneksi suhteessa valaisevaan pinta-alaan, vähennettäisiin täten konstruktiossa vaadittavia osia ja yksinkertaistettaisiin rakennetta ja toisaalta koska tällaisen valaisimen paneelikoissa tyydyttiin pienempiin jo muista syistä, ei ylimääräisen kehyksen lisääminen kestävyysnäkökohtien liittyvistä syistä olisi pakollista. Tällaista suoraan kehykseen kiinnitystä varten oli jo profiileja suunniteltaessa suunniteltu niiden kiinnityskohta niin, että sitä pystyttäisiin käyttämään myös mahdollisissa muissa kiinnityksissä. Tähän liittyen ilmeni kuitenkin muutamia haasteita liittyen komponenttien sijoittumiseen. Koska lukko-osan pitäisi sijoittua avausmekanismia lukuun ottamatta valaisimen taakse piiloon, täytyisi sen vastinpalan kiinnitysgeometria myös sijoittaa tietyn matkan päähän valaisimen laidasta. Koska profiilissa oleva kiinnityskohta sijaitsee hyvin kapealla kaistaleella aivan kehyksen reunassa, aiheutuu tästä kuvassa 46 kuvatuunlainen vipuvarsi.



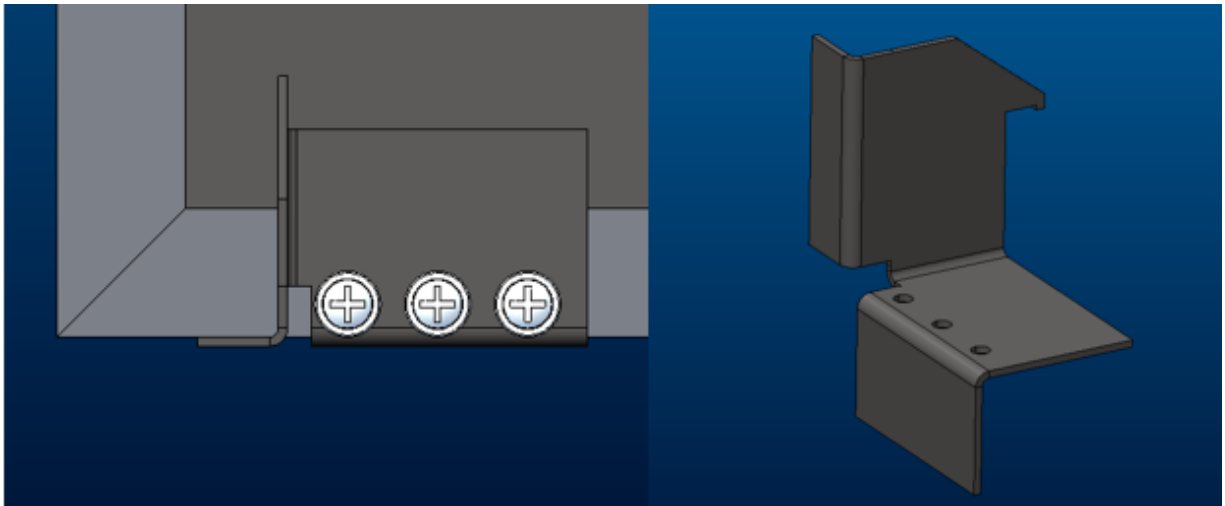
Kuva 46. Lukon vastinpalan kohdalla esiin tullut vipuvarsi ongelma.

Käytetyn saranan asettamia geometrisia vaatimuksia liitoskohdalleen, kuten kuvassa 32 suoraan valaistun variantin yhteydessä on esitetty, ei kyetty täyttämään profiilin itsensä muotoilun avulla. Täten jäljelle jääneeksi vaihtoehdoksi jäi suunnitella eräänlainen välipala, johon sarana kiinnitettäisiin ja joka puolestaan kiinnittyisi kehykseen. Tällaisen kappaleen suunnittelussa ongelmaksi nousi saranan ulkoreunan puolelle kaipaaman suoran laidan ja kehyksen ohuen kiinnitysvyöhykkeen suhde. Kuvassa 47 vasemmalla on havainnollistettu tätä ongelmaa. Osittain helpotusta tähän saatiin kehyksen laidat ylittävän koristelistan ansiosta, mutta tästä huolimatta käytössä oleva tila on varsin ahdas. Saranan kiinnityspalan dimensioita pystyttiin kuitenkin näinollen jatkamaan osittain myös kehyksen laidan yli. Tämän lisäksi tähän palaan lisättiin aukkoja helpottamaan näiden liitoksien tekoa kuvassa 47 oikealla nähtävällä tavalla.



Kuva 47. Saranan kiinnityspalan kiinnittämiseen liittyvä ongelma johtuen kapeasta kiinnitysvyöhykkeestä kehyksen laidoilla.

Valaisimen profiilien irrotuksen yhteydessä edellä mainittujen komponenttien tapauksessa valaisimen sarananpuoleinen laite olisi varsin hankalasti avattavissa, mutta tämän viereiset laidat vaatisivat profiilien kiinnikkeiden lisäksi vain muutaman lukon vastinpalloja kiinnittävän ruuvin avauksen. Koska valaisimeen tulevat LED-nauhat olisivat pääsääntöisesti sijoitettu juurikin näihin lukkojen vastinpallojen puoleisiin laitoihin, pyrittiin tätä irrotusta helpottamaan vielä tästäkin. Useampaan kertaan avattaessa näillä liitoksilla nimittäin olisi vaara kulua ja täten vaarantaa valaisimen kiinnityksen kannalta hyvin tärkeä kohta. Tämän ongelman helpottamiseksi suunniteltiin lukon vastinpaloista versiot, joiden kiinnitys tapahtuisi valaisimen saranoita vastapäätä olevaan päätyyn, johon LED-nauhoja ei olisi yleensä tarkoitus sijoittaa. Tällaisesta muunnelmasta malli kuvassa 48.



Kuva 48. Lukon vastinpalasta tehty versio, joka on kiinnitettävissä saranoita vastapäätä olevaan päätyyn.

5.3 Prototyyppi

Laidasta valaistun valaisinmallin yhteydessä päädyttiin myös suunnittelemaan prototyyppiä, jotta voitaisiin testata esimerkiksi suunniteltujen profiilien ja kiinnitysten toimintaa. Pääasiassa nämä testit liittyisivät osien kokoonpanoon ja siinä esille tuleviin mahdollisiin haasteisiin, jotka voitaisiin mahdollisesti ratkaista rakenteen muutoksella tai edes helpottaa jollain tavalla niistä koituvia vaikeuksia. Tämän valaisinmallin yhteydessä päädyttiin kuitenkin valmistamaan vain suuntaa antava prototyyppi, koska yksittäistä valaisinta varten alumiinista pursotettujen

profiilien teettäminen, varsinkin profiilien joiden dimensioita vielä mahdollisesti haluttaisiin muokata lopulliseen versioon, ei olisi missään suhteessa kannattavaa. Tilausmäärän koosta riippumatta nämä profiilit vaatisivat nimittäin omat muottinsa, joiden itsensä kustannukset olisivat esimerkiksi koko suoraan valaistavaan prototyyppiin verrattaessa moninkertaiset, ja valmistusprosessista johtuen ainakin tämän projektin puitteissa löydetty toimittajat asettavat tilatulle profiilimäärälle vähimmäispainon, joka on todella korkea suhteutettuna yhden valaisimen tarpeisiin. Tästä johtuen täytyi profiilien valmistukselle prototyyppiä varten löytää jokin muu tapa ja tähän liittyen tehdä mahdollisia kompromisseja.

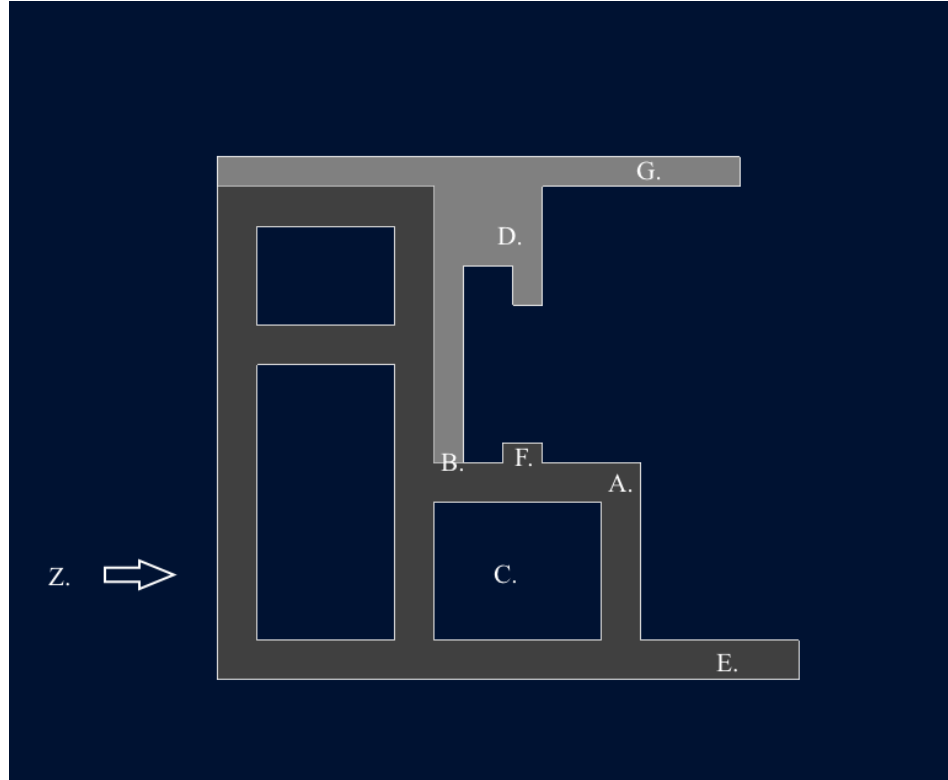
Tällaiseksi vaihtoehtoiseksi valmistustavaksi päätettiin lopulta 3D-tulostus. Vaikka tämä tarkoittaisi että profiilit voitaisiin tällöin tehdä yrityksen omilla laitteistoilla, asetti tämä monia ratkaisevia rajoituksia. Esimerkiksi tulostimen mahdollistamat enimmäisdimensiot rajoittivat yksittäisten profiilien pituutta ja niiden materiaaliominaisuudet eroaisivat suunnitellusta hyvin paljon. Näistä seikoista huolimatta tällaisella prototyypillä pystyttäisiin testaamaan esimerkiksi erilaisten kiinnityskomponentteja varten suunniteltujen kappaleiden asettumista dimensioidensa suhteen, nurkkakiinnitykseen liittyviä kokoonpanollisia haasteita ja mahdollisia profiilin muotoihin liittyviä ennalta odottamattomia haasteita.

5.3.1 Rakenne

Laidasta valaistavan suuntaa antavan prototyypin ulkomitoiksi määriteltiin 290mmx290mm johtuen käytössä olevan 3D-tulostimen sallimista enimmäismitoista. Nämä mitat toisaalta sallisivat jokaisen nurkkakiinnityksen liittämisen ilman että ne häiritsisivät toisiaan, mutta koska tällaisessa mittakaavassa kerrosrakenteen valonjohdollisen toiminnan tarkastelusta ei olisi hyötyä lopullista tuotetta ajatellen, päätettiin prototyypin levyrakenteen kasaaminen toteuttaa erinäisiä hukkapaloja hyödyntäen, jotka kuitenkin vastaisivat materiaalinpaksuudeltaan oikeita osia. 3D-tulostuksessa profiilien valmistamiseen käytetyksi materiaaliksi valikoitui ABS (akryylinitriilibutadienistyreeni). Tästä johtuen koristelistat jätettäisiin tekemättä, koska niiden kiinnitys kehykseen tultaisiin todennäköisesti toteuttamaan kemiallisesti ja tässä prototyypissä käytetty kehys poikkeaisi hyvin paljon tällaisen liitoksen kannalta oleellisilta ominaisuuksiltaan. Lisäksi suunnitellussa mallissa hyödynnettävät

koristelistat eivät poikkeaisi ratkaisevasti aiemmin monissa muissa kohteissa käytetyistä, joten niiden itsensä valmistukseen ei pitäisi liittyä erityisempiä ongelmia.

Profiilien dimensioiden suhteen prototyypin yhteydessä päädyttiin tekemään muutamia muutoksia. Nämä muutokset johtuivat osaltaan alumiiniprofiileja valmistavan yrityksen kanssa käydyistä keskusteluista ja toisaalta erinäisistä muissa yhteyksissä esiin tulleista yksityiskohdista, liittyen esimerkiksi mahdollisiin tiivistevaihtoehtoihin. Tällaisista muutoksista suurimmat liittyivät kuvassa 49 kohdassa A nähtävään ”kynnykseen” ja LED-nauhan kiinnityspintana toimivan yläprofiilin muotoihin, kuten kohdissa B ja D. Tämän kynnyksen tehtävä olisi jakaa suurin osa kerrosrakenteen profiilille aiheuttamasta rasituksesta tasaisemmin sen sijaan, että kohdassa E oleva yksittäinen uloke ottaisi kaiken vastaan. Tämä kynnyks myös helpottaisi kerrosrakenteen kasausta ja valonohjauslevyn paikoitusta suhteessa LED-nauhaan, sillä käyttöön valitut solukumiset tiivistenauhat joustavat siinä määrin, että alkuperäisellä tavalla kasatun rakenteen yksittäisten komponenttien sijoittuminen korkeussuunnassa olisi ollut huomattavasti epätarkempaa. Tästä muutoksesta johtuen myös kohdassa C olevasta aukosta saatiin tehtyä paremmin suunnasta Z tehtäviä kiinnityksiä helpottava. Toisaalta samassa yhteydessä yläprofiilin kohtaa B lyhennettiin, sillä sen lisäämän paikoitusefektin ei katsottu olevan tarpeellinen ja näin saatiin edellä mainittuja muutoksia helpotettua. Kohdassa D olevan yläprofiilin ulokkeen suhteen päädyttiin lopputulokseen, ettei sen viisteenä tuoma paikoitusetu toimisi halutulla tavalla solukumitiivisteiden kanssa, sillä se saattaisi mahdollisesti ohjata levyjä tiivisteiden joutaessa väärään suuntaan. Tähän päätettiin prototyypin tapauksessa kokeilla kuvassa nähtävää versiota, jonka olisi myös tarkoitus täydentää kohdan F tarjoamaa suojaa LED-nauhalle valonohjauslevyn kiilaantumiselta. Lisäksi puolet prototyypin yläprofiileista päätettiin teettää lyhemmällä G kohdassa olevalla ulokkeella. Tällä voitaisiin esimerkiksi vähentää nurkkien jiiirauksessa tapahtuvia inhimillisiä virheitä, mutta toisaalta tämä vaatisi muulta rakenteelta tarkempaa mittatarkkuutta ja saattaisi hankaloittaa kiinnikkeiden kiinnitystä, jota prototyypin tapauksessa päästäisiin juurikin havainnoimaan.



Kuva 49. Prototyypissä käytetty jatkokehitetty profiilimalli.

5.3.2 Testattavat asiat

Laidasta valaistun valaisinmallin prototyypin yhteydessä eivät testaukset liittyisi sen valoon liittyviin ominaisuuksiin, vaan sen rungon kokoonpanoon ja osien mekaanisiin vuorovaikutuksiin. Tämä johtuen siitä, että kyseisenlainen valaisutapa on hyvin paljon enemmän käytetty ja tutkittu, kuin suoraan valaistussa mallissa hyödynnetty, ja siihen pääasiassa liittyvät ongelmat voivat johtua lähinnä komponenttivalinnoista osto-osien suhteen. Rakenteesta johtuvat ongelmat suhteessa valaistukseen voidaan myös osittain ratkaista näitä muuttamalla. Esimerkiksi mikäli valonohjauslevyn ja pintalevyn välinen etäisyys ei ole tarpeeksi suuri, että valon intensiteetti jakautuisi tasaisesti pinnalle, voidaan tätä kompensoida valitsemalla tiheämmin kuvioitu valonohjauslevy. Toisaalta jos rakenteen tuottama valoteho ei ole riittävä, voidaan valita tehokkaampi (lm/m) LED-nauha.

Prototyypin liittyviä tarkkailtavia asioita:

- Miten kiinnitystä varten suunniteltujen osien kiinnitys onnistuu ja tuliko niiden valmistuksessa vastaan ennalta odottamattomia ongelmia
- Miten kerrosrakenteen kasaaminen käytännössä onnistuu profiilien mukaisesti
- Miten nurkkakiinnityksen toteutus käytännössä onnistuu ja vaaditaanko sen kokoonpanon yhteydessä jotain erityistyökaluja tai muita apuvälineitä
- Miten profiilien kiinnitys ja avaus onnistuvat käytännössä
- Tuleeko LED-nauhan sijoituksessa ja sähköistyksessä vastaan jotain muutosta vaativaa

6 TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

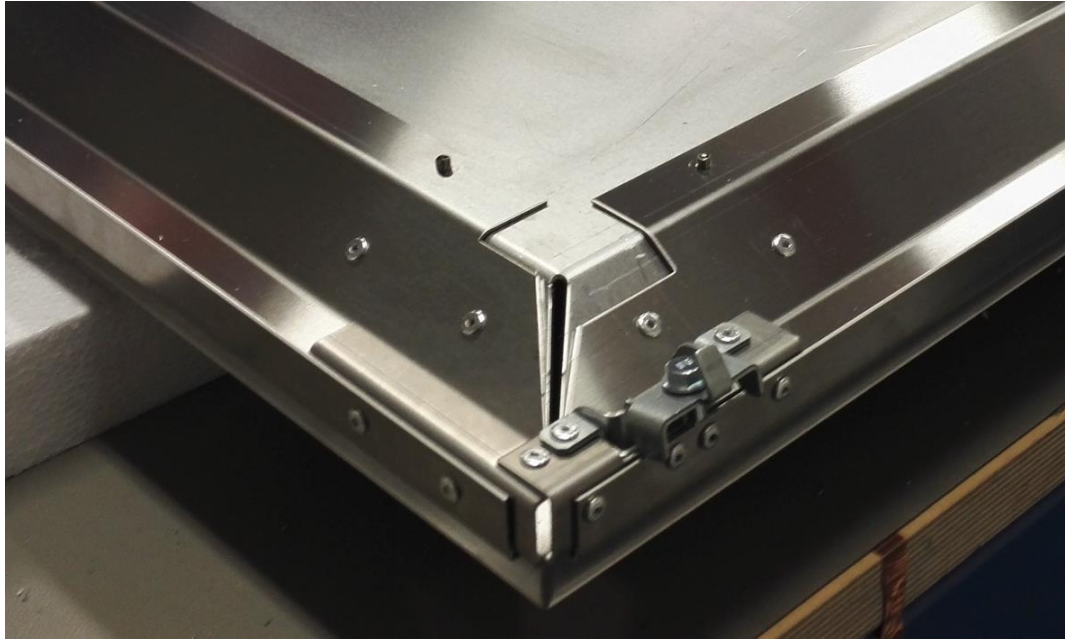
Tässä osiossa käydään läpi molempien case-osioiden valaisimien prototyyppeihin liittyviä tuloksia. Nämä sisältävät pääasiassa prototyyppien kasausvaiheessa ja kasatun prototyypin tarkastelun yhteydessä tehtyjä huomioita, ja näistä tehtyjä päätelmiä.

6.1 Case 1 tulokset

Suoraan valaistun valaisinmallin yhteydessä valmistettiin 1400x1400mm ulkomitoilla varustettu hieman varsinaisesta valaisinmallista poikkeava prototyyppi. Nämä poikkeavat yksityiskohdat löytyvät case 1 prototyyppi osion alta. Tässä osiossa käydään aluksi läpi tämän prototyypin kasauksessa tehtyjä havaintoja ja sen jälkeen sen pohjalta tehtyjä päätelmiä. Lopussa kasataan yhteen mallin tärkeimmät jatkokehitystä vaativat kohdat ja mahdolliset ennen tuotteistusta ratkaistavat haasteet.

6.1.1 Prototyypin yhteydessä tehtyjä havaintoja

Prototyypin rungon osat pystyttiin tuottamaan paikallisesti ja kasaaminen pystyttiin toteuttamaan tuotantotiloissa työpöydällä pääasiassa yhden henkilön toimesta. Suurin osa runkoon liittyvistä muutoksista vaativista huomioista liittyi pääasiassa yksityiskohtiin, kuten joidenkin reikien paikoitukseen, siihen mitkä niistä kannattaisi tehdä koneellisesti ja mitkä käsin asennusvaiheessa ja missä järjestyksessä jäykistelistojen asennus kannattaisi toteuttaa. Näitä muutoksia lukuun ottamatta rungon kasattavuus oli hyvä, eikä osien valmistuksessa ilmennyt suunnitteluratkaisuihin liittyviä ongelmia. Esimerkiksi nurkkapalat ja jäykistelistat toimivat yhteen juuri kuten niiden pitikin ja osavalmistuksessa tapahtuneesta muotovirheestä, kuva kuvassa 50, huolimatta rakenne asettui paikoilleen ongelmitta. Lisäksi runko oli hyvinkin tukeva niin pöytää vasten tuettuna, kuva 51 vasen laita, kuin roikotettaessakin, kuva 51 oikea laita. Taustalevynä käytetyn 2mm paksun alumiinin jäykkyys oli jo itsessään arvioitua parempi, joten lisäjäykisteiden sijaan mahdolliset jäykisteisiin tai runkoon tehtävät kevennykset nousivat esiin mahdollisina jatkokehityskohteina.



Kuva 50. Kulmapalarkaisun ansiosta C-laidan jäykistelistassa tapahtunut muotovirhe ei häirinnyt kokonaisuutta.



Kuva 51. Vasemmalla yleiskuva rungosta tuettuna pöydän päällä. Oikealla runko nostimen avulla roikkuvassa asennossa.

Pintamateriaaleista liimattu akryyli osoittautui yllättävänkin jämäksi ja mittatarkaksi. Laidoista mitattaessa eivät akryylisen pintavaihtoehdon ulkomitat poikenneet missään kohdassa yli 1mm valmistuspiirustusten mitoista. Pinta myös asettui siististi paikoilleen rungon jäykistelistoja vasten ja sen mekaaninen liittäminen runkoon sujui ongelmitta (kuva 52 vasen laita). Ruuveilla mekaanisesti jokaiseen laitaan liitetty pinta taipui roikutettaessa (kuva 52 oikea laita) enimmillään mittauksien mukaan n. 8-9 mm. Tämän taipuman mittauksissa pitää kuitenkin huomioida se etteivät ne olleet kovinkaan tarkkoja vaan pikemminkin suuntaa antavia ja rungon todellisuudesta poikkeava roikotustapa, joka aiheuttaa laitoihin normaalia kiinnitystilannetta

enemmän vääntöä, saattoi vaikuttaa osaltaan tähän tulokseen. Yrityksessä aiemmin kyseisellä materiaalilla, mutta tasaisia levyjäisiä kappaleita käyttäen, tehtyihin testeihin verrattuna tämä taipuma kuitenkin oli levyn mittoihin nähden huomattavasti pienempi ja silmämääräisesti vaikeasti havaittavissa.



Kuva 52. Vasemmalla akryylinen pintavaihtoehto asennusasennossaan runkoon sovitettuna. Oikealla valaisimen runko roikutuksessa kiinnitetyn pinnan kanssa.

Käytetyn akryylin visuaalinen ulkonäkö on saatu aikaan pinnan rasteroinnilla, joten jo ennakkoon oli tiedossa että levyn leikkauspinnat eroaisivat ulkonäöltään muusta kappaleesta. Kuten kuvan 53 ylälaidan tapauksista voi havaita, nämä leikkauspinnat erottuivat pinnan ulkolaitojen puolelta eri värisävyisinä ja paikoittain epäpuhtauksia sisältävinä. Toisaalta leikkaamattoman laidan puolelta tarkasteltaessa liimaliitokset olivat todella siistejä ja tasalaatuisia. Tästä pääasiallisesta tarkastelukulmasta, josta suunnasta kuvan 53 alalaidassa on esimerkki, katsottaessa laitojen liitoskohdat on havaittavissa, mutta ne ovat siistit ja tasalaatuiset. Nämä liitoskohdat ovat myös hyvin samanlaisia valaistuksen yhteydessä, eli huomattavissa mikäli tietää mitä etsiä, mutta siistit. Yleisellä tasolla kyseisen akryylin läpinäkyvyys osoittautui yllättävän suureksi. Tämän seurauksena erinäisien valaisimen sisään tulevien johtojen ja muiden komponenttien asetteluun pitää kiinnittää odotettua enemmän huomiota, etteivät nämä erotu akryylin läpi.



Kuva 53. Ylälaidassa kuvat liimatun akryylin nurkasta valaisemattomana ja valaistuna. Alalaidassa kuva kyseisen pinnan laidan liimaliitoksesta pinnan katselusuunnasta kuvattuna. Liimaliitoksen aiheuttaman tummemman kaistaleen leveys on 3mm eli laidan aineenpaksuutta vastaava.

Akryyliin verrattuna testattu polykarbonaattinen vaihtoehto pinnaksi oli huomattavasti veltompi. Tämä johtui pääasiassa siitä että sen nurkat eivät olleet tiivistettyjä ja tämä ongelma olisi huomattavasti pienempi laidat kiinnitettäessä. Toisaalta polykarbonaatin tapauksessa mikäli laitojen kiinnityksessä haluttaisiin minimoida erillisten kiinnikkeiden määrä ja luottaa pääasiassa toiseen kertaan särmätyn laidan tukeutumiseen runkoon, tämä aiheuttaisi ongelmia

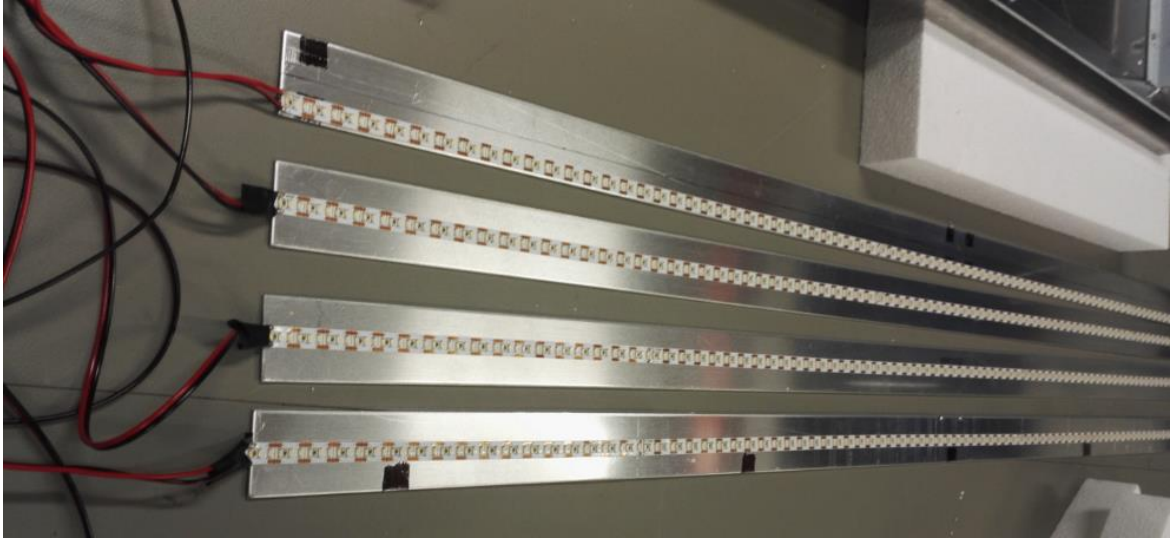
pinnan luotettavalle paikallaan pysymiselle. Polykarbonaatin nurkat olivat muutenkin hyvin epäsiistit (kuva 54 oikea laita) ja aiheuttivat helposti havaittavia muutoksia myös katselusuunnasta tarkasteltaessa. Nurkkien epäsiisteyteen verrattuna kyseisen pinnan muut laitojen taivutuskohdat olivat yllättävän siistit. Näissä ei myöskään ollut havaittavia epäsiisteyksiä laidan ulkoreunan puolelta tarkasteltaessa. Valaistaessa nämä olivat jopa vaikeammin havaittavissa verrattaessa akryylin laitoihin, mutta muutokset tapahtuivat hieman laajemmalla alueella.



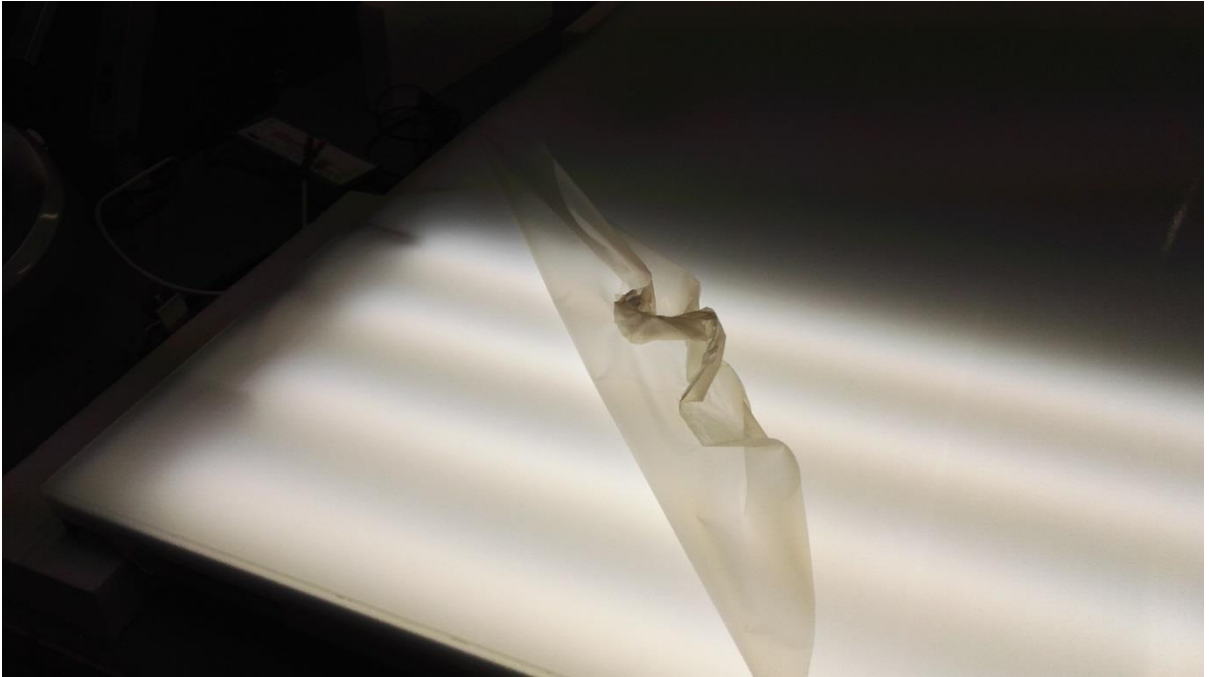
Kuva 54. Vasemmalla osa polykarbonaatista taivutetun pinnan laitaa ja oikealla yksi sen ongelmallisista nurkista.

Suurimmat prototyypissä esiin tulleet ongelmat ja virheelliset lähtöarvot kohdistuivat LED-komponentteihin. Niiden testauksen alussa asennettiin kuvan 55 mukaisesti neljä nauhaa taustalistoihinsa, joiden avulla voitaisiin tarkastella eri välityksien vaikutusta valaisimen pinnassa havaittavaan intensiteettijakaumaan. Vaikka käytetyllä valokuvauskalustolla oli ongelmia saada LEDien valon yhteydessä selkeitä kuvia, voidaan kuvassa 56 havaita varsin

selkeästi prototyypin rakenteeseen liittyvä pahin ongelma. Alustavat komponenttien välitykseen ja asetusetäisyyteen liittyvät laskelmat oli tehty puhtaasti kyseisten komponenttien valonavautumiskulmien avulla, mutta prototyypin yhteydessä kävi selväksi ettei kyseinen ominaisuus ollutkaan tasaisesti havaittavan intensiteettijakauman kannalta ratkaiseva tekijä.



Kuva 55. Neljän sarja taustalistoihin asennettuja LED-nauhoja, joita käytettiin pääasiallisina valonlähteinä testeissä.



Kuva 56. LED-nauhoista tulevan valon epätasainen intensiteettijakauma selkeästi havaittavissa akryylin pinnasta.

Aluksi ongelman arveltiin johtuvat LED-nauhojen tuottaman valon itsensä intensiteettijakaumasta. Tätä testattiin asettamalla nauhoja erilaisiin kulmiin ja tarkastelemalla näiden vaikutusta jakaumaan. Tässä yhteydessä kävi selväksi ettei nauhojen intensiteettijakauma ollut ongelma. Suurimman intensiteetin alue sijaitsi aina nauhan yläpuolella kohdassa, jossa valo osui mahdollisimman kohtisuoraan pintamateriaaliin, nauhan itsensä kulmasta riippumatta. Nauhan ollessa tarpeeksi suuressa kulmassa, niin ettei sen avautumiskulma riittänyt osumaan siihen osaan pintaa, jossa tämä kirkkain alue yleensä sijaitsi, tämä kyseinen alue jäi kokonaan puuttumaan. Tämän lisäksi testattiin kuvassa 57 esitettyjä valonhajautuskalvoilla varustettuja LED-nauhoja. Näissä tapauksissa, vaikka valo levisi laajemmalle, kirkkain alue oli hyvin lähelle saman kokoinen ja muotoinen, kuin hajautuskalvottomilla nauhoilla. Hajautuskalvon ainoiksi merkittäviksi vaikutuksiksi jäivät valotehon heikentäminen ja valon värielämmön muuttaminen. Näiden testien perusteella ratkaisevaksi tekijäksi pääteltiin valon saapumiskulma pintamateriaaliin. Tietyn suuruuden jälkeen tämä kulma aiheuttaisi niin suuren määrän valosta heijastumisen takaisin, että pinnassa havaittava intensiteettiero muuttuisi selkeästi huomattavaksi.



Kuva 57. Vasemmalla U-uran muotoisiin taustalistoihin asennetut LED-nauhat ennen valonhajautuskalvon asentamista ja oikealla sen jälkeen.

Rungon ja pintamateriaalin suunnittelussa käytetty 50mm (testijärjestelyiden takia niiden aikana todellisuudessa 47mm) asetusetäisyys osoittautui liian pieneksi ollakseen ainakaan nauhamaisilla LED-moduuleilla käytännöllisesti käytettävissä. Kuvassa 56 oleva jakauma tapahtui 167mm nauhojen etäisyydellä, mutta vaikka tämä etäisyys pienennettiin 100mm asti, ei havaittavaa epätasaisuutta saatu poistettua. Nämä intensiteettierot myös erottuivat aivan yhtä selkeinä kauempaa tarkasteltaessa. Tätä pienemmät nauhojen välilyökset tarkoittaisivat jo niin suuria määriä nauhoja, ettei kyseisenlaista ratkaisua voi pitää suositeltavana. Seuraavana ratkaisutapana lähdettiin korottamaan asetusetäisyyttä. 96mm asetusetäisyydellä ja 100mm nauhojen välilyökseillä intensiteettijakauma oli jo varsin siisti, vaikkakin vieläkin havaittavissa (kuva 58). Tälläkin korkeudella kokeiltiin useampia eri välilyöksiä, mutta koska liian pienet nauhojen välit johtaisivat aiemmin esillä tulleesti suureen määrään nauhoja, päädyttiin korottamaan asetusetäisyyttä vielä entisestään.



Kuva 58. 96mm asetusetäisyydellä ja 100mm nauhojen välityksellä akryylin pinnassa havaittava intensiteettijakauma. Kuvassa myös havainnollistuu hyvin akryylin leikkauspinnan eroavuus muusta rakenteesta pinnan ulkoreunan puolelta tarkasteltaessa.

Viimeisissä testeissä käytetty asetusetäisyys oli 140mm, koska sen saavuttaminen kyseiseen runkorakenteeseen pieniä muutoksia tekemällä olisi vielä mahdollista ilman että valaisinkokonaisuuden korkeus välttämättä kasvaisi yli vaaditun 150mm. Tällä asetusetäisyydellä 100mm nauhojen välitys tuotti jo silmämääräisesti täysin tasaisen valon jakauman akryylin pintaan. Toisaalta vaikka 150mm välitys tuotti kohtalaisen tasaisen valaistuksen, oli siitä mahdollista havaita hieman kirkkaammat vyöhykkeet. Lopulta useita eri välityksiä testattua päästiin lopputulokseen, että valon jakauma muuttui tasaiseksi 115mm ja 125mm jaotusten välillä. Tämän tarkempaa arvoa ei määritetty, sillä testauksissa mahdollisia epätarkkuustekijöitä oli liian monia. Tällaisiksi epätarkkuustekijöiksi voitiin laskea esimerkiksi pinnan kaareutuminen sille epätyypillisessä asennossa, LED-nauhojen taustalevyjen lievä kiertymä ja ylipäättään visuaalisen tarkastelun mukanaan tuoma virhemarginaali. Kuvassa 59 on havainnollistettu kuinka asetusetäisyyden korottaminen testien ajaksi toteutettiin tukemalla pinta sen reunoista määrätyn korkuisilla styroksilaatoilla.



Kuva 59. Valaisimen asetusäisyyden säätöön käytettyjä järjestelyjä.

Edellä mainitut testit suoritettiin kaikki akryylisellä pintavaihtoehdolla sen helpomman käsittelyn ja viimeistellymmän rakenteen takia. Polykarbonaatin tapauksessa kävi nimittäin välittömästi selväksi, että sen kulmien suhteen pitäisi löytää jokin ratkaisu ennen kuin sitä voitaisiin käyttää. Esille tullut todellisesta varsin kauas jäänyt lähtöarvio asetusäisyydessä aiheutti puolestaan sen, ettei nykyisenlaisen polykarbonaatin laitakiinnitysten pohjalta voitaisi tehdä ratkaisevia päätelmiä. Polykarbonaattipinnalla tehtiin kuitenkin muutamia samoja testejä, kuin akryylisellä, mutta niiden lopputulokset eivät poikenneet huomattavasti verrokeistaan. Kirkkaammat alueet syntyivät silmämääräisesti hyvin saman levyisinä ja samoihin kohtiin. Näiden alueiden intensiteettierot olivat kuitenkin hieman lievemmät ja tuntuivat katoavan hieman helpommin. Tässä tapauksessa kuitenkin erot olivat hyvin pieniä ja saattoivat johtua täysin pelkästään polykarbonaatin kirkkaamman pinnan luomasta visuaalisesta vaikutelmasta verrattaessa mattamaiseen akryyliin.

6.1.2 Prototyypin pohjalta tehtyjä päätelmiä

Prototyypin pohjalta tehty ensimmäinen rakenteen kannalta tärkeä päätelmä oli se, että rakenteen asetusäisyyttä LED-komponenttien ja pintamateriaalin välillä tulee kasvattaa. Prototyypin rungon alkuperäinen n. 50mm asetusäisyys tulisi kasvattaa vähintään n.100mm suuruiseksi, mutta mielellään lähemmäs 150mm, jotta valaisin pystyttäisiin toteuttamaan mahdollisimman pienellä määrällä LED-komponentteja. Tämä asetusäisyyden kasvatus voidaan toteuttaa yksinkertaisimmillaan pinnan laitojen korkeutta kasvattamalla. Tämän vaikutusta valaisimen kokonaiskorkeuteen olisi mahdollista vähentää upottamalla laitojen jäykistelistoihin kiinnitettyjä kiinnityskomponentteja entistä matalammalle suhteessa

valaisimen taustalevyyn. On myös muita tapoja lähteä ratkaisemaan tätä ongelmaa. Syntyviä intensiteettieroja voitaisiin pyrkiä vähentämään runkorakennetta ratkaisevasti muuttamatta esimerkiksi erilaisilla LED-moduuleilla, paremmin näitä eroja tasoittavalla pintamateriaalilla tai taustan värjäämisellä. Toisaalta erilaisia valoa ohjaavia komponentteja tai geometrioita lisäämällä voitaisiin myös pyrkiä ratkaisemaan tämä ongelma, mutta tällöin valaisinmallin edut liittyen yksinkertaisuuteen ja valmistusystävällisyyteen asettuisivat kyseenalaisiksi ja jouduttaisiin arvioimaan kannattaisiko kyseisessä tilanteessa jo siirtyä suosiolla hyödyntämään sivulta valaistavaa valaisinmallia.

Prototyypissä testattu pintavaihtoehto, jossa laidoissa olevia taitoksia kiinnityksessä hyväksi käyttäen saavutetaan yhtenäinen pelkstä valaisevasta pinnasta koostuva pinta, osoittautui toimivaksi mahdollisuudeksi ainakin akryylisestä materiaalista liimaamalla valmistettuna. Näin valmistettu pinta osoittautui visuaalisesti siistiksi niin valaistuksen yhteydessä kuin ilman sitä. Kappale oli myös tarpeeksi jäykkä 1400mmx1400mm mitoissa eikä alkanut roikkumaan liikaa kiinnitettynä. Aiemmin tässä osiossa mainitun asetuskorkeuden korotuksen ei pitäisi myöskään olla ongelma tämän pintamallin rakenteen kannalta. Korkeammat reunat, ja täten esimerkiksi suurempi liitospinta nurkissa, auttaisivat entisestään jäykistämään rakennetta. Toisaalta tämän pinnan kiinnitykseen jäykistelistoihin olisi todennäköisesti syytä kehittää jokin ruuviliitoksia huoltoystävällisempi ratkaisu. Lisäksi, koska tämän pinnan kustannuksista yli puolet kuluivat valmistukseen, pitäisi myös jatkossa harkita onko näin mahdollistettu laajempi kehyksetön paneeli näiden kustannuksien arvoinen suhteessa pienempään tasaisella pintalevyllä varustettuun kehykselliseen versioon.

Polykarbonaattiseen vaihtoehtoon liittyen täytyy vielä kehittää jokin ratkaisu nurkkien yhteydessä ilmenneisiin ongelmiin, mikäli tätä halutaan jatkossa hyödyntää. Tämä tarkoittaa sekä taivutuksia varten tehtyjä kevennyksiä tai muita keinoja, joilla materiaalin ei-toivottua visuaalisesti häiritsevää muokkautumista voitaisiin estää, että mahdollisuuksia tiivistää nurkka siististi. Tämä tiivistys olisi varsinkin laidan korkeutta asetuskorkeuden takia kasvatettaessa hyvinkin kriittisessä osassa kokonaisuuden tukevuuden kannalta. Mikäli tällainen ratkaisu löytyisi, olisi syytä tarkastella riittääkö se pitämään levyn tarpeeksi jäykkänä, jotta prototyypissä kokeillunlainen vähemmän mekaanista liittämistä vaativa kiinnitys olisi mahdollinen vai

kannattaisiko laitojen toiset kantit suosiolla jättää tekemättä ja jättää kiinnitysratkaisuksi akryylisessä versiossa käytetynlainen. Polykarbonaattisen version saaminen toimivaksi olisi kuitenkin tärkeätä mikäli tällaista valaisinmallia haluttaisiin soveltaa tiukempia paloluokkia vaativissa kohteissa.

Prototyypin rungon valmistettavuudessa ei ilmennyt ongelmia prototyypin kohdalla ja joitain kiinnityksiin liittyviä pieniä muutoksia tekemällä sen asennettavuutta saatiin parannettua. Runko oli myös tarpeeksi kevyt, että koko valaisimen ollessa kasassa sen käsittely onnistui kahden ihmisen toimesta. Asetusetäisyyden kasvatuksen vaikutus runkoon tosin saattaa hankaloittaa tätä käsittelyä ja esimerkiksi valaisimen nostamista paikoilleen asennettaessa tai huollettaessa. Tätä varten kannattaisi siis harkita esimerkiksi taustalevyyn tai jäykistelistoihin sijoitettavia kädensijoja tai muita vastaavia käsittelyä helpottavia kohtia.

6.1.3 Ennen tuotteistusta ratkaistavia asioita ja jatkokehityskohteita

Ennen tässä projektissa suunnitellun valaisimen tuotantoon ottamista, pitää muutamia siihen liittyviä asioita ratkaista. Valaistuksessa käytettyjen komponenttien, halutun pinnan ja valitun asetuskorkeuden käyttäytyminen pitää tarkistaa tapauskohtaisesti. Projektin yhteydessä on tullut esiin tiettyjä raja-arvoja, mutta ne ovat vain suuntaa antavia mikäli materiaaleja tai käytettyjä komponentteja aletaan vaihtamaan, kuten suositellaan paremman kokonaisuuden löytämiseksi. Esimerkiksi harvemmalla LEDien välityksellä varustetut LED-nauhat voisivat sopia paremmin tähän tarkoitukseen, sillä prototyypissä käytetyillä nauhoilla LEDien tiheys nauhojen suuntaisesti oli hyvin paljon suurempi kuin toisessa suunnassa. Lisäksi tarvittava valoteho on vain murto-osa siitä mitä nykyisillä komponenteilla pystyttäisiin tuottamaan, joten sen suhteen nauhan harvempi välitys ei kasvaisi helposti ongelmaksi. Muita harkittavia jatkokehityskohteita liittyen valaistukseen ovat taustan maalaamisen vaikutuksen tarkastelu valon havaittavaan tasaisuuteen, levymäisten LED-moduulien etsiminen joka suuntaan tasaisella komponenttivälityksellä ja mahdollisesti paremmin valoa hajauttavan pintamateriaalin löytäminen.

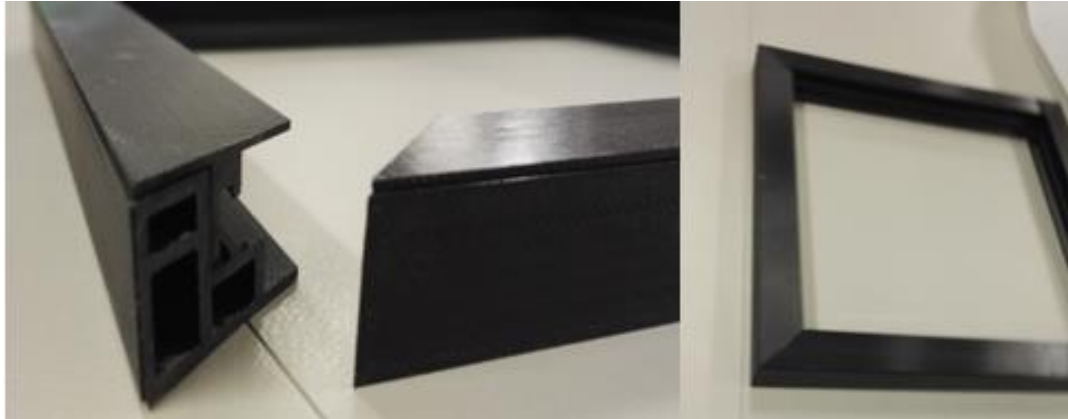
Valaisinmallin muuhun rakenteeseen liittyviä jatkokehityskohteita ovat ainakin pinnan huoltoystävällisemmän kiinnityksen kehittäminen, polykarbonaattisen pintavaihtoehdon nurkkiin liittyvien ongelmien ratkominen, rungon käsittelyä helpottavien kohtien lisääminen ja kiinnitysten optimointi niin että valaisimen kokonaiskorkeudesta mahdollisimman suuri osa saataisiin hyödynnettyä asetuskorkeudessa.

6.2 Case 2 tulokset

Laidasta valaistusta valaisinmallista tuotettiin suuntaa antava 290x290mm prototyyppi. Tarkemmat yksityiskohdat tämän prototyypin rakenteeseen ja siinä testattaviin asioihin liittyen löytyvät case 2 prototyyppi osion alta. Tässä osiossa käydään aluksi läpi tämän prototyypin pohjalta tehtyjä havaintoja ja päätelmiä, sekä lopuksi listataan erinäisiä jatkokehityskohteita ja ennen tuotteistusta ratkaistavia yksityiskohtia.

6.2.1 Prototyypin yhteydessä tehtyjä havaintoja

Prototyypin yhteydessä profiilien valmistettavuuteen ja laatuun ei oikein voitu ottaa kantaa liittyen niiden todellisesta valaisimesta poikkeavaan valmistustapaan ja materiaaliin. Kuvassa 60 on kuitenkin kuva prototyypin profiilista nurkkien jiiirauksen jälkeen. Kyseiset profiilit sopivat hyvin yhteen ja aineenpaksuuksiltaan mallin kappaleita vastaavista levyistä kasattu kerrosrakenne asettui suunnitellusti paikoilleen. Valonohjauslevyä asetettaessa vastaan tuli kuitenkin huomio, että kyseisen levyn paikoituksessa ja LED-nauhaa suojaamassa käytetty profiilin pykälä voisi olla mitoiltaan hieman korkeampi. Nykyisillä mitoillaan kyseinen pykälä päästää valonohjauslevyn muljahtamaan ylitseen turhan helposti. Tämä ei myöskään häiritsisi LED-komponentteja, sillä käytetyssä nauhassa, kuten monissa muissakin vastaavissa tuotteissa, nauhan laidassa on useiden millimetrien kaistale ilman valaisevia osia ja täten pykälän korotus ei peittäisi nauhasta säteilevää valoa.



Kuva 60. Prototyypin kehysprofiili.

Ensimmäiset prototyypin kasauksessa vastaan tulleet ongelmat liittyivät nurkkapalojen kiinnitykseen. Prototyyppiä varten valmistetut profiilien aukkoihin asettuvat nurkkapalat eivät olleet mitoiltaan kovinkaan tarkasti aukkojen kokoiset ja alkoivat ruuvauksen yhteydessä vääntää liitoksia vinoon. Lisäksi kyseisten kappaleiden rei'itys kiinnitystä varten osoittautui hankalaksi ja omalta osaltaan aiheutti edellä mainittua vääntymistä. Kehys saatiin kuitenkin lopulta kasattua suhteellisen hyvin asettuen, kun nurkkien kiristys toteutettiin rakenteen ollessa muuten kokonaan kasassa, mutta tähän liittyen suurempaa valaisinta valmistettaessa tarvitsee harkita mahdollisia erityistukia tai muita asennusta helpottavia apuvälineitä. Kuvassa 61 rungon ja kerrosrakenteen osalta kasattu prototyyppi.



Kuva 61. Prototyypin kasattu runko ja kerrosrakente.

Prototyypin yhteydessä vain yhteen valaisimen laidoista kiinnitettiin LED-nauha. Kuvassa 62 näkyy valaisimen nurkassa yläprofiileihin johtojen ulosvetoa varten tehdyt helpotukset. Kyseisten aukkojen teko oli varsin yksinkertaista profiilien muotojen ansiosta ja tarvittaessa johdon saisi vedettyä vielä pienemmästäkin välistä. LED-nauhaa asennettaessa vastaan tuli kuitenkin uhka mahdollisista ylimääräisistä kontakteista nauhan laidoissa olevien sähköä johtavien osien ja rungon muotojen välillä. Lisäksi LED-nauhan pätyyn mahdollisesti tarvittava juotos tarvitsee eristää ettei se aiheuttaisi kontaktia runkoon.



Kuva 62. LED-nauhan johtojen ulosvetoa varten valaisimen yläprofiileihin tehty aukko vasemmalla vain rungon ollessa kasassa ja oikealla saranan kiinnityspalan yhteydessä.

Kiinnityskomponenttien kohdalla asennus onnistui yleisesti ottaen varsin vaivatta. Saranoiden kiinnityspalojen, kuva 63, kohdalla esiin nousi lievä ongelma kyseisten kappaleiden paikoituksesta, mutta tämä pääasiassa aiheutti vain hieman lisätyötä reikien paikkojen mittauksen ja merkitsemisen muodossa. Kyseistä paikoitusta voisi tosin helpottaa esimerkiksi mitoittamalla kyseisten kiinnityspalojen alataitokset sellaisille mitoille, että niiden laita osuisi yhteen kehyksen sisälaidan kanssa. Lukkojen vastinpalojen, kuvassa 64, kohdalla ongelmia aiheutti näiden ulkolaidan puolelle tulevien taitoksien taivutussäde. Prototyypin kehyksien laita oli valmistettu terävillä laidoilla, joten tämä taivutussäde aiheutti vastinpalojen asettumista kauemmas rakenteen laitojen yli kuin suunniteltua. Tähän ongelmaan tosin helppo ratkaisu on muuttaa kyseiset kehyksen laidat pyöristetyiksi. Kaikkien edellä mainittujen osien kohdalla valaisimen nurkkien sisällä olevien nurkkapalojen kohdalle tulleet kiinnitykset oli huomattavasti helpompi toteuttaa, kuin nurkkien itsensä kiinnityksen yhteydessä. Nämä

kiinnitykset oli mahdollista toteuttaa käsiporalla, mutta tasalaatuisuuden takia suositellumpaa olisi käyttää pylväsporakonetta mikäli mahdollista. Lisäksi lopullisessa valaisimessa olisi huomattavasti enemmän alumiinia porattavana näissä kohdissa, joten prototyypin yhteydessä tehdyt johtopäätökset saattavat poiketa todellisuudesta.



Kuva 63. Saranoiden kiinnityspalat.



Kuva 64. Molemmat lukkojen vastinpalavariantit kiinnitettynä yhtä aikaa hieman lomittain keskenään.

6.2.2 Prototyypin pohjalta tehtyjä päätelmiä

Malliin suunniteltujen nurkkaliitoksien käytännön toteutus osoittautui odotettua hankalammaksi. Nurkissa olevien profiilin sisään pujotettavien palojen tarvitsisi olla joko hyvin tiukasti profiilin reikiin sopivilla mitoilla tai niiden kiinnityksessä tarvitsee kehyksen olla kasattuna ja kiinnitettynä, niin etteivät laidat pääse vääntymään suhteessa toisiinsa asennuksen aikana. Lisäksi näiden palojen paksuudesta johtuen niiden rei'ityksen toteutus tarvitsee osakseen erityistä huomiota. Prototyypin yhteydessä nämä rei'itykset onnistuttiin tekemään käsiporalla tarvittaessa, mutta pylväspanon käyttö olisi suositeltavaa varsinkin reikien suoruuden ja tasalaatuisuuden takia ja tämä asettaa ongelmia liittyen valaisimen dimensioihin ja siihen, miten kappaleen saa aseteltua/kiinnitettyä tukevasti tällaisten porausten ajaksi. Lisäksi kaikissa näihin nurkkapaloihin liittyvissä liitoksissa, eli nurkkien kiinnityksessä ja kiinnityskomponenttien tuennassa niihin, nousee esiin kysymys siitä mitkä kaikki reiät voitaisiin toteuttaa ennalta tehtyinä ja mitkä olisi tehtävä kokoonpanon yhteydessä, sillä näissä kohdissa pitäisi osua vähintään kolmeen kappaleeseen tehdyt rei'itykset kohdakkain.

Prototyypin profiilit olivat teräväkulmaisia ja näiden suhteen tiedettiin jo ennalta, että monet tulisi vaihtaa pyöristetyiksi pursotusprosessin helpottamiseksi. Yläprofiilin ulkolaitaan tulevaa nurkkaa ei kuitenkaan oltu osattu huomioida tarpeeksi, ja tähän liittyen lisätään lopulliseen malliin tarpeeksi suuri pyöristys, jotta kiinnityskomponentit saataisiin tukevasti kiinni. Muita profiiliin tehtäviä muutoksia on valonohjauslevyn paikoittavan ja LED-nauhaa suojaavan pykälän korotus ja tätä suojausta jatkavan yläprofiilin pykälän poisto liittyen mahdollisiin kontaktihäiriöihin. Muuten profiili osoittautui toiminnalliseksi mekaanisten ominaisuuksiensa osalta ja edellä mainitut muutokset ovat lähinnä vain yksityiskohtiin liittyvää hienosäätöä.

Kiinnityskomponenteista lukkojen vastinpaloihin liittyen ei prototyypin yhteydessä ilmennyt mitään syytä mikseivät valaisimen päätyyn tehdyt versiot toimisi aivan yhtä hyvin kuin alkuperäiset laidassa sijaitsevat. Näiden avulla saataisiin siis LED-nauhat pääasiallisesti sisältävät laidat helpommin avattaviksi, kuten suunniteltua. Kaikkiin kiinnityskomponentteihin liittyen esille nousi kuitenkin kysymys siitä voisiko ne toteuttaa valaisimen nurkkien ulkolaitoihin tulevien vahvikkeiden yhteydessä. Tällöin särmättävän kappaleen geometria olisi

monimutkaisempi, mutta toteutettavissa ja varsinkin saranapuolen laidan avaus muuttuisi helpommaksi. Viimeisenä näihin komponentteihin liittyvänä esiin tulleena asia oli nurkissa profiilin sisään sijoitettavien kulmapalojen pituus laitojen sisälle. Vaikka niihin kiinnityskomponenttien tukeminen onkin kokoonpanossa työläämpää, kuin pelkkään profiiliin kiinnitys, tukisivat kaikki niihin kiinnitetyt kohdat huomattavasti paremmin kyseisiä komponentteja.

6.2.3 Ennen tuotteistusta ratkaistavia asioita ja jatkokehityskohteita

Tämän projektin puitteissa suunniteltu laidasta valaistava valaisinmalli on huomattavasti valmiimpi tuotantoon, kuin suoraan valaistu malli. Kyseiseen valaisintyyppiin liittyviä avoimia kysymyksiä ei juurikaan jäänyt, mutta mahdollisia malleja parantavia jatkokehityskohteita ilmeni. Varmaankin näistä tärkeimpänä on syytä nostaa esiin valaisimen kattoon kiinnityksessä käytettävät komponentit. Tämänhetkisen version kiinnityskomponenttien muokkaaminen mahdollisesti asennus- ja huoltoystävällisemmiksi on yksi seikka, mutta suurempi kysymys on kannattaisiko kyseisen valaisimen yhteydessä käyttää jotain vakiokiinnikkeistä poikkeavia komponentteja. Nykyisellään valaisimen korkeudesta todella suuri osa koostuu vain kyseisistä kiinnityskomponenteista ja helpoin tapa laskea kokonaisuuden korkeutta olisi nykyisen saranaratkaisun tilalle jonkin vähemmän tilaa vievän version kehittäminen. Lukon puolen komponentit olisi helposti säädettävissä tämän kyseisen ratkaisun tarpeiden mukaan nykyisiä osia muokkaamalla.

Profiilin dimensioiden suhteen ennen viimeisen version lukitsemista olisi syytä selvittää esimerkiksi minkä aineenpaksuisia valonohjauslevyjä lopulta olisi tarkoitus käyttää ja toisaalta tarvitsevatko mahdolliset muutokset kiinnityskomponentteihin joitakin muutoksia profiiliin. Nykyinen profiilimalli kuitenkin mahdollistaa siihen komponenttien kiinnityksen koko laitojen pituuksilta ja useasta suunnasta sekä tietyissä rajoissa eri paksuisien levyjen käytön kerrosrakenteessa, joten vaikka profiilin mukaisesti tehtäisiinkin muotit pursotusta varten, niin mahdolliset muihin komponentteihin liittyvät muutokset ovat mahdollisia ilman että profiilia tarvitsisi muuttaa.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän työn ensimmäisenä tavoitteena oli tutustua erilaisiin mahdollisuuksiin tuottaa tasomaisia valaisuratkaisuja LED-komponenttien avulla. Tutkimuksen aikana esiin nousi kolme pääasiallista tapaa tähän. Kaksi näistä hyödynsivät perinteisiä LED-komponentteja ja käyttivät hyväkseen joko valon ohjaukseen suunniteltuja komponentteja, tai suuria määriä LED-komponentteja sisältäviä moduuleja. Kolmas tapa oli kalvomaisten OLEDien hyödyntäminen. Vaikka tämä viimeinen jäikin tämän tutkimuksen osalta lähinnä vain esiin nostetuksi sivuhuomioksi, sisältää se mahdollisesti hyvin suuren potentiaalín nousta tulevaisuudessa varteenotettavaksi vaihtoehdoksi. Tähän vaihtoehtoon liittyvää kehitystä kannattaakin tarkkailla ja tutustua tarkemmin uudestaan tulevaisuudessa, kun siihen liittyvien komponenttien saatavuus paranee ja tuotantomäärät kasvavat.

Työn toisena tavoitteena oli jatkokehittää näistä vaihtoehdoista mahdollisimman pitkälle viety valaisinehdotelma. Tässä työssä päädyttiin kehittelemään kahta erilaista valaisinmallia. Toinen näistä oli nk. suoraan valaistu ja toinen nk. laidasta valaistu variantti. Molempien mallien suunnittelussa päädyttiin prototyyppiasteelle. Lopuksi näiden prototyyppien pohjalta tehtiin huomioita, joiden pohjalta näitä malleja voidaan vielä jatkojalostaa ennen varsinaista tuotteistusta.

Suoraan valaistussa selkeästi tärkeimmäksi huomioksi nousi pinnalla havaittavan intensiteetin tasaisuuden saavuttaminen. Prototyypissä alkuarvoksi asetettu asetusetäisyys, joka oltiin arvioitu pääasiassa LED-komponenttien valon avautumiskulmien mukaan, ei ollut läheskään riittävä siinä käytettyjen komponenttien yhteydessä. Tällaisissa yksinkertaisissa malleissa, jotka eivät sisällä erillisiä valoa ohjaavia komponentteja, onkin tulevaisuudessa syytä kiinnittää erityistä huomiota siihen, missä kulmassa valaisimen komponenttien tuottama valo osuu sen pintamateriaaliin. Luonnollisia jatkotutkimuskohteita tähän liittyen ovatkin erilaisten LED-moduulien, jotka jakaisivat valonlähteitä tasaisemmin koko taustan pinta-alalle, ja mahdollisesti joitain valon ohjaukseen liittyviä ominaisuuksia omaavien pintamateriaalien testaaminen.

Laidasta valaistun valaisinmallin tapauksessa ei prototyyppi tarjonnut vastaavanlaisia kriittisiä ratkaisuja vaativia kohtia. Koska tämä malli koostuu tässä yhteydessä pääasiassa osto-osista yrityksen oman osavalmistuksen sijaan, pyrittiin tämän valaisimen rakenteen kannalta keskeisessä asemassa oleva kehys suunnittelemaan niin, että se sallisi hieman toisistaan poikkeavien osien käytön tapauskohtaisesti. Tärkeimpänä huomiona tämän rakenteen kannalta voidaan mainita valaisimen mitoille sopivan valonohjauslevyn hankinta. Muut rakenteen osat ovat helposti saatavilla ja mittoihin varioitavissa, mutta valonohjauslevyn tarvitsee olla juuri sopiville mitoille valmistettu valon tasaisen jakautumisen takaamiseksi. Lisäksi kehysprofiilien valmistaminen pursottamalla asettaa niille varsin korkeat volyymivaatimukset ollakseen kannattavaa, joten pienille sarjakoille tällainen rakenne ei ole suositeltava. Lisäksi osittain tästä syystä myös profiilin suunnittelu sellaiseksi, että se sallii tapauskohtaisesti erilaisten osien käytön, nousee tärkeään rooliin.

LÄHTEET

- [1] Materials and Accessories. Kone design collection. Mainososite.
- [2] Juntunen, E. 2014. From LED die to a lighting system. Väitöskirja. Oulu: University of Oulu. 134 s.
- [3] Hatziefstratiou, P. 2016. Lighting design with LEDs. Väitöskirja. Lontoo: University College London. 374 s.
- [4] Nave, R. 2016. Light Emitting Diode Structure. [Viitattu 24.8.2017]. Saatavilla: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/led.html>
- [5] Nave, R. 2016. P-N Junction. [Viitattu 24.8.2017]. Saatavilla: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/pnjun.html>
- [6] Pecht, M. Das, D. & Chang, M. 2014. Introduction to LED Thermal Management and Reliability. Solid State Lighting Technology and Application Series 2, Thermal Management for LED Applications. S. 3–14.
- [7] Nave, R. 2016. LED Device Structure. [Viitattu 24.8.2017]. Saatavilla: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/leds.html>
- [8] Reggiani, A. & Farini, A. 2015. LEDs and Use of White LED for Lighting. Sustainable Indoor Lighting. S. 127–150.
- [9] Tulla, A. 2017. Lux Recommends – IP rated LED tape. [Viitattu 1.9.2017]. Saatavilla: <http://luxreview.com/article/2017/04/lux-recommends---ip-rated-led-tape>
- [10] Cooledge lightingin www-sivut. [Viitattu 1.9.2017]. Saatavilla: <https://cooledgelighting.com/>

- [11] Tridonicin www.sivut.ledwatcher.com/en/index.asp. [Viitattu 1.9.2017]. Saatavilla: <http://www.tridonic.com/com/en/index.asp>
- [12] Gianni, A. 2015. Radiometric and Photometric Quantities and Laws. Sustainable Indoor Lighting. S. 1–22.
- [13] Light measurements explained. 2016. LED watcher www.sivut.ledwatcher.com/light-measurements-explained/. [Viitattu: 28.11.2017]. Saatavilla: <http://www.ledwatcher.com/light-measurements-explained/>
- [14] NEN-EN 81-20. Safety rules for the construction and installation of lifts – Lifts for the transport of persons and goods – Part 20: Passenger and goods passenger lifts. CEN. 2014. 163 s. Vahvistettu 28.5.2014
- [15] Li, J. Wang, J. Liu, Z. & Poppe, A. 2014. Solid-State Physics Fundamentals of LED Thermal Behaviour. Solid State Lighting Technology and Application Series 2, Thermal Management for LED Applications. S. 15–52.
- [16] Kamiyama, S. Iwaya, M. Akasaki, I. Syväjärvi, M. & Yakimova, R. 2010. Light excitation and Extraction in LEDs. New Lighting—New LEDs: Aspects on light-emitting diodes from social and material science perspectives. S. 27–34.
- [17] Syväjärvi, M. Kamiyama, S. Yakimova, R. & Akasaki, I. 2010. Materials and Growth Technologies for Efficient LEDs. New Lighting—New LEDs: Aspects on light-emitting diodes from social and material science perspectives. S. 16–26.
- [18] Schanda, J. Csuti, P. & Szabó, F. 2014. Laboratory Measurement of Optical Properties of LEDs. Solid State Lighting Technology and Application Series 2, Thermal Management for LED Applications. S. 167–196.
- [19] Giannini, A. & Mercatelli, L. 2015. Colorimetric Quantities and Laws. Sustainable Indoor Lighting. S. 23–38.

- [20] Adachi, C. Lee, S. Nakagawa, T. Shizu, K. Goushi, K. Yasuda, T & Potscavage, W. 2015. Organic Light-Emitting Diodes (OLEDs): Materials, Photophysics, and Device Physics. Organic Electronics Materials and Devices. S. 43–74.
- [21] Coeboorn, R. Elsbergen, V. & Verschuren, C. 2013. High Efficiency OLEDs for Lighting Applications. Applications of Organic and Printed Electronics. S. 83–100.
- [22] OLED-Info www.sivut [Viitattu 3.11.2017]. Saatavilla: <https://www.oled-info.com/introduction>
- [23] Scholz, S. Kondakoz, D. Lüssem, B. & Leo, K. 2015. Degradation Mechanisms and Reactions in Organic Light-Emitting Devices. Chemical Reviews. S. 8449–8503.
- [24]. QLED-Info www.sivut. [Viitattu 3.11.2017]. Saatavilla: <http://www.qled-info.com/introduction/>
- [25] Kwak, J. Bae, W. Lee, D. Park, I. Lim, J. Park, M. Cho, H. Woo, H. Yoon, D. Char, K. Lee, S. & Lee, C. 2012. Bright and Efficient Full-Color Colloidal Quantum Dot Light-Emitting Diodes Using an Inverted Device Structure. Nano Letters, Vol. 12. No. 5, April 2, 2012. S. 2362–2366.
- [26] Chen, J. Pan, J. Qingguo, D. Alagappan, G. Lei, W. Li, Q. & Xia, J. 2014. Highly efficient white quantum dot light-emitting diode based on ZnO quantum dot. Applied Physics A. Vol. 117. S. 589–591.
- [27] Jang, J. Hwang, S. & Lim, S. 2013. Thin LED Module Using the Inclined Edge and Inhomogeneous Pattern Reflection of Light Guide Plate. Electronic Materials Letters, Vol. 9. S. 55–58.

- [28] Chen, C. & Kuo, S. 2014. A Highly Directional Light Guide Plate Based on V-Groove Microstructure Cell. *Journal of Display Technology*, Vol. 10. No. 12, December 2014. S. 1030–1035.
- [29] Moon, H. Shin, M. Lee, J. Jang, K. Chung, Y. & Kim, Y. 2015. Design of Integrated Light Guide Plate With Functional Structure of Enhanced Diffusion Length for Ultra-slim LED Backlight Unit. *Journal of Display Technology*, Vol. 11. No. 1, January 2015. S. 44–52.
- [30] Mochizuki, K. Sakurai, K. Yoshinori, S. Tagaya, A. & Koike, Y. 2016. LED Flat Panel Capable of Seamless Connection for Use in Lighting. *Journal of Light & Visual Environment*. Vol. 40, 2016.
- [31] Back-to-basics. Part 5. Halftone printing & dots. [Viitattu 27.11.2017]. Saatavilla: <http://www.ajslabels.com/blog/wp-content/uploads/2013/03/Part-5.-Halftone-printing-dots.pdf>
- [32] Agoston, M. 2005. Implementation and Algorithms. *Computer Graphics and Geometric Modeling*. 907 s.
- [33] Wang, M. Pang, D. Tseng, Y. & Tseng, C. 2014. The study of light guide plate fabricated by inkjet printing technique. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. Vol. 45. S. 1049–1055.
- [34] Jakubowski, J. & Peterka, J. 2014. Design for manufacturability in virtual environment using knowledge engineering. *Management and Production Engineering Review*. Vol. 5. No. 1, March 2014. S. 3–10.
- [35] Kamrani, A. & Nasr, E. 2010. Design for Manufacture and Assembly. *Engineering Design and Rapid Prototyping*. S. 142–183.

- [36] Prakash, W. Srinthar, V. & Annamalai, K. 2014. New Product Development by DFMA and Rapid Prototyping. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. Vol. 9. No. 3, March 2014. S. 274–279.
- [37] Harik, R. & Sahmrani, N. 2010. DFMA+, a quantitative DFMA methodology. *Computer-Aided Design & Applications*. Vol. 7. Iss. 5. S. 701–709.
- [38] Stjepandic, J. Ostrosi, E. Fougeres, A. & Kurth, M. Modularity and Supporting Tools and Methods. *Concurrent Engineering in the 21st Century*. S. 389–420.
- [39] Gupta, S. & Okudan, G. 2007. Modular Design: A Review of Research and Industrial Applications. *Proceedings of the 2007 Industrial Engineering Research Conference*. S. 1563–1568.