

Timo Hevosmaa

## **Modulaarisuus raitiovaunuissa**

## **Modulaarisuus raitiovaunuissa**

Timo Hevosmaa  
Opinnäytetyö  
Kevät 2017  
Industrial Management  
Oulun Ammattikorkeakoulu

## TIIVISTELMÄ

Oulun Ammattikorkeakoulu  
Master of Engineering, Industrial Management

---

Tekijä: Timo Hevosmaa

Opinnäytetyön nimi: Modulaarisuus raitiovaunuissa

Työn ohjaaja: Hannu Päätaalo

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2017

Sivumäärä: 78

---

Raitiovaunuja hankkivien tahojen moninaiset vaatimukset pakottavat vaunujen valmistajat hakemaan ratkaisuja, joilla he pystyisivät vastaamaan asiakaskunnan vaatimuksiin ilman tarvetta kustannuksia kasvattavalle projektikohtaiselle tuotekehitykselle. Yhtenä keinona on samojen ratkaisujen hyödyntäminen ja rakenteiden yhtenäistäminen eri tuotteiden välillä. Tähän pyritään tuotteiden modulaarisuuden ja tuotealustaperustaisuuden avulla. Työn kirjoittamishetkellä Helsinkiin valmistettavan Artic-raitiovaunun toimituksia seuranneet projektit uusine vaatimuksineen aiheuttivat tarpeen tarkastella tuotteen modulaarisuutta myös Transtech Oy:ssä. Työn pääasiallisina tavoitteina oli selvittää, miten modulaarisuutta voitaisiin hyödyntää olemassa olevassa tuotteessa ja miten sitä yleensä raitiovaunuissa hyödynnetään.

Asiaa lähestytään teoriaosassa selvittämällä modulaarisuuteen liittyviä tekijöitä ja sen liitännäisiä, kuten esimerkiksi tuotealustakäsitettä. Tuotteiden modulaarisuutta ja tuotealustoja käsitellään kirjallisuudessa hyvin kirjavasti ja monitahoisesti. Tässä työssä käsitteitä pyritään tarkastelemaan hieman laajemmin myös varsinaisen aihepiirin ulkopuolelta kokonaisvaltaisemman näkemyksen aikaansaamiseksi. Modulaarisuudella saavutettavia hyötyjä ja siitä aiheutuvia lieveilmiöitä pyritään tarkastelemaan yrityksen eri toimintojen näkökulmasta ja koko tuotteen elinkaarta silmällä pitäen.

Raitiovaunuja käsittelevä teoriaosuus perehdyttää lukijan raitioliikenteen ja raitiovaunujen teknologiseen kehitykseen, sekä esittää perusteita raitiovaunujen käytölle kaupunkien joukkoliikennevälineenä. Raitiovaunujen modulaarisuutta käsittelevän luvun tarkoituksena on kuvata miten modulaarisuutta ja tuotealustoja nykyisin hyödynnetään raitiovaunuteollisuudessa.

Työn tutkimusosuudessa esitetään Artic-raitiovaunun kehitysvaiheita ja vaunussa käytettyjä tavanomaisesta poikkeavia ratkaisuja. Tutkimusosuuden lopussa kirjoittaja esittää Artic-vaunun rakenteeseen pohjautuvia modulointiehdotuksia. Käytetyistä ratkaisuista ja käynnissä olleen projektin vaatimuksista johtuen ehdotukset kohdistuvat tuotteen sisäiseen modulointiin. Ehdotuksien tavoitteena on rakenteellisen joustavuuden edistäminen modulaaristen ratkaisujen avulla.

Työn yhteenveto-osuudessa pohditaan syitä, miksi olemassa olevan vaunun toteutustapa on muodostunut rakenteeltaan integroiduksi ja näin ollen vaikeasti moduloitavaksi. Yhteenvedossa esitetään mahdollisia keinoja, joilla voitaisiin edistää nykyisen tuotteen modulaarisuutta tuleviin projekteihin tehtävän tuotekehitystyön yhteydessä. Luvussa pohditaan myös vaihtoehtoisia tapoja yrityksessä mahdollisesti käynnistettävään modulaarisuuden avulla varioituvan tuotealustapohjaisen vaunumallin kehitykseen.

---

Asiasanat: raitiovaunu, raitiotie, moduuli, modulaarinen, tuotealusta, tuoteperhe

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Master of Engineering, Industrial Management

---

Author: Timo Hevosmaa

Title of thesis: Modularity in Trams

Supervisor: Hannu Päätaalo

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2017      Number of pages: 78

---

It is a common fact in tram business that customer requirements differ between each delivery project. In order to keep research and development costs at reasonable level manufacturers are forced to seek solutions to meet customer requirements without need of continuous R&D and engineering. One way to reduce development costs is that manufacturers try to standardize and unify solutions used in their products. This is done by the means of product modularization and creating platform based products. This matter was topical also in Transtech Oy, which was continuing the development of Artic tram for oncoming projects at the same time they were delivering trams to Helsinki. The main objective of this thesis was to find ways how modularization could be used in existing Artic tram and how modularization is used in trams in the markets.

Topic is approached by defining factors related to modularization and product platform, which is commonly connected to product modularity. In literature there are high variety of interpretations and views of product modularity. In this thesis modularization and product platform concepts are considered from different angles and perspectives to get comprehensive understanding from them. The author tries to describe the benefits and disadvantages followed and caused by modularization from view of different functions in organization and through the whole life cycle of the product.

The theory part of the thesis gives the reader an overview of technological development of trams and tramways during the last decades. The theory chapter presents strengths and benefits of the tram in public transport system of cities. The modularity of trams is dealt with to describe how modularity and product platforms are commonly used in this particular industry. In the beginning of the research part of the thesis the development stages and unconventional technical solutions of Artic tram are presented. The chapter continues to present proposals of modularized solutions based on the construction of the existing Artic tram. Because of the solutions used in product and dominant requirements of the running project modularization proposals were directed to lower level of the product structure. The objective of proposals was to add some structural flexibility to the product by increasing modularity.

In summary part the author considers the reasons why existing product is formed with integrated product structure and thus challenging for modularization. The chapter presents alternative ways which could be used to increase modularity of the product parallel with product development for oncoming projects. The author also considers possible alternatives for the development of modular and platform based tram model.

---

Keywords: tram, tramway, module, modular, platform, product family

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	7
1.1	Tutkimustavoite .....	7
1.2	Tutkimusmenetelmät .....	8
1.3	Tutkimuksen sisältö .....	9
2	MODUULI JA MODULAARISUUS .....	10
2.1	Modulaarisuuden määrittely .....	10
2.2	Modulaarisuuden tyypit ja kehitystasot .....	11
2.3	Syitä modulointiin .....	14
2.4	Modulaarisuuden hyödyt ja haitat .....	18
2.5	Modulaarinen ja integroitu rakenne .....	21
2.6	Tuotteen modulointiedellytykset ja -menetelmät .....	26
2.7	Liitospintojen merkitys modulaarisessa rakenteessa .....	29
3	TUOTEALUSTA JA TUOTEPERHE .....	34
3.1	Tuotealustan ja tuoteperheen määrittely .....	34
3.2	Varioitavuus tuoteperheessä .....	37
3.3	Tuotealustan ja tuoteperheen kehitys .....	37
3.4	Esimerkitapaus Bombardier Flexity2-tuotealusta .....	40
3.5	Tuotteen konfiguroitavuus .....	41
4	RAITIOVAUNUN HISTORIA JA TEKNOLOGINEN KEHITYS .....	44
4.1	Raitioliikenteen ja raitiovaunuteollisuuden kehitys .....	44
4.2	Raitiovaunu .....	46
4.3	Raitiovaunun edut kaupunkiliikenteessä .....	49
4.4	Raitiovaunu vai pikaraitiovaunu .....	51
4.5	Raitiovaunujen hankinnan ja käytön ominaispiirteitä .....	51
4.6	Markkinavaatimukset ja kilpailukykytekijät .....	53
4.7	Modulaarisuus raitiovaunuissa .....	56
5	TUTKIMUSKOHDE JA MODULOINTIEHDOTUKSET .....	63
5.1	Artic-raitiovaunu .....	63
5.2	Modulaarisuus Artic-raitiovaunussa .....	65
5.3	Ehdotukset Artic-vaunun modulaarisista ratkaisuista .....	66
5.3.1	Mukautuva matkustamovarustelu .....	66

5.3.2	Vaunun ulkopuolen kattopanelointi .....	67
5.3.3	Seinärakenteen mitoituksen vakiointi .....	69
5.3.4	Vaunun nivelalueen kaapelituenta .....	70
6	YHTEENVETO JA POHDINTA.....	72
	LÄHTEET .....	76

# 1 JOHDANTO

Historian saatossa raitiovaunut ovat muuttuneet hevosilla vedettävistä yksinkertaisista vaunuista monimutkaisiksi useista vaunumoduuleista koostuviksi vaunuiksi. Matkustusmukavuuden parantaminen, matkustajien liikkumisen tehostaminen ja erilaiset turvallisuus- ja tekniset vaatimukset ovat lisänneet vaunujen kompleksisuutta lähes jokaisen uuden vaunusukupolven myötä. Rakenteiden monimutkaistuminen, tuotekehitys- ja toimitusaikojen lyhentyminen sekä projektikohtaisesti muuttuvat asiakasvaatimukset ovat pakottaneet raitiovaunujen valmistajia löytämään keinoja kustannusten kurissa pitämiseksi hankintaa, tuotantoa ja tuotekehitystä tehostamalla. Yhtenä keinona muuttuvien vaatimusten täyttämiseksi valmistajat ovat enenevässä määrin siirtymässä käyttämään modulaarisia ratkaisuja vaunujen rakenteissa.

## 1.1 Tutkimustavoite

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, miten modulaarista rakennearkkitehtuuria hyödynnetään raitiovaunuissa ja miten modulaarisuutta voidaan lisätä olemassa olevaan raitiovaunuun. Työn syntyä edesauttoi työn kirjoittamishetkellä käynnissä ollut raitiovaunujen toimitusprojekti, jossa Transtech Oy kehitti ja valmisti Helsingin kaupungin raitioliikenteeseen matalalattiaraitiovaunuja. Selvitys modulaarisuuden hyödyntämisestä raitiovaunun rakenteissa tuli ajankohtaiseksi aloitettaessa Helsinkiin kehitetyn vaunun jatkokehitystä muita toimitusprojekteja varten. Työn tekemisen ajankohta huomioiden yhtenä työn tavoitteena oli tuotteen modulaarisuuteen perustuvan keskustelun ja ajatustenvaihdon lisääntyminen yrityksen eri toiminnoissa.

Ennen varsinaista tutkimusosuutta esitellään olemassa olevan Artic-raitiovaunun kehitysvaiheita ja rakenneratkaisuja. Tarkoituksena on antaa lukijalle kuva vaunusta, johon työn tutkimusosuuksessa esitetyt modulointiehdotukset on kohdistettu. Ehdotukset on tehty huomioiden lähtötilanteessa vahvasti integroitu vaunun rakenne. Työssä ei pyritty tarkastelemaan koko raitiovaunun rakennetta ja kaikkia järjestelmiä, vaan tarkoituksena oli löytää ja keskittyä osa-alueisiin, joiden moduloinnilla pystytään parantamaan jonkin asiakastarpeen toteutumista tai vaikuttamaan vaunun valmistus-, kehitys- tai materiaalikustannuksiin. Modulointiehdotuksien yhtenä tavoitteena oli myös parantaa vaunun jonkin ominaisuuden päivitettävyyttä vaunun myöhemmässä elinkaaren

vaiheessa. Työstä on rajattu pois työn tekohetkellä raitiovaunussa olleet järjestelmät ja rakenteet, joissa modulaarisuus jo toteutuu. Rakenteiden tarkastelu tehdään yleisellä tasolla pyrkien esittämään oleellisia tekijöitä, jotka tulee huomioida modulaarisen rakenteen kehittämisessä. Teknisten ratkaisujen yksityiskohtia työssä ei ole tutkittu, eikä niitä näin ollen myöskään esitellä.

Optimistisena tavoitteena raitiovaunun rakenteen moduloinnissa on päästä tilanteeseen, jossa raitiovaunuja tilaavien tahojen toisistaan poikkeavat vaatimukset vaunun rakenteen suhteen on toteutettavissa vaunun rakenneratkaisuja oleellisesti muuttamatta. Yleisimmin tilaajien poikkeavat vaatimukset koskevat muun muassa vaunun pituutta, leveyttä, ulkonäköä, kynnys- ja lattiakorkeutta, raideleveyttä, akselipainoja sekä yhteen tai kahteen suuntaan ajettavuutta. Osa luetelluista vaatimuksista on muodostumassa enemmän tai vähemmän markkinoiden vakiovaatimuksiksi, joiden toteutumiseen on jokaisen vaunutyypin kohdalla valmistauduttava.

Yllä kuvattua realistisempi tavoite modulaarisuudella saavutettavista eduista on saavuttaa rakenne, jossa samat rakenneosat ja ratkaisut voidaan käyttää toistuvasti. Toinen saavutettavissa oleva hyöty on toteutustapa, jossa rakenteeseen asiakasräätelöinnin seurauksena tehtävät muutokset pystytään rajaamaan tiettyihin rakenteen osiin aiheuttamatta laajempaa muutostarvetta. Molemmissa tapauksissa onnistuneella rakenteen moduloinnilla on saavutettavissa kustannushyötyjä pienentyneinä tuotekehityspanostuksina, vakioituilla tuotantomenetelmillä, paremmalla laadulla ja suurempien tuotantomäärien mahdollistamalla materiaalikustannusten pienentämisellä. Modulaarisuudella saavutetaan etua myös tuotteen kilpailukykyä parantavan joustavuuden lisääntyessä.

## **1.2 Tutkimusmenetelmät**

Työssä esitetty materiaali pohjautuu kirjallisuustutkimukseen, asiantuntijahaastatteluihin ja markkinatutkimuksiin sekä raitiovaunuvalmistajien markkinointi- ja muuhun julkisesti saatavilla olevaan materiaaliin. Yhteenveto-osuus perustuu kirjoittajan omiin kokemuksiin, näkemyksiin ja pohdintoihin. Työ on konstruktivinen tutkimus, joka sisältää toimintamalliehdotuksen mahdolliselle aiheen jatkoselvitykselle. Työ on tehty tapaustutkimuksena, jossa varsinaisena työn kohteena on yrityksessä työn kirjoitushetkellä valmistuksessa ollut raitiovaunu. Olemassa olevan vaunun jatkokehi-



tystä ja mahdollisen tuotealustaan perustuvan tuotteen kehitystä silmälläpitäen aihetta on pyritty käsittelemään työssä kokonaisvaltaisesti.

### 1.3 Tutkimuksen sisältö

Varsinaista työn aihetta lähestytään perehtymällä ensin käsitteisiin moduuli ja modulaarinen tuote sekä niiden syntyyn ja kehitykseen teollisuuden tarpeiden muuttuessa. Käsitteiden ja niiden liitännäisten tarkastelua on pyritty tekemään laajemmin myös varsinaisen raitiovaunuaihepiirin ulkopuolelta. Tarkastelua on kuitenkin tehty vain laite- ja koneenrakennuksen näkökulmasta, ohjelmistoja tai muita aineettomia moduulikäsitteitä työssä ei tarkasteltu. Työssä esitellään kirjallisuudessa vallalla olevia näkemyksiä modulaarisen tuotteen kehittämisen edellytyksistä ja modulaarisuuden avulla saavutettavista eduista sekä siitä aiheutuvista haitoista. Teoriaosassa esitellään pintapuolisesti periaatteita ja menetelmiä, joita käytetään tunnistamaan tuotteen rakenteen osa-alueet, joissa modulaarisella rakenteella on yleisesti saavutettavissa etua. Työssä on pyritty kuvaamaan tuotteen modulaarisuuden merkitystä tuotekehityksen, valmistuksen, markkinoinnin ja kunnossapidon näkökulmasta. Teoriaosuudessa käsitellään lisäksi modulaarisen ja integroidun rakenteen periaatteellisia eroja ja tuotteen modulaarisuuteen vahvasti liittyviä käsitteitä tuotealusta ja tuoteperhe. Kiskokalustotuotteiden tuotealustojen kehittämistä käsitellään yhden toteutuneen esimerkitapauksen avulla.

Raitiovaunuja käsittelevä teoriaosuus tutustuttaa lukijan lyhyesti raitiovaunuteollisuuden kehitykseen Euroopassa ja vaunuteknologian kehitysvaiheisiin viime vuosikymmenien aikana. Työssä esitellään raitiovaunun käyttöön, kehitykseen ja valmistukseen sekä hankintaan liittyviä ominaispiirteitä. Luvussa esitetään raitiovaunun tekniseen rakenteeseen liittyviä yleisimpiä asiakasvaatimuksia ja ratkaisuja niiden toteuttamiseksi, sekä tutustutaan markkinoilla olevien raitiovaunujen ja niissä käytettyjen järjestelmien modulaarisuuteen. Luvun tarkoituksena on tutustuttaa lukija alan käytäntöihin, vaatimuksiin ja raitiovaunuissa käytettyihin ratkaisuihin yleisellä tasolla.

## 2 MODUULI JA MODULAARISUUS

### 2.1 Modulaarisuuden määrittely

Termiä modulaarisuus käytetään monissa yhteyksissä ja aihepiiristä riippuen sillä usein tarkoitetaan eri asioita. Monimutkaisen tuotteen suunnittelussa termi viittaa toisistaan **riippumattomien** osakokonaisuuksien käyttöön. Rakennusteollisuudessa modulaarisuudella tarkoitetaan usein **vakioitujen** rakenneosien hyödyntämistä. Tuotteita valmistavassa teollisuudessa modulaarisuus viittaa tuotevariaatioiden aikaansaamiseen **vaihdettavien** osakokonaisuuksien avulla. Nämä määritelmät liittyvät vahvasti toisiinsa, koska osakokonaisuuksien **riippumattomuus** on tuotteen ominaisuus, joka mahdollistaa **vakioinnin** ja **vaihdettavuuden**. (Ulrich & Tung 1991, 220.)

Ajan saatossa yleinen käsitys modulaarisen rakenteen perusyksiköstä, moduulista, on muuttunut legopalikan kaltaisesta rakenneosasta laitteen tai järjestelmän toiminnalliseksi osaksi, jolla on määrätty tehtävä ja tarkoin määritetyt rajapinnat. Ennen moduulikäsitteen laajempaa yleistymistä laite- ja koneenrakennuksessa modulaarisuutta hyödynnettiin teollisessa rakentamisessa. Jo 1900 -luvun alkupuolella saksalaisessa rakennusteollisuudessa rakenteiden vakiointi ja käytännöllisyyteen tähtäävä ajattelu johti rakenteiden jaotteluun rakennelohkoiksi (Baukasten). Syntyi toiminnallisia rakennemuoduleja, kuten keittiö, olohuone ja makuuhuone, joiden toisiinsa liittäminen oli mahdollista vakioitujen rajapintojen avulla. Rakennemuodulien yhtenäinen mitoitus ja toiminnallisuuden rajaaminen moduulien sisään mahdollisti rakennemuodulien yhteen liittämisen useilla eri kokoonpanoilla määrättyjen rakennuksen ulkomittojen puitteissa. Rakennelohkoihin perustuvan rakentamisen tavoitteena oli järkeistä rakentamista vakioinnin ja ennalta valmistettujen rakenneosien avulla ja mahdollistaa kattavampi ja tehokkaampi rakenteiden suunnittelu. Myöhemmin tapahtunut teollisuusyrityksien pyrkimys yhdistää tuotteidensa yhtenäistämisen ja vakioiminen markkinoiden vaatimaan räätälöimiseen on muuttanut modulaarisuuden käsitettä alkupe- räisestä rakennelohkosta tai rakennuspalikasta. (Miller & Elgård 1998, 1-3.)

Modulaarisuuden avulla tuotteen ominaisuuksien mukauttaminen halutun kaltaiseksi voidaan tehdä kustannustehokkaasti. Tuotteen rakenteiden yhteiskäyttöisyyden avulla saavutetaan mitta- kaavaetua materiaalikustannuksissa sekä valmistuksessa. Valittujen moduulien parametrinen mukauttaminen mahdollistaa tuotteen ominaisuuksien, kuten esimerkiksi lopputuotteen ulkomitto-

jen asettamisen tarkasti asiakkaan määrittämien vaatimuksien mukaiseksi. (Säilynoja 2014, 33.) Blecker ja Friedrich (2007,7) määrittelevät modulaarisuuden moniulotteiseksi tuotteen ominaisuudeksi, johon liittyy seuraavat kolme päätekijää:

- tuote koostuu rakenneosista, jotka ovat sekoitettavissa ja liitettävissä toisiinsa ja lopputuloksena on valikoima vaihtoehtoisia tuotteita
- vakioidut liityntäpinnat mahdollistavat rakenneosien uudelleen käytön useissa tuoteyksiköissä
- vanhenevaa tuotetta voidaan uudistaa ja muuttaa vaihtamalla tuotteeseen rakenneosan tai rakenneosia muun tuotteen muuttumatta

Varsinkin kolmannen modulaarisuuden kriteerin ajavana voimana ovat taloudelliset seikat. Etua on saavutettavissa, mikäli olemassa olevan tuotteen suorituskyvyn parantaminen, vanhaa säilyttäen, on mahdollista kokonaan uuden tuotteen kehitystä matalammalla kustannuksella.

Moduulien käyttö ja tuotteiden modulaarisuus ovat kehittyneet laajalti käytetyiksi käytännöllisiksi ratkaisuksiksi usealla teollisuuden alalla. Vaikka tuotteen modulaarisuutta ei olisi sen tarkemmin määritetty, tuotteen voidaan kertoa koostuvan moduuleista jo pelkästään siitä syystä, että tuotteen rakenteen osat ovat vaihdettavissa vakioitujen liitospintojen ansiosta. Silloin tällöin yllä kuvattu vaihdettavuus liitetään tuotteen modulaarisuuteen ja konfiguroitavuuteen, mutta näin ei toki aina ole. Modulaarisiksi mainituilla tuotteilla on usein yhteistä, että tuote on jaettu osiin jonkun erillisen syyn kuin teknisen rakenteen vuoksi. Syy jaotteluun voi liittyä tuotteen valmistuksen organisointiin, elinkaaren aikaiseen päivitettävyyteen tai tuotteen asiakasräätälöitävyyteen. (Lehtonen 2007, 24.)

## **2.2 Modulaarisuuden tyypit ja kehitystasot**

Kirjallisuudessa modulaarisuudesta on useita eri näkökulmiin perustuvia määritelmiä. Usein lähtökohtina käytetään toiminnallista modulaarisuutta sekä valmistettavuuden ja elinkaaren huomioivaa modulaarisuutta. Toiminnallisen modulaarisuuden periaatteena on, että tuotteesta tulee pystyä kasaamaan erilaisia variaatioita vakioitujen liittymispintojen avulla. Valmistettavuuden ehdoilla tehtävässä moduloinnissa on tärkeää, että moduulit voidaan rakentaa erillään lopullisesta

kokoonpanosta. Tällöin moduuli voidaan kuvata tarkoin rajatuksi ja suunnitelluksi osakokoonpanoksi, jossa liityntäpintojen suunnittelua ohjaavana tekijänä on kokoonpantavuus. (Koukkunen 2010, 14–16.)

Toiminnallisen modulaarisuuden periaate on moduulien määrittäminen toimintojen näkökulmasta siten, että ne toteuttavat tiettyjä toimintoja joko yksin tai yhdessä muiden moduulien kanssa. Moduulien toimintojen kytkeminen toisiinsa saa aikaan kuitenkin rakenteen integroitumista, joka yleisesti ottaen on modulaarisen rakenteen kannalta epäedullista. Toiminnallista modulaarisuutta voidaan hyödyntää mm. tuotteen markkinoinnissa. Asiakkaat ovat tyypillisesti kiinnostuneita siitä, että tuotteen ominaisuudet ja toiminnot vastaavat heidän vaatimuksiaan, niiden toteutuksessa käytetyt komponentit ovat usein asiakkaan näkökulmasta toisarvoisia. Toiminnalliselle modulaarisuudelle on ominaista, että moduulin ei tarvitse olla rakenteeltaan fyysinen kokonaisuus, vaan se voi olla hajautettuna ympäri tuotetta. Tällöin sitä ei myöskään voida valmistaa erillisenä kokonaisuutena irrallaan lopputuotteesta. (Lehtonen 2007, 93.)

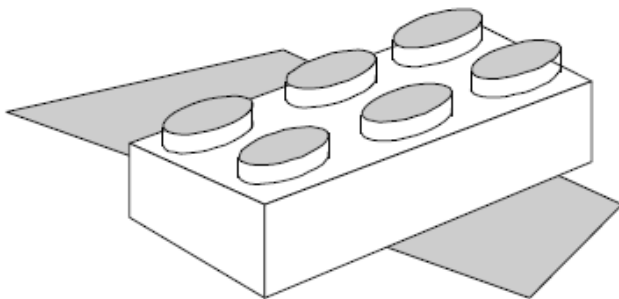
Valmistettavuuden näkökulmasta tehdyssä moduloinnissa kokoonpantavuuden ja yhteiskäyttöisyyden avulla saavutettavan mittakaavaedun lisäksi oleellista on myös osakokoonpanojen ja järjestelmien toiminnan testaus ennen niiden liittämistä lopputuotteeseen. Näin mahdollistetaan samanaikaisesti tapahtuva laitteen kokoonpano ja testaus usealle toisistaan riippumattomalle osakokoonpanolle. Osakokoonpanoihin ja järjestelmiin ulottuva laajamittainen testaus irrallaan lopputuotteesta vähentää oleellisesti tarvetta testata valmista tuotetta, mikä edesauttaa tuotteen valmistuksen tehokkuutta ja tuotannon läpimenoaikaa. Ennalta tehty järjestelmätestaus pienentää tuotantoaikataulun viivästymisen riskiä, koska mahdolliset järjestelmien toimintaan liittyvät ongelmat havaitaan aikaisemmin ja ne voidaan korjata tuotannon siitä kärsimättä.

Valmistettavuuden huomioivassa modulaarisuudessa tuotteen kokoonpantavuudella on merkittävä rooli. Kokoonpanoperusteinen modulaarisuus on vanhin ja yleisin tuotearkkitehtuurin modulaarisuuden muoto, jossa valmistuksen työjärjestys jakaa tuotteen osat ennalta valmistettaviin ja lopulta yhteen liitettäviin osakokonaisuuksiin. Kokoonpanoperusteinen modulaarisuus nähdään usein valmistavan tuotannon lisäksi myös hankinnan ja kunnossapidon toimintoja tukevaksi. (Lehtonen 2007, 92–93.) Elinkaaren huomioivassa mallissa huomioidaan tuotteen käyttöiän aikana esiintyvät seikat, kuten päivitettävyys muuttuvien asiakastarpeiden mukaiseksi, kunnossapidettävyys ja kierrätettävyys.

Toiminnallisuutta ja valmistettavuutta huomioivan modulaarisuuden kehittyneempänä tasona Lehtonen pitää asiakasvarioituvaa modulaarisuutta, jossa valmistettava tuote jaetaan vakiona pysyvään elementtiin (tuotealusta) ja siihen yhdistettäviin muuttuviin osiin. Asiakasvarioituvan modulaarisuuden perustana on tunnistaa tuotevarianteista yhteisiä ominaisuuksia, joilla ei ole asiakkaan näkökulmasta merkitystä. Nämä ominaisuudet kootaan jokaiselle tuotevariantille yhteiseksi vakioiduksi alustaksi. Asiakasvarioituvaa modulaarisuutta ohjaa tuotteen kehitystä tuoteperheajattelun kannalta myönteiseen suuntaan. (Lehtonen 2007, 93.)

Ulrich ja Tung (1991, 73–79) jakavat modulaarisuuden vielä viiteen erilaiseen lajiin:

- Moduulien vaihtokelpoisuus (swapping modularity), jossa kahden tai useamman moduulin vaihto on mahdollista tuotevarianttien aikaansaamiseksi
- Moduulien käyttö useammassa tuotevariantissa (sharing modularity), jossa samaa moduulia voidaan käyttää useammassa tuotevariantissa tai tuoteperheessä
- Parametrinen modulaarisuus (fabricate to fit modularity), jossa haluttu lopputulos saadaan parametrien arvoja muuttamalla
- Väylämodulaarisuus (bus modularity), jossa moduulien liittäminen tuotteen perusyksikköön vapaavalintaisessa järjestyksessä on mahdollista
- Lohko- eli Lego-modulaarisuus (sectional modularity) (KUVA 1), jossa ryhmä moduuleja voidaan vakioitujen rajapintojen ansiosta yhdistellä haluttuun vapaavalintaiseen järjestykseen



*KUVA 1. Lego palikka ei yleensä ole moduuli, koska sillä ei ole merkittävää toiminnallisuutta kokonaisuudessa, jossa sitä on käytetty. Palikalla on kuitenkin vakioidut liitospinnat, joiden avulla sitä voidaan käyttää vaihtoehtoisilla tavoilla (Miller & Elgård 1998, 4).*

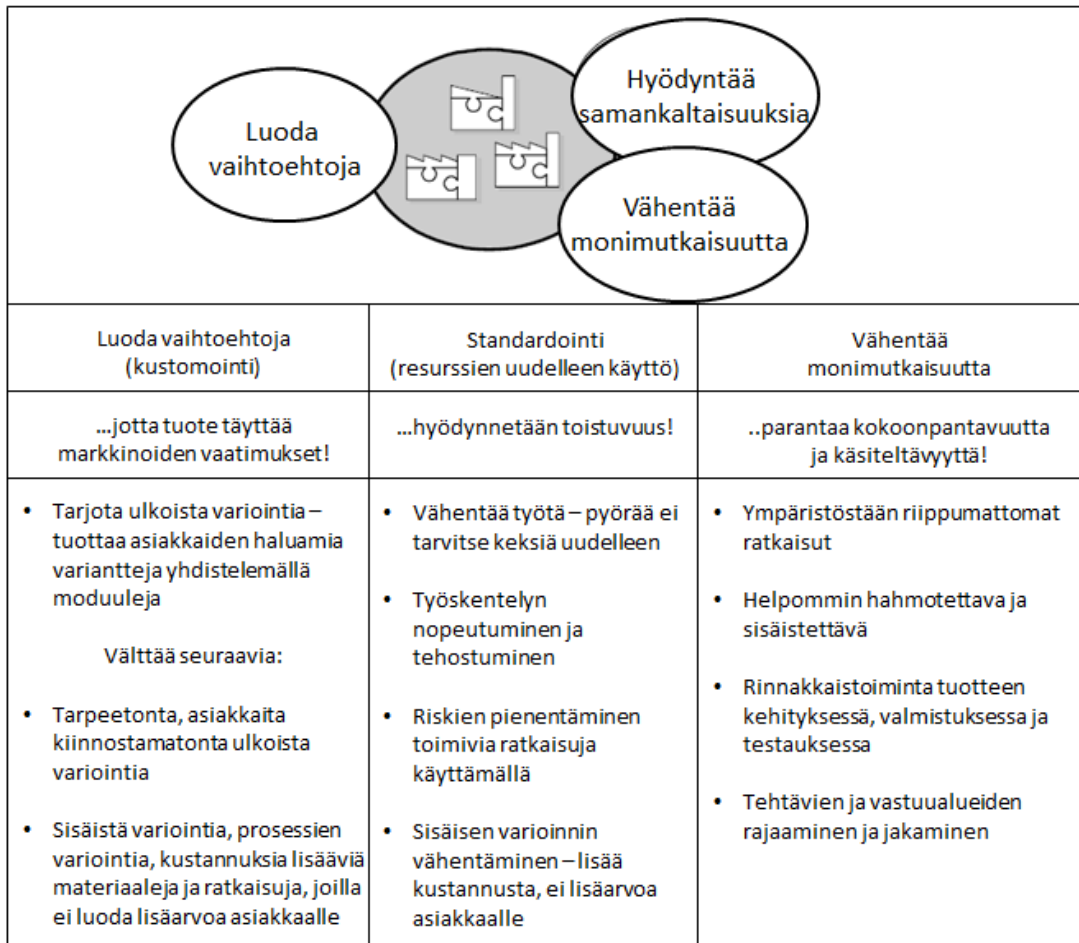
Tuotteen modulointia voidaan siis teoriatasolla jaotella useiden eri periaatteiden mukaisesti. Käytännön toteutuksessa tuotteen modulointi ei kuitenkaan välttämättä seuraa kuvattua jaottelua. On olemassa modulointimenetelmiä, joissa yhdistetään käsitteet toiminto- ja valmistusmoduuli. Tällöin moduulit valitaan tuotteen teknisten ratkaisujen ja toimintojen perusteella, mutta samalla ne on määritelty myös valmistusnäkökulmasta. (Sarinko 1999, 34.) Tuotteen modulointi on siis yhdistelmä, jossa moduloinnin lähtökohtien painoarvot muodostuvat tapauskohtaisesti toivotunkaltaisen lopputuloksen saavuttamiseksi. Kaikille modulaarisuuden tyypeille on yhteistä, että moduloinnilla ei voi optimoida tiettyjä tuotteen ominaisuuksia vaan moduloinnin tavoitteena on löytää riittävän hyvät kompromissiratkaisut. Moduloinnin onnistumisen lopputulosta ei tule arvioida vain teknisin perustein, vaan olennaisin arviointikriteeri tulisi olla asiakastarpeiden täytyminen. Näin ollen asiakastarpeet ovat tärkein ajuri aloitettaessa modulaarisen tuotteen kehittämistä.

### **2.3 Syitä modulointiin**

Moduuli ja modulaarisuus liitetään usein teollisuusyritysten haluun parantaa tuotteidensa kilpailukykyä ja ne nähdään yhtenä keinona vastata yritysten kohtaamiin liiketoiminnallisiin haasteisiin. Asiakkaiden kasvavat tarpeet johtavat yrityksiä ylläpitämään suurempia tuotevalikoimia ja samanaikaisesti kilpailu pakottaa yrityksiä tehostamaan toimintaansa kustannuksia laskemalla, laatua parantamalla ja tilaus-toimitusprosessin vasteaikoja lyhentämällä. Kilpailukykyisen kehityksen ajatellaan tapahtuvan tuotteen standardoinnin, räätälöitävyyden ja joustavuuden yhdistämisellä. Tuotteen moduloinnin avulla tuotteen ominaisuuksien hallinta ja kehittäminen paremmin asiakasvaatimuksia vastaavaksi on helpompaa. Modulaarisen tuotteen kehityksen ajavana voimana on yleensä pyrkimys tuotevalikoiman laajentamiseen, rakenteiden samankaltaistamiseen ja yksinkertaistamiseen. (Miller & Elgård 1998, 2).

Tuotteiden samankaltaistaminen mahdollistaa tuotteiden kehittämisen yhteisille tuotealustoille, joiden avulla yrityksen tuotevalikoimasta on muodostettavissa tuoteperheitä irrallisten yksittäisten tuotteiden sijaan. Modulaariseen rakenteeseen perustuva räätälöitävä tuoteperhe mahdollistaa paremmin asiakastarpeita vastaavan tuotevalikoiman kehitys-, materiaali- ja valmistuskustannuksiltaan matalammalla kustannuksella. Käsitteitä tuotealusta ja tuoteperhe tarkastellaan tarkemmin luvussa 3.

Tuotteen modulointi nähdään usein tasapainoiluna kahden vastakkaisen tarpeen välillä, tarpeet ovat vakiointi ja räätälöinti (KUVA 2). Moduloinnin voidaan ajatella olevan myös tasapainoilua laajan tuoteportfolion ja rationaalisen valmistamisen välillä. Usein ajatellaan, että yritykset valitsevat strategiansa massatuotannon ja tuotteen räätälöinnin väliltä. Suurten kappalemäärien valmistaminen tehokkaasti tehdään räätälöinnin kustannuksella. Vastaavasti tuotteen räätälöinti tehdään tuottamisen tehokkuuden kustannuksella. (Miller & Elgård 1998, 8.)



KUVA 2. Modulaarisuus on tasapainoilua erilaisten tarpeiden ja tavoitteiden välillä (Miller & Elgård 1998, 9)

Lampel ja Mintzberg (1996, 21–30) kirjoittavat tunnistavansa teollisessa tuotannossa kolme osaluuetta, jotka voidaan vakioida tai räätälöidä. Näitä ovat valmistettava tuote, joka voi olla tarkasti asiakastarpeen mukaisesti räätälöity tai standardituote. Kehitys- ja valmistusprosessit voivat olla joko yksittäiskappaleiden ja pienien tuotantosarjojen valmistusta tai massatuotantoa tukevia ja niihin perustuvia. Myyntiin ja palveluihin liittyvä liiketoiminta voi olla kohdentamatonta tai hyvin tarkasti tiettyyn markkinasegmenttiin kohdennettua. On hyvä huomata eroavaisuus vakioinnin (standardointi) ja moduloinnin välillä. Tuote, kehitys- ja valmistusprosessit sekä myyntiliiketoimin-

ta voidaan jollakin tasolla vakioida, mutta näistä kolmesta vain tuote on moduloitavissa. (Lampel & Mintzberg 1996, 21–30.)

Kuten aiemmin kirjoitetusta modulaarisuuden määrittelyistä on huomattavissa, modulaarisuus on teoriatasolla hyvin monitahoinen käsite. Myös käytännön toteutuksessa valmistavassa teollisuudessa modulaarisuudesta on olemassa lukuisia erilaisia variaatioita. Yhtenä esimerkkinä on laivanrakennustelakka, jossa laivan lohkot kootaan ja varustellaan pienempinä yksikköinä ennen liittämistä yhteen laivan loppukokoonpanossa. Näin toimimalla ei ainoastaan edistetä suurien lohkojen käsittelyä telakalla, vaan myös niiden suunnittelua, valmistusta, testausta ja ennen kaikkea työkokonaisuuden hallittavuutta. Työtä voidaan tehdä hajautetusti ja samanaikaisesti riippumatta muiden lohkojen suunnittelun tai valmistuksen edistymisestä. On kuitenkin hieman epäselvää voidaanko tämän tyyppisen toiminnan ajatella olevan moduloitua vai vain suuremman kokonaisuuden pilkkomista pienempiin ”rakennuspalikoihin”. Mikäli lohkojen rakenne ja toiminnallisuus ovat vain periytyvä tapa aiemmin käytetyistä ratkaisuista, se ei ole modulaarisuutta sellaisena, kuten se nykyisin ymmärretään (Miller & Elgård, 1998, 10).

Yrityksillä voi olla lukuisia syitä modulaarisen tuotteen kehitykselle. Syyt vaihtelevat suuresti valmistettavasta tuotteesta riippuen ja moduloitua tehdäänkin hyvin moninaisissa tuotteissa. Esimerkkeinä erilaisista modulaarisista tuotteista käy tietokone ja aiemmin mainittu laiva. Molemmat perustuvat modulaariseen rakenteeseen, mutta muuta yhteistä tuotteissa ei voida tunnistaa. Erixon (1998, 72) nimittää syitä modulaarisen tuotteen kehittämiseksi moduuliajureiksi. Moduuliajurit yrityksen toimintojen välillä vaihtelevat ja yleisimpiä moduuliajureita ovat:

#### Suunnittelu ja tuotekehitys

- tuotteen siirto seuraavaan tuotesukupolveen
- tuotteen tekninen kehitys
- suunnitellun muutoksen aikana toteutettu moduloitua
- teknisten vaatimuksien muutos
- tuotteen muotoiluun liittyvät tekijät

#### Tuotanto ja laatu

- yhteinen tuotealusta (perusyksikkö)
- prosessien ja menetelmien uudelleen käyttö



- osakokoonpanojen toiminnantestaus rinnakkain valmistuksen kanssa

#### Alihankintaverkostot

- järjestelmien vakiointi tehokkaan hankinnan mahdollistamiseksi
- alihankkija vastaa täysin toimittamansa moduulin vaatimusten mukaisuudesta ja toiminnasta

#### Jälkimarkkinointi

- huolto ja kunnossapito
- perusparannus tai modernisointi tuotteen elinkaaren jatkamiseksi
- kierrätys ja ympäristönäkökulmat

Tuotteissa on usein komponentteja ja ominaisuuksia, jotka voidaan siirtää tuotesukupolvelta toiselle sellaisenaan. Toisaalta teknologisen kehityksen vuoksi komponentit tai ominaisuudet voivat myös vanhentua varsinaista tuotetta nopeammin, tämä koskee varsinkin elektroniikka ja sähkölaitteita. Modulaarisella rakenteella toteutetun tuotteen elinkaaren aikana tehtävät muutokset eivät yleensä aiheuta muutoksia tuotteen muihin ominaisuuksiin, joten myös moduulien elinkaaret ovat itsenäiset. Tämä on mahdollista, jos modulaarisuuden periaatteet pystytään säilyttämään uutta tuotesukupolvea kehitettäessä. Modulaarisen rakenteen joustavuuden tulisi mahdollistaa vanhevien komponenttien vaihto ja näin ollen tuotteen elinkaaren jatkaminen. (Sarinko 1999, 40.)

Kirjallisuudessa on olemassa lukematon määrä eri näkökulmia moduulista ja modulaarisesta tuotteesta. Joidenkin mielestä tuotteen toiminnallinen modulaarisuus, eli toimintojen rajaaminen yksittäisten moduulien sisään on tavoiteltava tilanne. Tällöin lopputuotteen ominaisuudet voidaan määrittää tarkasti asiakkaan toivomusten mukaisesti. Rakenteellinen eli valmistettavuuden näkökulmasta tehtävä modulaarisuus nähdään usein toisena tärkeänä modulaarisuuden lähtökohtana. Asiakaslähtöinen tuoteperheeseen tai tuotealustaan perustuva modulaarisuus on myös yleinen näkökulma tuotteen modulaarista konfiguroitavuutta unohtamatta. Joidenkin näkemysten mukaan tuotetta ei edes voi pitää modulaarisena, mikäli asiakkaat eivät ole kiinnostuneita kokoamaan tuotteesta itselleen sopivaa tuotevarianttia. Toisistaan poikkeavista näkökulmista huolimatta yleinen käsitys kuitenkin on, että teknisesti toteutettavissa olevaa moduulirakennetta ei voida pitää osoituksena onnistuneesta tuotteen moduloinnista. Tärkeimpänä tekijänä pidetään modulaarisen

rakenteen kehittämistä asiakastarpeisiin perustuen, jolloin moduulien toiminnot yhdistyvät asiakkaiden vaatimuksiin. (Säilynoja 2014, 33.)

## 2.4 Modulaarisuuden hyödyt ja haitat

Modulaarisuus tuo mukanaan niin hyötyjä kuin haittojakin, joista kirjallisuudessa on hyvin moninaisia näkemyksiä. Yleisimmin modulaarisuudella saavutettavina hyötyinä mainitaan:

- Suunnittelu- ja tuotekehitystyön yksinkertaistuminen

Työn määrä vähenee tilauskohtaisen suunnittelutarpeen vähentyessä (design reuse). Tuotekehitysprosessit yksinkertaistuvat ja vakioidut rajapinnat mahdollistavat rinnakkain tehtävän tuotekehitystyön pienemmille osakokonaisuuksille. Moduulit muodostavat luonnollisen rajapinnan yrityksen sisällä ja ulkona tehtävän suunnittelu- ja tuotekehitystyön vastuualueista. (Espada, Pinto & Henriques 2004, 3.)

- Tuotteen informaation ja materiaalin kulun tehostuminen

Markkinoilla tapahtuvat muutokset tai kehittyvien teknologioiden aiheuttamat muutokset ovat helpompi toteuttaa, koska ne vaikuttavat vain pieneen osaan tuotetta (Sarinko 1999, 45).

- Tuotteen laadun parantuminen

Testaus ja muut laadunhallintatoimet voidaan kohdistaa pienempiin osakokonaisuuksiin ennen tuotteen loppukokoonpanoa. Korjaavat toimenpiteet on helpompi suunnata ja toteuttaa. (Espada ym. 2004, 3).

- Tuotantomenetelmien ja tuotteen rinnakkainen kehittäminen

Yksittäisen muusta valmistuksesta irrallaan olevan valmistusteknologian ja menetelmän kehittäminen tuotesuunnittelun rinnalla (Sarinko 1999, 33).

- Materiaali- ja hankintakustannusten madaltuminen

Pienempi nimikkeiden määrä (komponenttien standardointi) ja sarjakokojen kasvu vähentää rakenteiden ylläpitoon ja hankintaan liittyvää työtä, mikä laskee yksikköhintoja ja tarkentaa tuotteen kustannusrakennetta (Espada ym. 2004, 3).

- Tuoterakenteen ja -varianttien hallittavuuden ja päivitettävyyden parantuminen  
Tuotemuutoksien toteutus on tehtävissä moduuleita vaihtamalla ilman vaikutuksia tuotteen muuhun rakenteeseen (Erixon 1998, 55).
- Projektin kokonaisläpimenoajan lyhentyminen  
Modulaarinen rakenne virtaviivaistaa tarjoussuunnittelua ja joissain tapauksissa jopa mahdollistaa tuotteen toimituksen ilman tilauskohtaista suunnittelua. Modulaarinen tuote lyhentää tuotannon läpimenoaikaa rinnakkain tapahtuvan valmistuksen ansiosta. (Sarinko 1999, 45.)
- Alihankintaverkoston tuotekehityksen tehostuminen  
Modulaarinen tuote luo toimittajille paremmat edellytykset kehittää ja innovoida omaa tuotettaan (Espada ym. 2004, 3).

Mainitusta syistä johtuen yrityksen kokonaiskannattavuus paranee modulaarisen tuotteen tuottamisen ollessa projektituotetta edullisempaa. Tilauskohtaisen suunnittelutarpeen väheneminen mahdollistaa yrityksen suunnittelun- ja tuotekehityksen kohdentamisen uusien tuotteiden kehitykseen ja olemassa olevien tuotteiden parantamiseen. (Sarinko 1999, 45.) Erixon (1998, 55) näkee modulaarisuuden etuna myös paremman tuoterakenteen variaatioiden hallinnan. Modulaarinen rakenne mahdollistaa monimutkaisen tuoterakenteen pilkkomisen pienempiin ja helpommin hallittaviin kokonaisuuksiin.

Modulaarisuudella saavutetaan etua etenkin pitkän elinkaaren tuotteissa, joille on yleistä, että tuotteessa olevat laitteet ja järjestelmät vanhentuvat varsinaista tuotetta nopeammin. On tavantomaista, että tuotetta päivitetään laitteiden ja teknologioiden kehittyessä. Päivitykset ja modernisoinnit jatkavat tuotteen elinkaarta ja mahdollistavat tuotteen muuttamisen paremmin uusia vaatimuksia tai muuttuneita asiakastarpeita vastaaviksi. Tuotteen elinkaarta jatkavia toimenpiteitä voidaan tehdä korjauksien, suunnittelun huoltotoiminnan ja jälleenmyynnin keinoin. Moduulien vakioidut liitospinnat ja tuotteen toimintojen jakaantuminen moduulien välillä yksinkertaistavat elinkaaren aikana tapahtuvaa päivittämistä. Tuotteen ominaisuuksien ja vaatimusten muuttamisen ennustaminen on usein vaikeaa tai mahdotonta, joten modulaarinen rakenne on varautumista kehitysvaiheessa tiedostamattomien ominaisuuksien tai vaatimusten varalle. Tuotesukupolvelta toiselle siirtyvä modulaarisuus parantaa entisestään moduloinnilla saavutettavaa etua, kun aikai-

semmastä tuotesukupolvestä hyväksi tunnistetut valmiit ratkaisut esimerkiksi tuotekehityksessä ja valmistuksessa voidaan hyödyntää toistuvasti. (Forlingieri 2014, 22-23.)

Modulaarisuuden mukanaan tuomista haitoista yleisimpinä pidetään tuotteiden asiakaskohtaisen räätälöitävyyden ja markkinointitavoitteiden rajoittamista. Rajatun räätälöitävyyden seurauksena tuotteen kilpailukyky heikkenee verrattaessa sitä projektiokohtaisesti suunniteltuihin tuotteisiin. Modulaarisuus lisää merkittävästi tuotteen alkuvaiheen suunnittelutyötä, koska modulaarisen rakenteen kehityksessä osakokonaisuuksien keskinäisten vaikutuksien määrittäminen tulee tehdä tarkemmin kuin vastaavassa integroidussa rakenteessa. (Sarinko 1999, 23, 30, 31.) Tuotteen modulaarisuus voi aiheuttaa valmistajan alihankkijoille ja toimittajille kustannusten nousua, vaikka valmistajan tavoitteena on kustannusten laskeminen (Hölttä-Otto 2005, 29).

Tuotteen modulaarisuus asettaa erityisiä vaatimuksia järjestelmien ja komponenttien toimittajille. Vaatimukset eivät kohdistu ainoastaan kustannuksiin vaan myös toimittajan tuotekehityskykyyn. Asiaa ei pidä ajatella varsinaisena modulaarisuuden aiheuttamana haittana, vaan sitä seuraavana haasteena. Modulaarisuus antaa toimittajalle mahdollisuuden oman tuotteen kehittämiseen ja innovointiin, mutta samalla modulaarisuuden myötä osa lopputuotteen kehitysvastuusta siirtyy toimittajan tehtäväksi. Toimitettavat järjestelmät monimutkaistuvat ja toimittajan rooli korostuu myös lopputuotteen kokoonpantavuuden kehittämisessä. Vaatimuksien kasvaessa toimittajat kohdentavat panostuksensa tarkemmin, mistä usein seuraa toimittajan erikoistuminen tietyn järjestelmän tai komponentin toimittajaksi. Kyseessä on hyvin laajassa mittakaavassa tapahtunut ilmiö, jota kuvaa hyvin muun muassa autoteollisuudessa vuosikymmenien aikana tapahtunut kehitys. Autonvalmistajat ovat profiloituneet monelta osin pelkästään autojen kokoonpanijoiksi ja varsinaisen järjestelmätason ja komponenttien kehitystyö on siirtynyt toimittajien tehtäväksi. Samansuuntainen kehitys on tapahtunut myös kiskokalustoteollisuuden puolella. Modulaarisuuden myötä toimittajien rooli on siis kasvanut ja tulee kasvamaan entisestään varsinaisten lopputuotteen valmistajien keskittyessä muun muassa tuotannon tehostamiseen. (Espada ym. 2004, 3.)

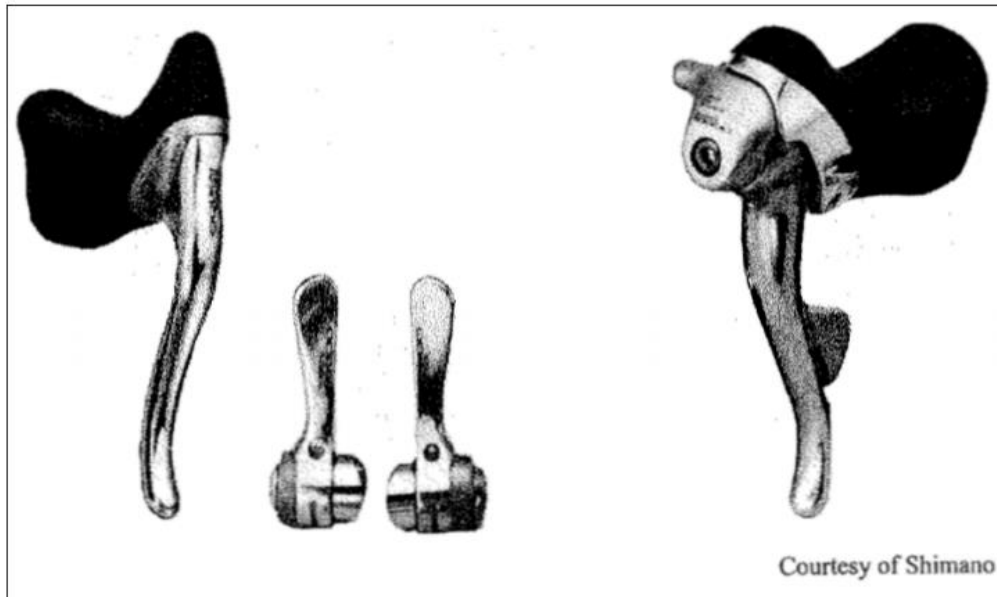
Modulaarisuuden todetaan usein vaikuttavan tuotteen painoon ei-toivotulla tavalla (Hölttä-Otto 2005, 30). Usein paino nousee, koska rakenteessa joudutaan huomioimaan kaikki moduulien rajapintojen vaatimukset ja komponenttien sijoittelussa joudutaan tekemään kompromisseja huomioiden moduulien toiminnallisuus fyysisten rajapintojen mukaan. Modulaarisuus myös vähentää alihankittavien osakokonaisuuksien ja järjestelmien sekä valmistukseen vaikuttavien rajapintojen muokattavuutta jälkikäteen.

Modulaarisen rakenteen suunnittelussa voidaan myös sortua ylisuunnitteluun, joka aiheuttaa lisäkustannuksia rakenteiden monimutkaistuesssa. Tuotteen ominaisuudet ja suorituskyky voivat heiketä modulaarisuuteen tähtäävien kompromissiratkaisujen vaikutuksesta. Joidenkin keveyteen ja pienikokoisuuteen tähtäävien tuotteiden kohdalla integroitu rakenne saattaa näin ollen olla modulaarista rakennetta suotuisampi vaihtoehto. Yleisesti ottaen modulaarinen rakenne ei ole tuotteen suorituskyvyn kannalta optimaalinen vaihtoehto, vaan suorituskyvystä joudutaan mitä todennäköisimmin tinkimään modulaarisuuden vuoksi. (Hölttä-Otto 2005, 31.)

Modulaarisen rakenteen avulla tuotteen ominaisuuksia voidaan muuttaa yksittäisiä toisistaan riippumattomia moduuleja vaihtamalla. Toisaalta modulaarisen järjestelmän rajoitteena on vaikea modulointiperiaatteen muuttaminen jälkikäteen. (Sarinko 1999, 38.) Tarve modulointiperiaatteen muutokseen voi tulla kysymykseen, mikäli modulaarista rakennetta ei osata alun alkaen luoda vastaamaan markkinoiden tarvetta. Tällöin asiakkaita tyydyttäviä tuotevariantteja ei pystytä muodostamaan olemassa olevan moduulirakenteen avulla. Modulaarinen rakennearkkitehtuuri on siis kehitettävä joustavaksi, jotta ennalta arvattavat ja arvaamattomatkin tuotevariantit on muodostettavissa rakennetta muuttamatta.

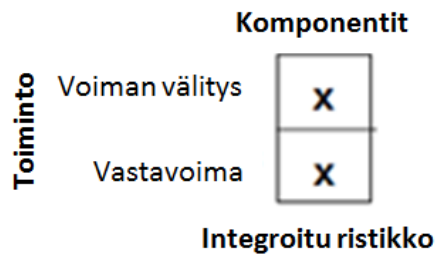
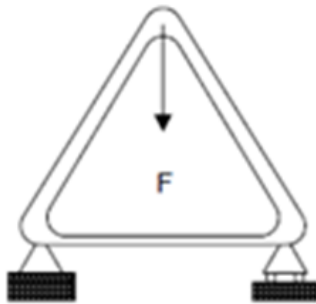
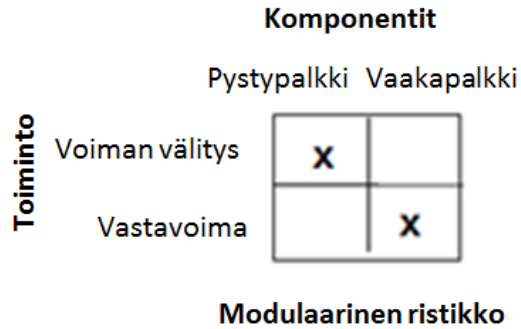
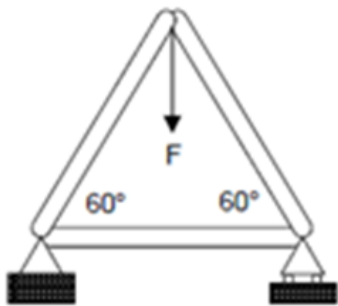
## **2.5 Modulaarinen ja integroitu rakenne**

Modulaarisessa rakenteessa moduuli toteuttaa vain yhtä tai muutamaa toimintoa tuotekokonaisuudessa. Tuotteen variointi mahdollistetaan tuotteen ominaisuuksien ja toimintojen jaottelulla moduulien kesken. Toimintojen ja ominaisuuksien jakoa useamman moduulin välillä vältetään, jotta niiden muuttaminen on mahdollista. Integroidussa rakenteessa toiminnot ja ominaisuudet on hajautettu koko tuotteeseen, jolloin niiden muuttaminen jälkikäteen on vaikeaa. Tämä on yleinen kirjallisuudessa käytetty määritelmä modulaarisen ja integroidun rakenteen eroista. Oheinen kuva (KUVA 3) esittää polkupyörän vaihde- ja jarrukahvaa modulaarisella ja integroidulla rakenteella toteutettuna. Vasemmanpuoleinen kahva on täysin modulaarinen, jossa jarru- ja vaihdekahvat ovat erilliset. Oikean puolisessa kahvassa molemmat toiminnot toteutetaan samalla kahvalla. Modulaarisessa vaihtoehdossa vaihdejärjestelmään tehtävä muutos ei vaikuta jarruihin millään tavalla. Integroidussa vaihtoehdossa muutos vaikuttaa sekä jarruihin että vaihteisiin.



*KUVA 3. Modulaarinen ja integroitu rakenne (Shimano)*

Hölttä-Otto (2005, 31) esittää modulaarisen ja integroidun rakenteen ominaisuuksien eroja yksinkertaisella kuvalla (KUVA 4), jossa kahden kolmiorakenteen päälle on asetettu samansuuruinen kuorma. Toisen kolmion rakenne on modulaarinen ja kolmio koostuu kolmesta samanlaisesta sauvasta. Toinen kolmio on yksiosainen, integroitu rakenne. Molemmissa tapauksissa viistossa olevat kolmion osat kantavat suurimman osan kolmion päälle asetetusta kuormasta vaakasuuntaisen osan ollessa vähemmän kuormitettu. Integroidussa rakenteessa vaakasuuntainen osa on ohennettu, eli sen mitoitus on optimoitu pienemmän kuormituksen mukaisesti. Sen sijaan modulaarisessa rakenteessa vaakasuuntainen osa on ylimitoitettu ja rakenne on painavampi kuin integroidussa rakenteessa. Modulaarisuus siis aikaansaa rakenteen painonnousua. Toisaalta, mikäli kolmiota kuormittava kuorma vaihdetaan painavammaksi tai kuormituksen suuntaa muutetaan, modulaarinen rakenne on helpommin muutettavissa muuttunutta kuormitusta varten. Modulaarisuus siis myös lisää joustavuutta.



KUVA 4. Modulaarinen ja integroitu rakenne (Hölttä-Otto 2005, 31)

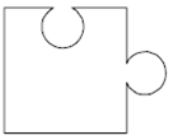
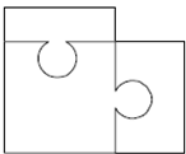
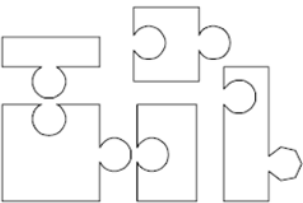
Modulaarista ja integroitua rakennetta voidaan tarkastella myös yleisestä näkökulmasta poiketen, kuten Mikko Jokela tekee artikkelissaan. Jokela (2011, viitattu 11.7.2016) kyseenalaistaa toimintojen ja moduulien yhteen liittämisen, koska tuotteen toiminnallisuudet eivät rajaudu moduulien lukumäärän mukaan. Moduulit yhdessä luovat tuotteelle toiminnallisuutta, jota yksittäisillä moduuleilla ei voi saada aikaan.

Vaikka käsitys modulaarisuudesta on muuttunut aikaa myöden vaikeammin rajattavaksi ja enemmän toimintokeskeiseksi, moduuli on silti pohjimmiltaan fyysinen yksikkö. Yleisellä tasolla näin voidaan ajatella olevan, mutta aineettoman modulaarisuuden merkitys teollisuudessa on kasvanut viime vuosikymmenien aikana merkittävästi. Tämä on seurausta ohjelmistojen kehitymisestä yhä merkittävämpään asemaan useilla teollisuuden aloilla ja moninaisissa tuotteissa. Modulaarisuus on osoittautunut hyvin hyödylliseksi konseptiksi muun muassa ohjelmistokehityksessä. Aikaisemmin ajatellusta poiketen moduulit eivät enää olekaan fyysisiä yksiköitä, joilla on geometriset liitospinnat. Tämä lähestymistapa muuttaa käsityksen modulaarisuudesta, joka onkin rakennuspalikoiden sijaan rakenne itsenäisesti toimivia toiminnallisia yksiköitä. (Miller & Elgård 1998, 1–2.) Kuten aiemmin todettua, tässä työssä ei tarkastella aineetonta modulaarisuutta, mutta käsitteen kehityksen suunnan ymmärtämiseksi kirjoittaja näki tarpeelliseksi sivuta asiaa tässä luvussa.

Miller ja Elgård (1998, 10) määrittävät modulaariselle tuotteelle ominaisiksi piirteiksi seuraavat asiat:

- Modulaarisesta tuotteesta tulee voida tunnistaa eri variaatioita, jotka syntyvät vakioituilla liityntäpinnoilla varustettuja osakokonaisuuksia vaihtelemalla.
- Moduulit ovat tuotteen toiminnan kannalta välttämättömiä itsenäisesti toimivia kokonaisuuksia. Itsenäisesti toimivalla tarkoitetaan, että toiminto on rajattu moduulin sisään ja moduuli on riippumaton muista moduuleista.

Modulaarisuuteen tarvitaan molemmat yllä mainituista piirteistä. Ensimmäinen kohta kuvaa modulaarisen rakenteen tai systeemin ja toinen itse moduulin. Näistä lähtökohdista on helpohkoa havaita, että tuotteen rakenteen tulisi määriytyä modulaarisuuden ohjaamana – ja modulaarisuuden tulisi toimia teknisen rakenteen luomisen periaatteena (KUVA 5). Tuotteen osakokoonpanon vaihdettavuus ja vakioidut liitospinnat eivät kuitenkaan tee osakokoonpanosta automaattisesti moduulia. Mikäli osakokoonpano ei luo tuotteelle oleellista toiminnallisuutta, joka luo lisää tuotevariaatioita, sitä ei tulisi kutsua moduuliksi.

Yhden moduulin näkökulmasta	Yhden tuotteen näkökulmasta	Yhden systeemin näkökulmasta
		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Riippumaton toiminnallinen yksikkö (testattavissa oleva)</b></li> </ul> <p>Ei ole järkevää puhua moduulista, mikäli kyseessä on vain tuotteesta irrotettu osa, jolla ei ole erityistä toiminnallisuutta. Osa on moduuli, kun sillä on toiminnallisuutta ja se on liitetty osaksi järjestelmää.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Riippumaton toiminnallinen yksikkö (testattavissa oleva)</b></li> <li>• <b>Tarkasti määritetyt liitospinnat ja vuorovaikutus</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Riippumaton toiminnallinen yksikkö (testattavissa oleva)</b></li> <li>• <b>Standardoidut liitospinnat ja vuorovaikutus</b></li> <li>• <b>Tuotevarianttien luominen yhdistelemällä</b></li> </ul>

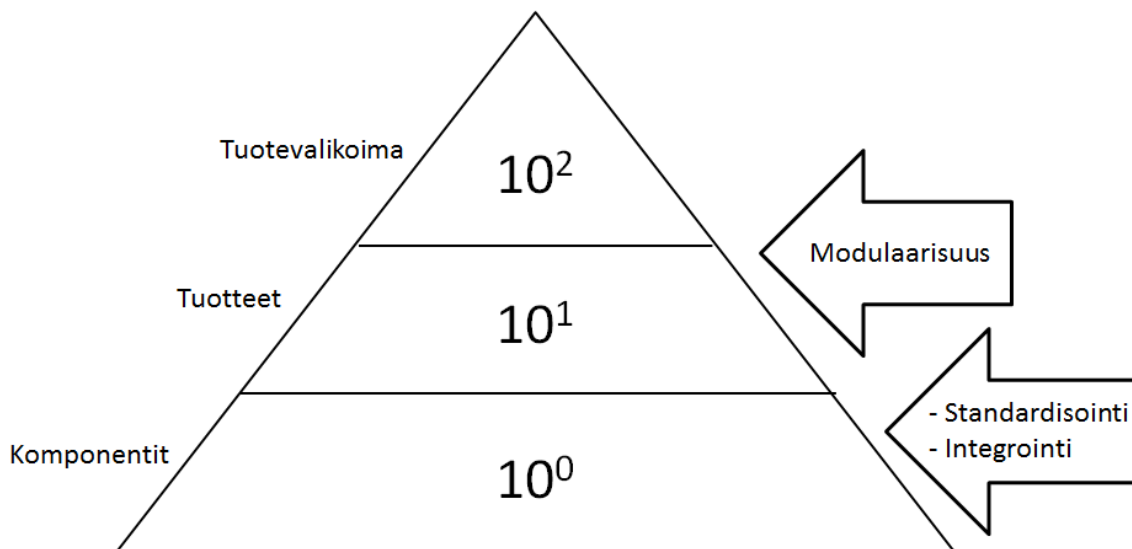
KUVA 5. Modulaarisuus tuotteen ominaispiirteenä (Miller & Elgård 1998,11)



Modulaarisesta rakennearkkitehtuurista poiketen integroitu rakenne koostuu toiminnallisesti toisiinsa liittyvistä järjestelmistä. Integroidussa rakenteessa on tyypillistä, että toiminnot on hajautettu useaan eri osaan tuotteessa ja toimintojen vaikutusta tuotteen eri osiin ei ole määritelty. Integroidun rakenteen omaavan tuotteen ei voida ajatella muodostuvan pienemmistä osakokoonpanoista, vaan sitä on aina käsiteltävä kokonaisuutena. Tuotteen suunnittelu ja kehitys sekä valmistus tapahtuu aina koko tuotteen osalta yhtäaikaisesti. (Sarinko 1999, 33.)

Integroidun rakenteen ominaispiirteinä ovat järjestelmän osien tai komponenttien huono vaihdettavuus, monimutkaiset ja yksilöidyt liitospinnat sekä järjestelmän osien mukauttaminen vain yhteen ja tiettyyn tuotteeseen. Järjestelmät eivät siis ole käytettävissä sellaisenaan muissa tuotteissa. Sen sijaan, että laitteen toiminnoilla ja rakennearkkitehtuurilla olisi yksi yhteen vastaavuus, kuten modulaarisella rakenteella tyypillisesti on, integroidussa rakenteessa laitteen järjestelmillä on useampia toiminnallisuuksia. Esimerkki integroidusta rakennearkkitehtuurista on lentokoneen siipi, jolla on useita toimintoja ja toiminnallisuutta. Siipi muodostaa aerodynaamisen nosteen mahdollistaen lentämisen ja osallistuu lentokoneen ohjaamiseen. Siipi toimii myös moottoreiden kiinnityspisteinä sekä sisältää lentokoneen polttoainetankit. Modulaarisen ja integroidun rakennearkkitehtuurien periaatteellisista eroista johtuen niiden yhdistäminen on vaikeaa. Ne ovat kuin öljy ja vesi, jotka eivät sekoitu keskenään. (Fine 2005, viitattu 12.6.2016.)

Modulaarisen tuotteen kehitys on monimutkainen ja monitahoinen tehtävä. Näin on varsinkin silloin, kun modulaarisuutta pyritään lisäämään johonkin olemassa olevaan tuotteeseen, joka alun alkaen on kehitetty ilman tavoitetta rakenteen modulaarisuudesta. Integroidun rakenteen, jossa tuotteen toiminnot on hajautettu ympäri tuotetta ja rakenteiden välisiä rajapintoja ei ole vakioitu, muuttaminen modulaariseksi on erityisen haasteellista. Tällaisessa tapauksessa modulaarisuus voidaan joutua rajaamaan tuotteen rakennearkkitehtuurin matalammille tasoille ylemmän tason arkkitehtuurin säilyessä integroituna rakenteena. Tällöin modulaarisuuden avulla saavutettavat edut jäävät kuitenkin vähäisiksi. Ericssonin ja Erixonin (1999, 17, viitattu 24.6.2016) mukaan tuotteen rakenne voidaan jaotella kolmeen tasoon, tuotevalikoimaan (ylätaso), tuotteeseen (keskitaso) ja komponenttitasoon (alataso) (KUVA 6). Tuotteen rakenteiden yhdenmukaistamisella saavutettavat hyödyt ovat sitä merkittävämpiä, mitä ylempänä tuotearkkitehtuurissa yhdenmukaistaminen voidaan toteuttaa. Näin ollen tuotteen arkkitehtuurin ylätasoon ratkaisulla luodaan suunta-  
viivat moduloinnin onnistumiselle.



KUVA 6. Modulaarisuus vaikuttaa tuotteiden hallinnan ylempiin tasoihin ja vähentää tuoterakenteen monimutkaisuutta eksponentiaalisesti (Ericsson & Erixon 1999, 18, viitattu 24.6.2016)

Pohjimmiltaan modulaarisessa tuotteessakin moduulien toiminnallisuus voi olla vaikea rajata niin, ettei moduuleista muodostu tuotevarianttikohtaisia moduuleja. Tavoitteena kun tulisi olla yleisesti sopivat moduulit, joita olisi mahdollista käyttää koko tuoteperheessä, eikä vain yhdessä tuotevariantissa. Tällaisissa tilanteissa tulisi harkita, olisiko järkevämpi toteuttaa toisistaan poikkeavat tuotteet, jotka eivät ole modulaarisia. (Miller & Elgård 1998, 14.)

## 2.6 Tuotteen moduloitiedellytykset ja -menetelmät

Joidenkin kirjallisuuden määritelmien mukaan modulaarinen tuote koostuu osakokonaisuuksista, jotka on kytketty toisiinsa vakioitujen liitospintojen avulla. Näin löyhästi määriteltynä lähes kaikki tuotteet ovat jossain määrin modulaarisia. Vain hyvin harvassa tuotteessa on tuotteen toiminnan kannalta oleellisia komponentteja, jotka ovat täysin irrallaan varsinaisesta tuotteesta ilman geometristä tai muuta liityntätapaa. Modulaarisuutta voidaan nähdä siis lähes kaikissa tuotteissa, missä osakokoonpanojen toisiinsa kytkeminen ja mahdollinen uudelleen järjesteleminen on mahdollista. Usein kuitenkin tuotteen toiminta ja ominaisuudet vastaavat paremmin toivottua, kun tietyt osakokonaisuudet kytketään toisiinsa. Osakokonaisuuksien ja toimintojen yhteen kytkeminen ohjaa tuotteen rakennearkkitehtuurin integroitumista ja vähentää mahdollisuutta modulaariseen rakenteeseen. Mikäli tuotteesta on tunnistettavissa osakokonaisuuksia, joiden yhteen liittäminen ei ole tuotteen ominaisuuksien tai toiminnan kannalta välttämätöntä, mutta kuitenkin mah-

dollista, on modulaarinen rakenne todennäköisesti toteutettavissa. Monimutkaisissa tuotteissa osakokonaisuuksien yhteen kytkemistä on vaikeaa välttää tuotteen ominaisuuksien kärsimättä, tämä heikentää modulaarisen rakenteen toteutusmahdollisuutta (Forlingieri 2014, 11).

Kirjallisuudessa tuotteen moduloinnin edellytyksinä pidetään muun muassa seuraavia seikkoja:

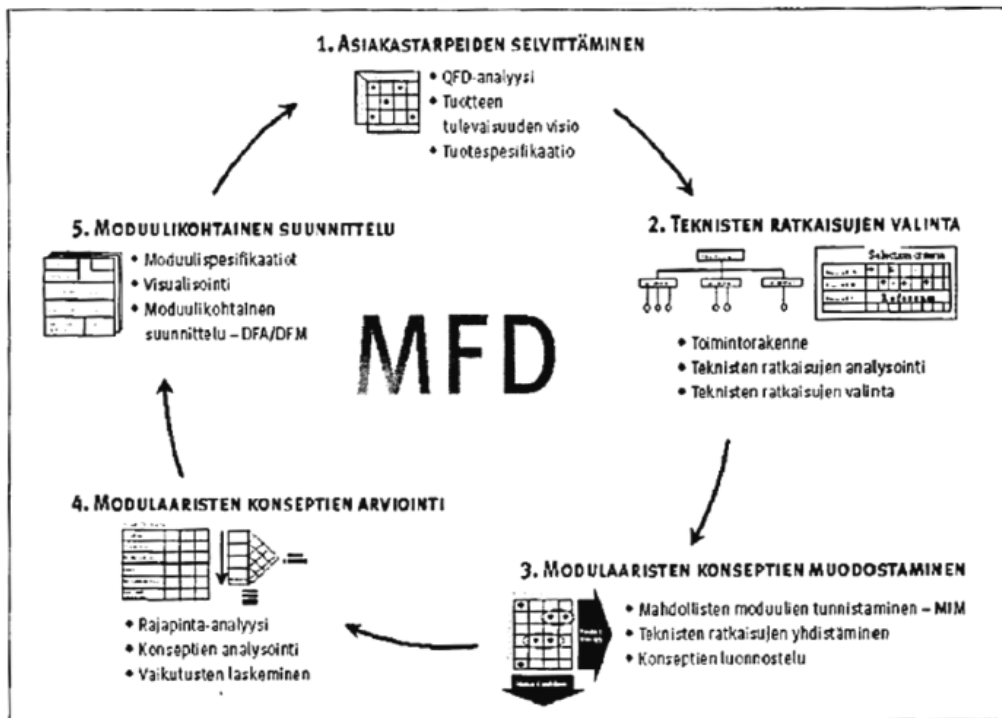
- tarve suureen asiakasohjautuvaan joustavuuteen
- pitkät tuotekehityksen ja tuotannon läpimenoajat
- tuote on elinkaarensa alussa
- riittävä valmistusmäärä
- tuote on toiminnallisesti ja valmistusteknisesti riittävän kypsä
- tuotteen rakenneratkaisut eivät perustu vanhentuvaan tekniikkaan
- tuotteiden rakenteellinen samankaltaisuus on riittävä

Edellytyksien täytyessä ja aloitettaessa modulaarisen tuotteen kehitystä on tärkeää tunnistaa markkinoiden tarpeet ja tehdä vertailua moduloitavan tuotteen ominaisuuksien ja kilpailevien tuotteiden välillä. Yrityksen tulee myös tiedostaa omat ja kumppanuusverkostojensa rajoitteet ja mahdollisuudet modulaarisen tuotteen kehityksessä. Jos tuotteen modulointi arvioidaan kannattavaksi, tulee tuotteen moduulijako ja modulointiperiaatteet selvittää tarkoin. Moduloinnin keskeisiä seikkoja on asiakasvaatimuksien huomioiminen ja yrityksen omien modulointivaatimuksien tunnistaminen, jotka ohjaavat muun muassa moduulien rajapintojen määrittystä. (Sarinko 1999, 39.)

Modulaarisen tuotteen suunnittelua varten on kehitetty erilaisia menetelmiä, joista tunnetuimpana on ehkä MFD -menetelmä (Modular Function Deployment). Kyseessä on modulaaristen tuotteiden ja tuoteperheiden kehitykseen luotu systemaattinen tuotekehitysmenetelmä. Viidestä vaiheesta (KUVA 7) koostuvan menetelmän käytön tavoitteena on löytää moduloitavalle tuotteelle paras mahdollinen rakenne ajatellen tuotteen räätälöitävyyttä ja huomioiden tuotteen hyvä valmistettavuus sekä kokoonpantavuus. Menetelmän vaiheet ovat:

1. Tuotespesifikaation laadinta
2. Tuotteen toimintojen analysointi ja teknisten ratkaisujen valinta
3. Mahdollisten moduulien tunnistaminen - konseptointi

4. Konseptien arviointi
5. Moduulikohtainen suunnittelu ja tuotekehitys (Erixon 1998, 65.)



KUVA 7. Modular Function Deployment, MFD:n vaiheet (Österholm & Tuokko 2001, 18)

Menetelmän vaiheittaisesta esitystavasta riippumatta kaikkien vaiheiden järjestelmällinen läpikäynti ei ole aina tarpeen. Moduloitavan tuotteen kehitystasesta riippuen jotkut vaiheista voidaan ohittaa, etenkin jos tuotteen spesifikaatiota ei ole tarpeen muuttaa. Hyvään lopputulokseen pääsy saattaa kuitenkin vaatia useiden iterointikierrosten läpikäymisen. (Ericsson & Erixon 1999, 31, viitattu 24.6.2016.)

MFD -menetelmän ensimmäisessä vaiheessa keskitytään asiakastarpeiden tunnistamiseen QFD -analyysin (Quality Function Deployment) avulla. Analyysissa asiakkaiden vaatimuksista luodaan tuotteen suunnittelulle lähtötiedot ja tuotteen ominaisuuksia tarkastellaan asiakastarpeita vasten. Ensimmäisen vaiheen painottuessa vahvasti asiakkaan näkökulmaan analyysin toisessa vaiheessa tuotetta tarkastellaan teknisten ratkaisujen ja toimintojen kannalta. Työvaihe sisältää tuotteen toimintoanalyysin, jonka tarkoituksena on saavuttaa riippumattomuus tuotteen eri toimintojen välillä. Riippuvuuksien eli moduulien välisten vuorovaikutusten poistaminen on modulaarisen tuoterakenteen perusedellytys. (Erixon 1998, 66–72.)

Kolmas vaihe keskittyy modulaarisen konseptin luomiseen. Toteutuksessa voidaan käyttää apuna moduulien osoitusmatriisia (MIM, Module Indication Matrix), jossa toisessa vaiheessa valittuja teknisiä ratkaisuja verrataan yrityksen strategiaan perustuviin tekijöihin, eli moduuliajureihin (käsitelty luvussa 2.3). Kolmannen vaiheen päätavoite on tunnistaa rakenteesta mahdollisia moduuliehdokkaita. Tarkoituksena ei ole luoda tuotteen lopullista moduulijakoa, vaan tuloksena voi olla useita modulointikonsepteja. (Erixon 1998, 72–83.)

Neljännessä vaiheessa keskitytään modulointikonseptien arviointiin vastaamalla muun muassa seuraaviin kysymyksiin:

- Mikä uusista konsepteista kannattaa valita?
- Mitä vaikutuksia valitulla konseptilla on tuotekehitykseen ja tuotantoon?
- Kuinka paljon parempi valittu modulaarinen konsepti on verrattuna olemassa olevaan ratkaisuun?

Kysymyksiin vastaaminen vaatii vaikutusten arviointia useasta eri näkökulmasta ja tuotteen koko elinkaaren ajalta. Vaiheen yhtenä oleellisena osana on arvioida liityntäpintojen määrityksen onnistumista tuotteen kokoonpantavuuden kannalta. MFD -menetelmän viidennessä ja viimeisessä vaiheessa seuraa moduulikohtainen suunnittelu, jonka tavoitteena on modulointikonseptin parantaminen moduulitasolla. Vaihe sisältää myös moduulien spesifikaatioiden ja dokumentaation luomisen. (Erixon 1998, 83, 103.) Analyysin toteuttaminen vaatimuksiltaan ja tekniseltä rakenteeltaan monimutkaiselle tuotteelle, kuten raitovaunulle, vaatisi yrityksessä kohtalaisen suuren panostuksen. Analyysiä ei näin ollen hyödynnetty tässä työssä, koska se olisi kasvattanut työn laajuuden tarpeettoman suureksi.

## **2.7 Liitospintojen merkitys modulaarisessa rakenteessa**

Modulaarisen tuotteen kehityksessä moduulien välisten liitospintojen määrittely on yksi tärkeimmistä ja eniten aikaa vievistä työvaiheista. Useat modulaarisuudella saavutettavat edut, kuten mahdollisuus moduulien rinnakkaiseen tuotekehitykseen ja valmistukseen sekä moduulien vaihtokelpoisuus menetetään, mikäli moduulijako ja liitospintojen määrittely epäonnistuu. Vaikka moduloinnilla pyritään vähentämään tuotteen monimutkaisuutta, voivat liitospintoihin liittyvät vaatimuk-

set lisätä rakenteen sisäistä keskinäistä vuorovaikutusta ja riippuvuutta. Näin ollen, usein lopullisen liitospinnan määrittäminen tapahtuu yrityksen ja erehdyksen kautta, vaatiessa useampia suunnittelun iterointikiertoja. (Breidert & Weld 2003, 6.)

Moduulien rinnakkaisen tuotekehityksen mahdollistamiseksi liitospintojen määrittäminen tulisi toteuttaa hyvin aikaisessa tuotekehitysvaiheessa. Tällöin liitospintoihin liittyvät vaatimukset aiheuttavat mahdollisimman vähän muutoksia itse moduuleihin. Liitospintojen konseptitaso määrittämisessä jokaiselle liitospinnalle tulisi löytää olennaiset rajoitteet, kuten esimerkiksi tilantarve, sijainti ja päämitat. Varsinainen liitospinnan yksityiskohtainen suunnittelu toteutetaan yhdistettävien moduulien suunnittelun yhteydessä. Tässä Black Box - lähestymistavassa liitospinnoille varataan niin sanottu ratkaisutila, jota pienennetään moduulien sisäisen rakenteen tarkentuessa. Näin toimimalla liitospinta pyritään irrottamaan varsinaisten moduulien alkuvaiheen suunnittelusta. Liitospinta- ja moduulisuunnittelun täydellinen erottaminen on kuitenkin mahdotonta, koska liitospinta on osa moduulia. Moduuli voidaan vaihtaa liitospintaa muuttamatta, mutta liitospintaa ei voida muuttaa moduulia vaihtamalla. (Blackenfelt & Sellgren 2000, 1–2, viitattu 10.12.2016.)

Tuotteen varioinnin näkökulmasta robustilla liitospinnalla tarkoitetaan liitospintaa, johon voidaan liittää mikä tahansa tuotteen moduuli ja lopputuloksena syntyvä tuote täyttää sille asetetut vaatimukset (Blackenfelt & Sellgren 2000, 2, viitattu 10.12.2016). Liitospinnat tulisi toteuttaa siten, että ne ovat pysyviä myös silloin, kun tuote kehittyy ennalta arvaamattomaan suuntaan. Esimerkiksi kuormaa kantava liitospinta ylimitoitetaan mahdollistaen liitospintaan kohdistuvan kuormituksen kasvattamisen jatkossa tehtävien muutoksien vaatimalla tavalla. Liitospinnan ylimitoittamisella voidaan tarkoittaa montaa muutakin seikkaa, kuten esimerkiksi ylimääräisten tilavarausten jättämisestä tuotteen jatkokehitystä ajatellen.

Tuotteen moduulit tulisi valita siten, että saavutetaan yhteneväisyys toiminnon ja järjestelmän fyysisen rakenteen välillä. Näin minimoidaan moduulien keskinäiset vuorovaikutukset, eli moduulien toimintoja ei ole jaettu muiden moduulien kesken. (Österholm & Tuokko, 2001, 22.) Pimpler ja Eppinger (1994, 3–4) tutkivat työssään monimutkaisen tuotteen pilkkomista pienemmiksi ja helpommin hallittaviksi kokonaisuuksiksi. Työssä esitetään, että tuotteen pilkkomista toiminnallisiin ja fyysisiin elementteihin tulisi seurata liitospintojen vuorovaikutusten määrittäminen ja optimointi. Moduulien väliset vuorovaikutustyyppit he jaottelevat seuraavasti:

- Tilavuorovaikutus määrittää moduulien järjestyksen ja tarpeen vierekkäisyydestä lopputuotteessa
- Energiavuorovaikutus määrittää tarpeen energian siirrosta moduulien välillä
- Informaatiovuorovaikutus määrittää tarpeen informaation siirrosta moduulien välillä
- Materiaalivuorovaikutus määrittää tarpeen moduulien väliseen materiaalin siirtoon

Tuotteesta riippuen rakenteessa voi olla yksi tai useampia vuorovaikutustyyppisiä ja tuotteen toiminnan kannalta jotkut vuorovaikutukset ovat toisia tärkeämpiä. Moduulien liitospintojen vuorovaikutukset jakaantuvat lisäksi toivottuihin ja ei-toivottuihin vaikutuksiin. (Pimmler & Eppinger, 1994, 4.) Esimerkkinä toivotuista vuorovaikutuksesta on lämmönjohtuminen kahden moduulin välillä, jonkin toimilaitteen jäähdytyksen parantamiseksi. Esimerkkinä ei-toivotusta vuorovaikutuksesta käy tärinän välittyminen toimilaitteesta laitteen käyttäjärajapintaan.

Pimmlerin ja Eppingerin (sama) esittämässä menetelmässä vuorovaikutusten määrittämisen jälkeen kukin vuorovaikutus pisteytetään niiden tärkeyden ja toivottavuuden mukaan. Pisteytyksen avulla muodostetaan matriisi, joka kuvaa tuotteen jokaisen moduulin vaikutuksia toisiinsa neljän vuorovaikutustyyppin (tila, energia, informaatio, materiaali) mukaan. Matriisin avulla tuotteen modulaarisen rakenteen hyvyttä ja muutoksien vaikutusta voidaan arvioida ja käyttää tuotteen suunnittelussa. Tässä työssä vuorovaikutusten pisteytyksen periaatetta ei käsitellä syvällisemmin työn laajuuden rajaamiseksi. Liitospintojen määrittämisen ja niiden yksityiskohtaisen suunnittelun valmistuttua liitospintoihin kohdistuvat muutokset tulisi rajata pois. Liitospinnat ovat valmistuttuaan rakenteen pysyvä osa, joka asettaa rajat tuotteen arkkitehtuurille sekä pinnan, johon liittyvät moduulit mukautetaan sopimaan. (Forlingieri 2014, 13.)

Moduulien liitospintojen vuorovaikutuksien määrittämisellä voidaan selvittää millä tavoin moduulit ovat kytkettyinä toisiinsa. Puhutaan väljästi ja tiukasti kytketyistä moduuleista. Väljästi kytketyn rakenteen tunnuspiirteenä on, että moduulien välillä ei ole tuotteen toiminnan kannalta merkittäviä riippuvuuksia. Tiukasti kytketyssä rakenteessa moduulien välillä on riippuvuuksia, joilla on keskeinen merkitys tuotteen toiminnassa. Modulaarisen rakenteen luomisen perusajatuksena on muodostaa mahdollisimman väljästi toisiinsa vakioitujen liitospintojen välityksessä liittyviä moduuleja. Tällöin tuotetta on helppo varioida moduuleja valikoimalla moduulien sopiessa toisiinsa riippumatta niiden toiminnoista. (Sanchez & Mahoney 1996, 65.)

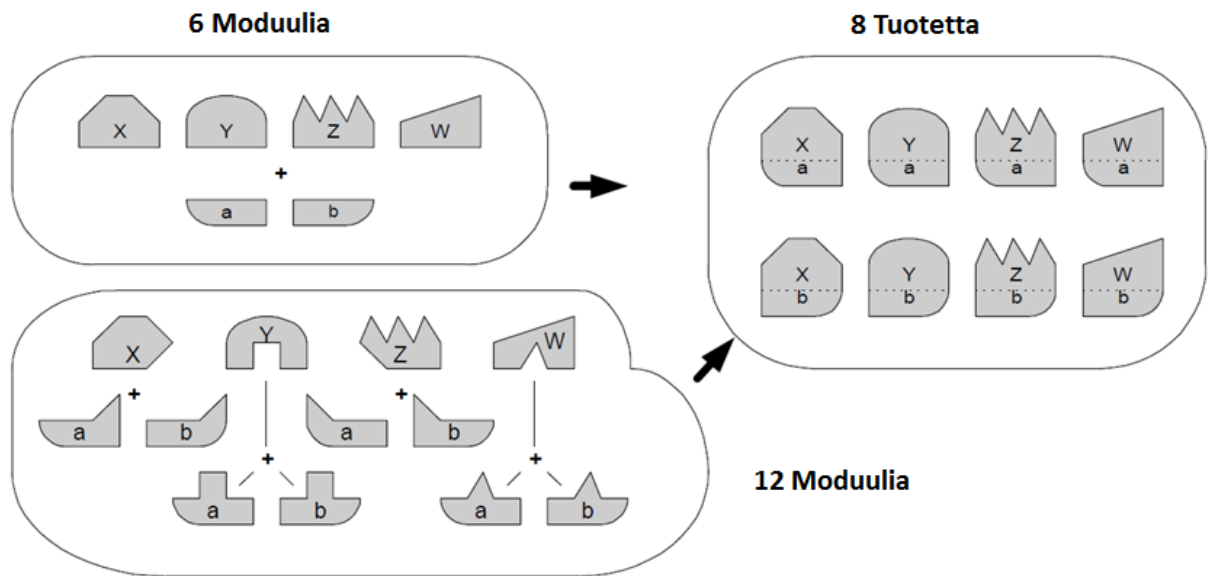
Kuten todettua modulaarinen rakenne asettaa vaatimuksia moduulien vaihdettavuudelle ja liitospintojen yhteensopivuudelle. Moduulit ovat vaihdettavissa ainoastaan, mikäli niiden liitospinnat ovat yhteneväiset toisten moduulien liitospintojen kanssa. Legopalikka toimii hyvänä esimerkkinä toimivasta liitospinnan toteutuksesta. Laitteiden ja koneiden rakenteissa tosin hyvin harvoin päästään yhtä yksinkertaisiin liitospintaratkaisuihin rakenteiden ollessa monimutkaisempia. Lisäksi liitospinnalle ja liitokselle on usein asetettu vaatimuksina myös tiettyjä ominaisuuksia, kuten lujuus, joustavuus tai säädettävyys. Usein laitteen rakenne rajoittaa liitokselle käytettävissä olevaa tilaa ja liitos tulee olla saavutettavissa laitteen kokoonpanon eri vaiheissa. Liitoksen saavutettavuus on huomioitava myös valmiissa tuotteessa laitteen kunnossapidon ja huollettavuuden varmistamiseksi.

Miller ja Elgård (1998, 14) määrittelevät yleisimmin kone- ja laiterakennuksessa esiintyvät liitospinnat seuraavasti:

- toiminnalliset rajapinnat, jotka määrittyvät moduulien toiminnallisuuden mukaan
- mekaaniset rajapinnat, kuten kierre- tai hitsatut liitokset
- sähköiset rajapinnat, kuten signaali- tai syöttökaapeleiden liitokset

Moduulien välisten liitospintojen määrittämisessä on keskeistä tunnistaa tuotteen rakenteen ja toiminnan kannalta olennaiset tekijät. Insinöörimäinen lähestymistapa ohjaa liitospintojen määrittäystä teknisen toteutettavuuden ja rajoitteiden pohjalta, kun taas valmistuksen ja markkinalähtöisyyden kannalta muut seikat voivat olla merkityksellisiä. Liitospintojen merkitystä modulaarisessa rakenteessa havainnollistetaan oheisella kuvalla (KUVA 8). Kuvassa on esitetty kuinka kahdeksasta tuotteesta koostuva tuoteperhe voidaan luoda joko 6 tai 12 moduulin avulla riippuen moduulien liitospintojen keskinäisestä yhteensopivuudesta. Modulaarisen tuotteen kehitys vaatii vahvaa koordinoitua ja ohjausta, jotta lopputuloksena on minimimäärä erilaisia moduuleita tuotevarianttien määrän siinä kärsimättä. (Miller & Elgård 1998, 14.)





KUVA 8. Liitospintojen ja keskinäisten vaikutusten suunnittelulla sekä toimintojen rajaamisella on suuri vaikutus tarvittavien moduulien määrään. (Miller & Elgård, 1998, 14)

## 3 TUOTEALUSTA JA TUOTEPERHE

### 3.1 Tuotealustan ja tuoteperheen määrittely

Alati kiristynvä kilpailu, globalisaatio, tuotteiden monimutkaistuminen ja asiakkaiden kasvavat vaatimukset tuotteiden räätälöinnistä pakottavat teollisuusyrityksiä ajattelemaan asiakaslähtöisesti ja samanaikaisesti parantamaan toimintojensa kustannustehokkuutta. Yksittäinen tuote harvoin aikaansaa pitkäaikaista menestystä ja ylläpitää yrityksen kilpailukykyä pitkällä aikajänteellä. Toisaalta useamman rinnakkaisen ja toisistaan merkittävästi erottuvan tuotteen ympärille on usein vaikea rakentaa liiketoimintaa kannattavasti. Yrityksen kilpailukyky muodostuu sen kyvystä tuottaa kannattavasti tuotteita, jotka vastaavat mahdollisimman kattavasti yrityksen valitsemien asiakasryhmien tarpeita. Jokaiselle asiakkaalle erikseen kehitettävän ja valmistettavan tuotteen sijaan on järkevämpää kehittää samankaltaisista tuotteista muodostettu tuoteperhe. Tuoteperheen syntyä edesauttaa vakiintunut tuotealusta, josta luodaan halutunkaltaisia variantteja modulaarisen rakenteen avulla. Tuotealustan ja sille perustuvan tuoteperheen kehityksen nähdään kuitenkin usein olevan liian monimutkaista ja se pitää sisällään riskin epäonnistumisesta, minkä vuoksi yrityksen on helpompaa keskittyä yksittäisen tuotteen kehitykseen. (Ohvanainen & Hietikko 2011, 181.) Peruste modulaarisen tuotteen kehittämiseksi on usein tarve luoda tuoteperhe, joka mahdollistaa kaupallisen valikoiman laajentamisen matalammin tuotekehitys-, valmistus- ja huoltokustannuksin. Kustannusetua saavutetaan tuotteiden ja menetelmien yhtenäistämisen ja ratkaisuiden uudelleenikäytön avulla.

Mikko Jokela (2011, viitattu 11.7.2016) määrittelee tuoteperheen seuraavasti: Tuoteperhe koostuu samankaltaisista ja samasta tuotealustasta johdetuista tuotteista, joilla jokaisella on yksilöllinen erityiseen asiakasvaatimukseen perustuva toiminnallisuus. Näitä tuoteperheestä johdettuja yksittäisiä tuotteita kutsutaan tuotevarianteiksi. Tuoteperhe kohdistetaan tietylle markkinasegmentille ja sen jokainen tuotevariantti on kohdistettu markkinasegmentissä määritetyn asiakastarpeen mukaisesti. Tuoteperhe on siis joukko tuotevariantteja, jotka koostuvat yhteisistä rakenteista ja tuoteteknologioista. Tämän määrittelyn mukaan tuoteperhe ja modulaarinen tuote liittyvät toisiinsa hyvin vahvasti. Tuotteen modulaarinen rakenne mahdollistaa tuotevarianttien eriyttämisen asiakastarpeiden mukaisesti ilman, että tuotteen perusrakennetta (tuotealustaa) tarvitsee muuttaa.

Ohvanainen ja Hietikko (2011, 182) linjaavat artikkelissaan tuoteperhekäsitteen hyvin samansuuntaisesti. Tuoteperhe muodostuu yhteiseen tuotealustaan pohjautuvista teknisesti toisiinsa liittyvistä, mutta tietyin eroavaisuuksin varustetuista tuotteista, tuotevarianteista, jotka on kohdennettu tietyille markkinasegmenteille. Jokaisella tuoteperheen muodostavalla tuotevariantilla on yksilöllinen arkkitehtuuri ja tuoteperheajattelun tavoitteena on yhtenäistää tämä arkkitehtuuri läpi koko tuoteperheen. Lehtosen (2007, 81–82) mukaan tuotealustalla voidaan tarkoittaa myös tuotteen rakenteen systemaattista vakiointia, joka onnistuneesti määritettynä mahdollistaa asiakaslähtöisen tuotteiden varioinnin, eli tuotekonfiguroinnin. Tällöin tuotteen räätälöinti perustuu valmiisiin rakenneosiin ja olemassa olevaan tuotteen rakennearkkitehtuuriin. Varsinaista tuotteen konfigurointia käsitellään luvussa 3.5.

Yrityksen eri toiminnoissa käsitteitä tuotealusta- ja tuoteperhe voidaan tulkita eri tavoin. Myynnin ja markkinoinnin näkökulmasta tuoteperheen jäsenillä on moninaisia toiminnallisuuksia, jotka on kohdennettu tietyille asiakasryhmille. Suunnittelun ja tuotekehityksen näkökulmasta eri tuoteperheen jäsenet sisältävät erilaisia tuoteteknologioita ja valmistukseen liittyviä tekijöitä. Näin ollen tuoteperhe liittyy suunnitteluparametreihin, tuotteissa käytettyihin komponentteihin ja kokoonpanorakenteeseen. (Jianxin, Simpson & Siddique 2007, 7, viitattu 2.7.2016.) Tuotealustaan perustuvan tuotteen kehityksessä tulisi tähdätä täydellisen tuotteen suunnittelun sijaan strategisesti joustavaan tuotteeseen, joka mahdollistaisi uusien tuotevariaatioiden aikaansaamisen oleellisesti varsinaista tuotetta muuttamatta. Valittu tuotteen rakennearkkitehtuuri lopulta määrittää, kuinka tuotetta voidaan varioida vaatimuksien muuttuessa tuotealustan elinkaaren aikana. (Ericsson & Erixon 1999, 13, viitattu 24.6.2016.)

Vaikka tuotealusta yhdistetään usein modulaariseen tuotteeseen, tuotealusta ei kuitenkaan välttämättä perustu moduuleihin. Yksinkertaistettuna tuotealusta voi olla joukko elementtejä, jotka muodostavat tuotteen perusrungon, tällöin tarkoitetaan komponentteihin perustuvaa tuotealustaa. Kehittyneempi versio tuotealustasta koostuu toiminnallisista moduuleista. (Lehtonen 2007, 80.) Tuotealusta on siis ryhmä rakenneosia, komponentteja tai kokoonpanoja, jotka ovat yhteisiä kaikille tuoteperheen jäsenille. Luotaessa tuotealustaa yrityksen tuotekehityksessä on tunnistettava ja valittava mitkä tuotteen osat, rakenteet ja toiminnot ovat osana tuotealustaa ja miten ne ovat vuorovaikutuksessa toisiinsa. Tämä tarkoittaa valintaa modulaarisen ja integroidun rakenteen välillä. (Blecker & Friedrich 2007, 7.) Säilynojan (2014, 41) mukaan tuotealusta määritetään kirjallisuudessa muun muassa seuraavalla tavalla:

- ryhmä yleisiä osia, moduuleja tai komponentteja, joista johdetaan tuotteita, jotta ne on mahdollisimman helppo suunnitella ja tuottaa tehokkaasti
- kokoelma komponenttien ja prosessien ominaisuuksia, jotka on jaettu tuotejoukkojen perusteella

Kirjallisuudesta löytyy myös toisistaan poikkeavia näkemyksiä tuotealustasta. Joidenkin lähteiden mukaan tuotealusta on sarja moduuleja, joista tuotevariantit johdetaan. Toisen näkemyksen mukaan tuotealusta on pysyvä osa tuotetta, jonka varaan koko tuoteperhe rakennetaan. Jälkimmäinen periaate on tuttu autoteollisuudesta, jossa eri automallit rakennetaan yhteisille pohjalevyille. Periaate asettaa tiukat rajat tuotteen rakennearkkitehtuurille vaatien modulaarisuutta ja rakenteiden yhtenäistämistä tuotevarianttien välillä. (Blecker & Friedrich 2007, 7.) Autoteollisuudesta löytyy myös esimerkkejä, miten tuotealustat voivat poiketa toisistaan valmistajasta riippuen. Toiselle valmistajalle tuotealusta tarkoittaa pohjalevyä, joka määrittää valtaosan autossa käytettävistä komponenteista. Kun taas toisen valmistajan tuotealusta koostuu eri automalleissa käytettyjen yhteisten komponenttien, kuten moottoreiden, jousituksen tai vaihteiston avulla. (Espada ym. 2004, 3.) Esitetyistä erilaisista näkemyksistä huolimatta tuotealustan peruseriaatteena on tasapainoilla tuoteperheen teknisen samankaltaistamisen ja ominaisuuksien erilaistamisen (asiakas-tarpeet) välillä. Ajatustasolla tuotealusta on prosessi, jossa tunnistetaan tuotetarjonnan ja kohde-markkinoiden samankaltaisuuksia, joiden avulla luodaan uutta tuotetarjontaa (Forlingieri 2014, 5).

Tuotealustat ja tuoteperheet ovat esillä myös raitiovaunuteollisuudessa. Usealta valmistajalta löytyy jonkinasteiseen tuotealustaan perustuva vaunutuoteperhe. Tuotealustaan perustuvan modulaarisen rakenteen avulla voidaan kustannustehokkaasti luoda asiakastarpeet täyttävä raitiovaunuvariantti. Yhteistä kaikille selkeästi tuotealustaan perustuville vaunuille on suurehko valmistusmäärät. Suuri tuotantomäärä on luonnollisesti auttanut valmistajia hyväksymään modulaarisen tuotteen kehityksestä aiheutuneet projektituotteen kehitystä suuremmat kustannukset. Toisaalta tuotantomäärien kasvu ja tarve tuotannon tehostamiselle on epäilemättä toiminut myös yhtenä oleellisena ajurina tuotealustaan pohjautuvan tuotteen kehittämiseksi.

### **3.2 Varioitavuus tuoteperheessä**

Kuten todettua modulointi yhdistetään usein tuotteen variointiin, sillä modulaarinen rakenne edesauttaa tuotteen varioimista. Tuotetta varioidessa ei ole kannattavaa tarjota asiakkaalle mahdollisimman suurta tuotevarianttien määrää, koska tarpeeton variointi luo tarpeetonta kustannusta ja on siten kannattamatonta yritykselle. Asiakas on kiinnostunut varioinnin lopputuloksena syntyvästä tuotteesta, ei itse varioinnista. Tuotteen täytyy vastata asiakkaan toiveita ja vaatimuksia. (Sarinko 1999, 33.)

Kirjallisuudessa tuotteen variointi jaetaan ulkoiseen ja sisäiseen variointiin. Asiakas osallistuu tuotteen ulkoiseen variointiin valitsemalla parhaiten omaa tarvettaan vastaavan tuotevariantin. Sisäisellä varioinnilla tarkoitetaan yrityksen sisällä tapahtuvaa, asiakkaalle näkymätöntä variointia, näitä ovat muun muassa valmistukseen ja logistiikkaan liittyvät seikat. Ulkoinen variointi jakaantuu hyödylliseen ja hyödyttömään variointiin. Hyödyllinen variointi on asiakkaalle lisäarvoa luovaa toimintaa, mahdollistaen asiakkaan haluaman tuotteen aikaansaamisen. Tarpeettomat ja liian samankaltaiset variantit, jotka eivät luo lisäarvoa tuotteelle, ovat hyödyttömiä variointia. Sisäistä variointia pidetään aina hyödyttömänä variointina, koska se ei luo lisäarvoa asiakkaalle. Yleisen näkemyksen mukaan yrityksen tulisikin varioida tuotettaan vain ulkoisesti ja hyödyllisesti.

Tuotealusta, eli tuotteen yhteinen perusyksikkö, on valittava siten, että se mahdollistaa jokaisen asiakastarpeen mukaisen tuotevariantin valmistamisen. Tuotteen kehittämisen ja valmistamisen kannalta on edullista, että eri variantit ovat valmistettaessa mahdollisimman pitkään yhteneväiset ja varianttien väliset asiakaskohtaiset moduulit liitetään tuotteeseen mahdollisimman myöhäisessä valmistusvaiheessa. (Sarinko 1999, 41.) Myöhäinen tuotevarianttien eriyttäminen valmistettaessa johtaa samojen rakenteiden ja komponenttien käyttöön madaltaen tuotteen kehitys-, valmistus- ja materiaalikustannuksia.

### **3.3 Tuotealustan ja tuoteperheen kehitys**

Tuotealustan ja tuoteperheen kehittäminen on aikaa vievä prosessi, joka edellyttää hyvin usein yrityksen resurssien uudelleen organisointia ja uuden osaamisen kehittämistä (Ohvanainen & Hietikko 2011, 183). Prosessi vaatii yrityksen tuotekehityksen ja hankinnan tiivistä yhteistyötä,

lisäpanostuksia suunnittelutoiminnan ohjaamiseen sekä selkeää käsitystä markkinoiden tuotteelle asettamista vaatimuksista. Liiketoiminnalliset tavoitteet ja tuotestrategia toimivat tuotealustan kehityksen lähtötietoina, joten niiden tulee olla selvillä yrityksen tuotekehityksessä. Onnistuminen markkinoilla ei perustu pelkästään tuotteen tekniseen suorituskykyyn vaan myös toimittajaverkoston osaamiseen ja kilpailukykyyn. Näin ollen tuotesuunnittelun ja hankinnan vuorovaikutteinen toiminta on ensiarvoisen tärkeää parhaiden vaihtoehtojen löytämiseksi. (Espada ym. 2004, 4.) Tuotealustan kehittämisessä on kyse yrityksen johdon strategisesta päätöksestä ja halusta luoda tuoteperhe. Painopistealueiden muuttaminen yrityksen eri toiminnoissa ja työntekijöiden sekä toimittajaverkoston osallistaminen ovat välttämättömiä toimia, joihin yritysjohdon tulisi sitoutua. Tuotealusta toimii tuotestrategian pohjana, koska se määrittää tuotteen kustannusrakenteen, kilpailukykyyn ja varioitavuuden. Investoinnin kannattavuus riippuu lopulta markkinoiden laajuudesta ja samankaltaisten tuotteiden valmistusmääristä. (Ohvanainen & Hietikko 2011, 183.)

Säilynojan (2014, 48) mukaan modulaariseen rakenteeseen perustuvan tuotealustan ja siitä johdetun tuoteperheen kehitys voidaan toteuttaa kahdella eri lähestymistavalla, joko ylhäältä alas tai alhaalta ylös. Ensin mainitussa tuoteperhe luodaan ”tyhjälle paperille” kaikkien tuoteperheen jäsenten rakentuessa samalle tuotealustalle. Alhaalta ylöspäin tapahtuvassa tuoteperheen suunnittelussa olemassa olevan tuotteen rakenteesta pyritään tunnistamaan rakenneosat tai komponentit, jotka soveltuvat tuotealustoiksi tai sellaisiksi kehitettäväksi. Jälkimmäisessä toimintatavassa suunnittelulla on mahdollista saavuttaa etuja vain tuoterakenteen komponenttien optimoinnissa. Ylhäältä alaspäin tapahtuva suunnittelu mahdollistaa tuoterakenteen kehittämisen siten, että kaikki tuotealustan mukanaan tuomat edut voidaan hyödyntää. Kompleksisten tuotteiden kohdalla tuoteperheen suunnittelu joudutaan usein kuitenkin toteuttamaan alhaalta ylöspäin. Tähän voi olla syynä esimerkiksi vajavainen näkemys tuotteen kehityksen suunnasta. Toisena mahdollisena tekijänä on riittävän osaamisen ja kypsyyden rakentuminen yrityksen organisaatiossa vasta ensimmäisen tuotteen kehityksen aikana.

Tuotealustan suunnittelu ei yleensä tapahdu asiakkaan tekemän tilauksen perusteella, vaan erillisenä tuotekehityshankkeena. Alustan kehitys tulisi nähdä varautumisena tulevaan ja etukäteen tehtynä investointina, jonka kustannukset jakautuvat useamman tuotteen kesken. Tuotealustan kehityskustannuksia tulisikin näin ollen pitää tuoteperheen jäsenten elinkaarikustannuksina. Kehitysinvestointi ei kohdistu yhteen tiettyyn tuotteeseen vaan koko tuoteperheeseen, joka käsittää kaikki tiettyyn tuotekonseptiin perustuvat tuotevariantit. Tietyn tuoteperheen moduulit voidaan jaotella perus- ja valinnaisiin moduuleihin sen perusteella, miten moduuleja tuotteissa käytetään.

Perusmoduuli on tuotteen osa, jota käytetään jokaisessa valmistettavassa tuotteessa. Valinnaisia moduuleja ovat moduulit, jotka voidaan jättää pois tuotteen toiminnallisuuden kärsimättä. Perusmoduulit muodostavat tuotealustan, joka on kaikkien tuoteperheen tuotteiden yhteistä perusrakennetta. (Säilynoja 2014, 41–42.)

Eri kirjallisuuslähteiden mukaan tuotteen perusmoduulien ja niistä syntyvän tuotealustan kehitykseen tulee kiinnittää erityistä huomiota. Tuoteperheen elinkaari on riippuvainen tuotealustan toimivuudesta ja tuotealustaan kohdistuvien muutoksien toteuttaminen on kallista ja vaikeaa. Säilynoja (2014, 41–42) jatkaa: perusmoduulien tulee olla pitkäikäisiä ja standardoituja, jotta niiden valmistuksessa voidaan saavuttaa volyyymi- ja vakiointihyötyjä. Ericsson ja Erixon (1999, 20, 24, viitattu 24.6.2016) kirjoittavat työssään kantajamoduuleista (carryover) ja yhteisistä moduuleista (common unit), joilla tarkoitetaan tuotteen pysyvää osaa. Tarkemmin ottaen kantajamoduuli on tuotteen osa, johon ei todennäköisesti tule kohdistumaan muutostarpeita koko tuotealustan elinkaaren aikana. Yhteisellä moduulilla vastaavasti tarkoitetaan moduulia, joka soveltuu käytettäväksi kaikissa tuotteen varianteissa. Valinnaisten moduulien kohdalla olennainen tekijä on lopun asti mietityt liitospinnat tuotealustan ja moduulien välillä. Niiden avulla tuotealustaan voidaan myös jälkikäteen kehittää moduuleja, jotka paremmin vastaavat muuttuvaan asiakastarpeeseen, ilman tarvetta tuotealustan tai -perheen uudelleen kehittämiseksi. Asiakaskohtainen, tuotekehitystä ja suunnittelua vaativa räätälöinti on mielekästä kohdistaa valinnaisiin moduuleihin jo tuotteen kehitysvaiheessa, jotta vältetään tuotealustaan kohdistuvalta asiakaskohtaiselta muunteulta. (Säilynoja 2014, 42.)

Espada ym. (2004, 5) ennustavat modulaaristen tuotealustojen lisääntyvän entisestään kiskokalustotuotteissa. Tuotealustalähtöinen lähestymistapa, jossa toimittajaverkosto osallistuu kokonaisvaltaisesti tuotteiden kehitykseen, on osoittautunut toimivaksi autoteollisuudessa ja esimerkki antaa suuntaa myös kiskokalustoteollisuuden kehitykselle. Modulaarisiin tuotealustoihin perustuvat tuotestrategiat tulevat lähitulevaisuudessa muuttamaan merkittävästi kiskokalustotuotteiden suunnittelua ja valmistusta. Toimittajien kohdalla kehitys johtaa entistä tiiviimpään erikoistumiseen kapealle tuotesektorille. Kalustovalmistajan näkökulmasta kehitys mahdollistaa merkittävän tuotannon tehostuksen standardoinnin ja toistettavuuden ansiosta.

### 3.4 Esimerkkitapaus Bombardier Flexity2-tuotealusta

Forlingieri tutkii työssään Bombardierin valmistamien kiskokalustotuotteiden tuotealustojen kehittämistä useamman tuotteen osalta. Hän taustoittaa tuotealustojen kehitystä kertomalla tuotteista, niiden kehitysvaiheista ja muuttuvista vaatimuksista projektien välillä. Vaatimuksista mainitaan erityisesti eri maiden toisistaan poikkeavat kalustostandardit ja määräykset, jotka tekevät tuotealustan kehityksen erityisen vaativaksi juuri kiskokaluston kohdalla verrattaessa sitä esimerkiksi autoteollisuuteen.

Yhtenä työn tarkastelukohteena on Bombardier Flexity2-raitiovaunuperheen tuotealusta. Alustan kehityksen lähtökohtana on Forlingierin (2014, 64) mukaan ollut valmistajan halu kehittää suuri joukko vaihtoehtoisia ja tuotealustaan yhteensopivia moduuleja varmistamaan tuotteen räätälöitävyyden lisäksi hyvä tuotevarianttien hallinta. Valmistaja on tähdännyt laajaan räätälöitävyyteen, jotta kehitystyön lopputuloksena olisi yleispätevä tuote vastaamaan eri markkinasegmenttien vaatimuksiin. Tuotealusta perustuu muutamaaan perusmoduuliin ja 80 – 90 kappaleeseen vaihtoehtoisia moduuleja. Tuotealustan käytöllä on myös pyritty tuotekehityskulujen pienentämiseen ratkaisujen uudelleen hyödyntämisen kautta, sekä materiaalikustannusten pienentämiseen komponenttitason kappalemääriä kasvattamalla. Työn julkinen versio ei esittele modulaarisen rakenteen yksityiskohtia, mutta Forlingieri (2014, 64) mainitsee käytettyjen ratkaisujen perustuvan fyysiseseen modulaarisuuteen. Kirjoittaja olettaa tällä tarkoitettavan moduulien liitospintojen tiukkaa yhtenäistämistä ja myös erityistä tilankäytön huomioimista rakenteiden ja järjestelmien suunnittelussa.

Forlingierin (2014, 71) mukaan eri kaupungeille valmistettavat vaunut ovat aina joiltain osin erilaisia. Tämä aiheuttaa valmistajalle merkittäviä ongelmia, mikäli rakennearkkitehtuuria ei ole hallinnoitu asianmukaisesti aina komponenttitasolle asti. Eri viranomaisten vaatimilla kaluston hyväksyttämismenettelyillä on myös merkittävä rooli samalle tuotealustalle pohjautuvien varianttien kehitykseen.

Flexity2-tuotealustan kehityksen tavoitteena oli luoda alusta, joka tukee useiden tuotevarianttien valmistusta mahdollisimman vähin tuote- tai kustannusriskein. Riskien pienentämiseksi modulaarisuuden tuli mahdollistaa laajamittainen ennalta suunniteltujen moduulien käyttö, niiden vaihdettavuus ja myös testaaminen ennen kokoonpanoa. Tuotekehitystyön helpottamiseksi ja olemassa olevan tuotteen kehityksessä kertyneen kokemuksen hyödyntämiseksi tuotealusta on luotu ole-



massa olevien rakenteiden uudelleensuunnittelulla ja optimoinnilla. Liitospintojen vähentäminen ja niiden standardoiminen on vaatinut merkittäviä tuotekehitysponnisteluja, joiden Forlingieri (2014, 65) toteaa kuitenkin osoittautuneen kannattaviksi. Tuotealustan kehitystä seuranneissa projekteissa asiakasvaatimuksien erilaisuudet on pystytty toteuttamaan hyvin maltillisilla projekti-kohtaisilla kehityskustannuksilla.

Keskeisinä edellytyksinä tuotealustan menestykselle kehitykselle mainitaan onnistunut suunnittelu ja sopivan liiketoimintamallin luominen tuotealustan ympärille. Varsinaisen kehitystyön ensimmäinen vaihe keskittyi asiakasvaatimusten ja standardien mukaiseen markkinasegmentointiin ja kilpailevien tuotteiden analysointiin. Toisen vaiheen aiheena olivat materiaalikustannukset. Työvaiheessa asetettiin hintatavoitteet järjestelmille ja joissain tapauksissa tavoite asetettiin aina komponenttitasolle asti. Kustannustason määrittämisessä vertailumateriaalina käytettiin kahden aiemman raitiovaununprojektin toteutuneita materiaalikustannuksia ja alhaisempiin kustannuksiin pyrittiin komponenttien uudelleensuunnittelun avulla. Kehitystyön viimeinen vaihe keskittyi tuotearkkitehtuurin suunnitteluun, jossa eri suunnittelualueista vastanneiden suunnittelu- ja hankintatiimien yhteisenä päämääränä oli liitospintojen vakioiminen asetetun kustannustavoiteeraamin sisällä. Tässä vaiheessa rakenteesta tunnistettiin komponentteja ja järjestelmiä, joiden kohdalla asiakasvaatimuksissa oli useimmiten poikkeamia. Näistä tuotteen osista luotiin vaihtoehtoisia ratkaisumalleja eli moduuleja. (Forlingieri 2014, 65.)

Forlingieri (2014, 66) pitää järjestelmätoimittajien roolia merkittävänä tekijänä tuotealustan kehityksessä. Tuotteen vakiona pidettävän ”jäädetytyn” osuuden osalta olisi suositeltavaa käyttää vain strategisia toimittajia ja välttää riskejä hakemalla useita vaihtoehtoisia toimittajia kriittisille komponenteille. Toimittajien sitouttaminen vakioituihin liitospintoihin mahdollistaa toimittajan vaihdon mahdollisissa ongelmatilanteissa, mutta toisaalta sen todetaan myös usein nostavan hankittavan järjestelmän hintaa. Näin ollen järjestelmätason liitospintojen vakionnilla saavutetun hyödyn todellista kustannusvaikutusta olisi tarkasteltava määräajoin.

### **3.5 Tuotteen konfiguroitavuus**

Modulaarisuuteen yhdistetään usein tuotteen konfiguroitavuus. Konfiguroitavalla tuotteella tarkoitetaan ryhmää tuotteita, jotka saadaan aikaan yhdistelemällä ennalta määritettyjä osakokonai-

suuksia toisiinsa asiakastarpeita vastaavalla tavalla, eli muodostamalla tuotevariantteja (Sarinko 1999, 24). Tuotteen moduloinnin voidaan ajatella olevan yrityksen sisällä tapahtuvaa toimintaa, kun taas konfigurointi on moduloinnin mahdollistamaa yrityksen ja asiakkaan välillä tapahtuvaa toimintaa. Toisaalta kirjallisuudesta löytyy myös esimerkkejä, joissa modulaarisuutta pidetään vain yhtenä keinona toteuttaa tuotteen konfiguroitavuus. Vaihtoehtona modulaarisen tuotteen konfiguroinnille pidetään tällöin integroidun tuotteen parametrissa konfiguroitavuutta (Säilynoja 2014, 31). Konfiguroitavasta tuotteesta voidaan tunnistaa seuraavia piirteitä:

- tuotekysilö on muodostettu tilauskohtaisesti asiakasvaatimusten mukaan
- tuotekysilö on suunniteltu täyttämään joukko samankaltaisia asiakastarpeita
- jokainen tuotekysilö on yhdistelmä ennalta määritettyjä osakokonaisuuksia, ilman tarvetta lisäsuunnittelulle tilaus-toimitusprosessin aikana
- tuotekysilöt ovat osa ennalta suunniteltua tuoteryhmää

Konfiguroitavalle tuotteelle on tyypillistä, että sitä ei suunnitella täyttämään kaikkia asiakkaan vaatimuksia. Tavoitteena on kompromissiratkaisu, joka huomioi asiakkaan tarpeet riittävän kattavasti. Tuotteen konfigurointiin liittyy oleellisesti yrityksen tuotestrategia, joka rajaa valintamahdollisuuksia ja luo säännöt tuotteen rakenteen joustavuudelle. (Sarinko 1999, 25.) Tuotestrategia on näin ollen keskeisessä asemassa arvioitaessa modulaarisen ja konfiguroitavan tuotteen ja niiden avulla luotavan tuoteperheen kehittämistä. Sarinko (1999, 25) jatkaa: Asiakkaan vallintamahdollisuuksien rajaus ja tuotteen valmistaminen ennalta suunnitelluista osakokonaisuuksista erottaa konfiguroitavan tuotteen projektituotteesta. Projektituotteelle tunnusomaista on tuotteen yksityiskohtainen räätälöinti asiakkaan vaatimusten mukaisesti. Tuotteen konfiguroinnilla pyritään lisäämään vakioituneen tuotteen muunneltavuutta ja toisaalta vähentämään projektituotteen räätälöitävyyttä. Konfiguroitaviin tuotteisiin siirtymisen tavoitteena on tuotekehitys- ja valmistusprosessien läpimenoaikojen lyhentäminen, parempi asiakastarpeisiin vastaaminen, rakenteiden vakioimisen mukanaan tuoma suuruuden ekonomia ja laadun sekä tuotteen hallittavuuden parantaminen. (Sarinko 1999, 25; Lehtonen 2007, 71.)

Kuten modulaarisen tuotteen kehitys, myös tuotteen ominaisuuksien konfiguroitavuus vaatii ponnisteluja tuotteen kehitysvaiheessa. Konfiguroitavuuteen tähtäävä panostus tulisi nähdä pitkäaikaisena hyötynä modulaarisen rakenteen tavoin. Tuotteiden, joita valmistetaan vain pieniä kappalemääriä, konfigurointi voi olla vaikeaa tehdä kannattavasti kehityskulujen kohdistuessa pienelle tuotantomäärälle. Tuotantomäärän tulisi karkeasti arvioiden olla muutamista kymmenistä satoihin

kappaleisiin vuodessa tuotteen tyypistä riippuen. Matalan valmistusmäärän tuotteessa konfigurointi voi kuitenkin osoittautua hyödylliseksi, mikäli tuotteesta onnistutaan rajaamaan tietty konfiguroitava osa ja projektiluonteisesti suunniteltava osa erilleen. (Sarinko 1999, 51.) Raitiovaunujen kohdalla tuotteen konfiguroitavuus voisi tarkoittaa esimerkiksi vaunumoduulien määrän tai mitoituksen muunneltavuutta. Myös vaunun ulkonäköön ja sisävarusteluun vaikuttavien rakenteiden konfiguroitavuudella olisi saavutettavissa etua asiakkaalle näkyvän joustavuuden lisääntyessä.

## 4 RAITIOVAUNUN HISTORIA JA TEKNOLOGINEN KEHITYS

### 4.1 Raitioliikenteen ja raitiovaunuteollisuuden kehitys

Raitovaunujen historia ulottuu aina 1800-luvun alkuun, jolloin ensimmäiset hevosilla vedettävät matkustajien kuljetukseen tarkoitetut raitovaunut otettiin käyttöön Isossa-Britanniassa. Sittemmin vaunujen käyttövoimana hevoset on korvattu ensin höyryllä ja myöhemmin sähköllä 1800-luvun loppupuolella. (König & Heipp 2008, 41.) Sähkövoiman valjastaminen joukkoliikenteen energiaksi oli merkittävä virstanpylväs. Sen ansiosta kiskoliikenne oli mahdollista myös kaupunkien kaduilla, johon aiemmin käytetty höyrykalusto ei soveltunut. Sähköraitiovaunu toi joukkoliikenteen kaduille ja myös työväestön käyttöön, raitovaunusta tuli nopeasti kaikkien kaupunkilaisten kulkuväline. (Alku 2012, 6.) Raitiovaunu oli ensimmäinen moottoroitu ajoneuvo, joka kehitettiin pelkästään kaupunkiympäristön joukkoliikenteen käyttöön (König & Heipp 2008, 3). Ensimmäiset varsinaiset raitovaunulinjat perustettiin 1830-luvulla Amerikassa ja jotkut niistä ovat olleet tavalla tai toisella toiminnassa aina näihin päiviin saakka (Bellis 2007, viitattu 22.7.2016).

1900-luvun alkupuolella raitioliikenne laajeni merkittävästi Amerikassa ja Euroopassa ja siitä muodostui hyvin yleinen joukkoliikennemuoto. Raitioliikenteellä oli merkittävä rooli useiden kaupunkien kehityksessä ja laajentumisessa. Raitioliikenteen kehityksen huipentuma oli 1920-luvulla, jolloin erilaisia raitioteiksi laskettavia järjestelmiä oli maailmanlaajuisesti käytössä noin kolmessa tuhatta kaupungissa. (König & Heipp 2008, 41.) Myönteisen kehityksen seurauksena alaan liittyvä teollisuus kasvoi ja kehitys jatkui aina toiseen maailmansotaan asti. Sotaa edeltävänä aikana lähes jokaisessa Euroopan valtiossa oli raitiovaunujen valmistukseen liittyvää teollisuutta. Vaunujen tuotannolle oli tyypillistä, että se tapahtui lähes poikkeuksetta paikallisesti ja kotimaisin voimin. (Alku 2015a, 12.) Tämä auttoi raitiovaunujen valmistukseen ja niiden tekniikkaan liittyvän osaamisen kehittymiseen Euroopassa.

Toisen maailmansodan aiheuttama tuho ja muutokset Itä-Euroopan valtioiden teollisessa roolissa vaikuttivat merkittävästi Euroopan raitioliikenteen kehitykseen. Sodan aikana tapahtuneen teknologisen kehityksen seurauksena autojen hinnat laskivat tuntuvasti, mikä mahdollisti autojen laajamittaisen hankkimisen myös työväestön keskuudessa. (Alku 2012, 6.) Autoistuminen jarrutti raitioliikenteen ja siihen liittyvän teollisuuden kasvua, joka muuttui hiljalleen taantuvaksi. Seura-

uksena oli raitiotiejärjestelmien supistaminen tai lakkauttaminen ja vaunuja valmistavien tehtaiden sulkeminen. (König Heipp 2008, 41.) Trendi oli voimakas varsinkin Amerikassa, jossa alkoi laajamittainen raitioteiden hävittäminen autotehtaiden ostaessa raitiotieyhtiöt ja lakkauttaessa niiden toiminnan. Euroopassa raitioteiden omistus säilyi kaupungeilla, mutta raitioteiden kehittäminen lopetettiin ja koko raitioliikenne päästettiin rapistumaan. Raitiovaunusta tuli lyhyessä ajassa vanhanaikaisuuden symboli, joka vain vei tilaa kaupunkien keskustoissa. (Alku 2012, 6.) Sodan ja sitä seuranneen autoistumisen vaikutukset raitioliikenteeseen olivat vahvat etenkin niissä Euroopan maissa, joissa raitioliikenteellä ei ollut merkittävää asemaa. Useissa maissa raitioliikenteellä kuitenkin säilyi vahva rooli kaupunkien joukkoliikennevälineenä ja teollisena työllistäjänä, näin tapahtui esimerkiksi Saksassa. Raitiovaunuteollisuutta säilyi Saksan lisäksi myös Sveitsissä ja Italiassa itäisen Euroopan raitiovaunutuotannon keskittyessä Tšekkoslovakiaan, Unkariin ja Puolaan. (Alku 2015a, 12.)

Yksityisautoilun kulta-aikana 1960 ja -70 -luvulla Euroopassa ja Amerikassa oli vallitseva ajatus, että kaupunkiliikenne voi pääosin perustua oman auton käyttöön. Joukkoliikenteen merkitystä kaupungin elinvoimaisuuteen ja elinkelpoisuuteen ei tunnistettu (König & Heipp 2008, 3). Busseilla tapahtuva joukkoliikenne hyväksyttiin esikaupunkialueilla, mutta keskustat haluttiin pyhittää vain henkilöautojen käyttöön. Poikkeuksena olivat suurkaupunkien metrot, jotka maanalaisen verkoston ansiosta eivät vieneet tilaa henkilöautoliikenteeltä. (Alku 2012, 6.) 70-luvun lopun öljykriisi yhdessä hallitsematon autoliikenteen kasvun kanssa muutti yleistä suhtautumista myönteisemmäksi julkista liikennettä kohtaan. Useissa Euroopan kaupungeissa huomattiin raitiovaunujen merkitys matkustaja- ja ympäristöystävällisenä joukkoliikennemuotona ja tämä ajoi kaupungeja kehittämään raitotiejärjestelmiään muun julkisen liikenteen kehityksen mukana. (König & Heipp 2008, 3). Raitiovaunujen uusi tuleminen oli luonnollisesti helpointa niissä kaupungeissa, joissa raitiotiet olivat säästyneet purkamiselta. Näin oli muun muassa Helsingissä ja useissa Saksan kaupungeissa. Muutoksella oli vaikutuksensa myös alan teollisuuden kehitykseen. 1970-luvun alussa Euroopassa oli kymmeniä raitiovaunuja valmistavia yrityksiä. (Alku 2012, 19.)

Viimeisten vuosikymmenien aikana raitioliikenteen on havaittu toimivan kaupunkien keskusta-alueita piristävänä tekijänä ja sen merkitys kaupunkien keskustojen laajentamismahdollisuudessa on tunnistettu. Raitiovaunujen käyttöönoton on myös todettu houkuttelevan ihmisiä käyttämään joukkoliikennettä. Eri tutkimuksien mukaan matkustajamäärät kasvavat noin 25 % siirryttäessä bussiliikenteestä raitiovaunujen käyttöön. Nykyisin raitotiejärjestelmiä on laskettu olevan käytössä maailmanlaajuisesti yli 400 kaupungissa ja uusia rakenteilla olevia järjestelmiä on noin sata

kappaletta. (König & Heipp 2008, 10.) Oheisessa kuvassa (KUVA 9) on esitetty eurooppalaiset raitiovaunukaupungit 2010-luvulla.



KUVA 9. Raitiovaunukaupungit Euroopassa vuonna 2012 (König & Heipp 2008, 42)

Raitiovaunuja valmistavassa teollisuudessa tapahtui suuria muutoksia vuosituhaten lopulta alkaneen globalisoitumisen seurauksena. Suuret monikansalliset yhtiöt, kuten Alstom, Bombardier ja Siemens valtasivat markkinaosuuksia pienemmiltä valmistajilta. Sittemmin 2000-luvun edetessä on tapahtunut jonkin verran globalisoitumiselle ja markkinoiden keskittymiselle vastakaista kehitystä pienempien valmistajien saatua osuuksia vaunumarkkinoista. (Alku 2015a, 12.) Yhtenä selityksenä tälle on pienten valmistajien ketteryys ja matalampien yleiskustannusten aikaansaama hyvä hintakilpailukyky kappalemäärältään pienissä vaunutoimituksissa (Hondius 2011, 40).

## 4.2 Raitiovaunu

Raitiovaunu on sähkökäyttöinen kiskoilla kulkeva kaupunkiympäristöön suunniteltu joukkoliikenneajoneuvo. Raitiovaunu muistuttaa monelta osin junaa, mutta se on tyypillisesti junaa kapeampi,

kevyempi ja lyhyempi. Raitiovaunun vaunumoduulit on liitetty toisiinsa nivelletyin liitoksin, mikä mahdollistaa raitiovaunun kääntymisen tavanomaista junaakaan jyrkemmissä kaarteissa. Yleisimmin vaunu saa käyttövoimansa kiskojen yläpuolella olevasta virroitinjohdosta vaunun katolla olevan virroittimen kautta. Muita harvemmin käytössä olevia energiansyöttömenetelmiä ovat kiskojen välissä olevan virroitinkiskon kautta tapahtuva virransyöttö ja erilaiset akkuihin ja kondensaattoreihin perustuvat ratkaisut. Tavanomaisesta poikkeavia energiansyöttömenetelmiä käytetään, kun rataympäristö ei mahdollista virroitinjohdon käyttöä joko visuaalisista tai teknisistä syistä johtuen. Raitiovaunun kulku kiskoilla tapahtuu vaunumoduuleihin kiinnitettyjen telien avulla. Telien lukumäärä vaihtelee vaunun konstruktion mukaan yleisimmin kahden ja neljän telin välillä. Telin rakenne vastaavasti määrittää merkittävältä osin vaunun muuta rakennetta, kuten esimerkiksi matalalattaisuutta.

Raitiovaunujen sähköistyessä 1800-luvun lopulla vaunut olivat tyypillisesti yksivaunuisia ja neli- tai pyöräisiä. Matkustajamäärien kasvaessa matkustajakapasiteettia kasvatettiin lisäämällä moottorivaunun perään moottoriton perävaunu. Järjestelyn tavoitteena ei ollut ainoastaan matkustajakapasiteetin kasvattaminen vaan myös matkustajamäärä per kuljettaja suhteen parantaminen liikennöinnin kannattavuuden parantamiseksi. Trendi vaunujen pidentämisessä on jatkunut aina näihin päiviin saakka. (Tramways & Urban Transit 2015.) Nykyaikainen raitiovaunu koostuu tyypillisesti kolmesta, viidestä tai seitsemästä nivelletyillä liitoksilla toisiinsa kytketyistä vaunumoduulista ja vaunujen kokonaispituudet vaihtelevat yleensä 25 – 45 metrin välillä. Vaunun pituutta rajoittaa kaupunkikeskustojen ahtauden lisäksi myös raitiotien pysäkkien pituus sekä huolto- ja säilytysvarikot. Vaunujen pidentäminen on tuonut mukanaan myös ei-toivottuja ominaisuuksia. Useammasta vaunumoduulista koostuvat vaunut ovat monimutkaistaneet vaunujen rakennetta tehden niistä vaikeammin valmistettavia ja huollettavia. Lisäksi suuren matkustajakapasiteetin omaavien vaunujen kohdalla vaunujen matala täyttöaste tiettyinä vuorokauden aikoina voi aiheuttaa pahennusta ympäristötietoisten keskuudessa (Tramways & Urban Transit 2015).

Raitiovaunun elinkaari on vuosikymmeniä ja matkustajamäärien kehittymisen ennustaminen niin pitkälle ajanjaksolle on vaikeaa. Matkustajamäärien kasvaessa on eduksi, jos olemassa olevan kaluston matkustajakapasiteettia voidaan mukauttaa vastaamaan muuttuvaa tarvetta. Joissakin kaupungeissa vanhoihin vaunuihin on lisätty uusia vaunumoduuleja, joilla on jatkettu vaunun kokonaispituutta. Uusien vaunumoduulien lisääminen mahdollistaa myös vaunun osittaisen modernisoinnin, jolla voidaan parantaa muun muassa vaunun käytettävyyttä. Näin on tehty esimerkiksi Helsingin korkealattiaisten nivelvaunujen kohdalla, joihin lisättiin osin matalalattiaisen vau-

numoduuli. Vanhoja 1970- ja 80-luvulla valmistettuja vaunuja ei kuitenkaan ole suunniteltu jatkettaviksi, minkä vuoksi vaunumoduulin lisääminen aiheutti muutostarpeita vaunun eri järjestelmiin. Moderneissa raitiovaunuissa matkustajakapasiteetti voidaan mukauttaa tarpeen muuttuessa moduuleja lisäämällä ilman tarvetta merkittäville muutoksille vaunun järjestelmissä. Vaunujen pidentämismahdollisuutta pidetään tärkeänä ominaisuutena juuri vaikean kapasiteettitarpeen ennustamisen vuoksi. Vaunujen pidentämisestä lisättävien tai alkuperäistä pidempien vaunumoduulien avulla onkin muodostumassa varsin yleinen vaatimus tilaajien taholta.

Raitiovaunuissa käytettävät teliratkaisut voidaan jakaa karkealla tasolla kiinteisiin ja kääntyviin teleihin. Kiinteällä telillä tarkoitetaan rakennetta, jossa kulkuelimet on kiinnitetty jousituksen välityksellä vaunun koriin. Teli kääntyy vain rajoitetusti suhteessa vaunumoduuliin, johon se on kiinnitetty. Radassa olevien kaarteiden ja korkeuserojen vaatima vaunurakenteen taipuminen ja kiertyminen saadaan aikaan vaunumoduulien välisissä nivelletyissä liitoksissa. Kiinteällä telillä saavutetaan etua muun muassa vaunun sisätilojen käytettävyydessä. Ratkaisu mahdollistaa täysin tasaisen lattiarakenteen ja leveän käytävän läpi koko vaunun. Haittapuolina nähdään usein kääntyvällä telillä varustettua vaunua huonompi ajomukavuus, meluisuus, radan ja pyörien kuluminen sekä rakenteellinen kestävyys vaativassa rataympäristössä. Kääntyvällä telillä varustetussa vaunussa teli on vastaavasti kiinnitetty vaunun koriin laakerin välityksellä, jolloin teli pääsee vapaasti kääntymään suhteessa vaunumoduuliin. Kääntyvän telin vaatima tila asettaa rajoitteita vaunun sisätilojen mitoitukselle, rajoittaen muun muassa matkustamokäytävän leveyttä. Telin ja vaunumoduulin välillä tapahtuvasta liikkeestä johtuen vaunun matkustamon lattiarakenteeseen joudutaan tekemään porrasaskelmia ja luiskia.

Raitiovaunuja on yhteen ja kahteen suuntaan ajettavia. Yhteen suuntaan ajettava raitiovaunu on varustettu yhdellä ohjaamolla, kun taas kahteen suuntaan ajettavassa vaunussa ohjaamo on vaunun molemmissa päädyissä. Molemmissa ratkaisuisissa on sekä hyviä että huonoja puolia. Kahteen suuntaan ajettavan vaunun edut ovat pääasiassa rataan liittyviä. Radan päätepysäkkejä ei esimerkiksi tarvitse varustaa raitiovaunun käännön mahdollistavalla silmukkaradalla ja pysäkkilaiturit voidaan sijoittaa kummalle puolelle rataa tahansa. Kahteen suuntaan ajettavuus on muodostumassa hyvin tavanomaiseksi vaatimukseksi uutta kalustoa hankittaessa. Yhteen suuntaan ajettavan vaunun selkeimpinä etuina kaksisuuntaiseen verrattuna ovat kevyempi ja yksinkertaisempi rakenne, matalammat valmistuskustannukset sekä suurempi istumapaikkakapasiteetti, joka on seurausta matkustamon ovien sijoittamisesta vain toiselle vaunun sivulle. Kuvassa 10 on esitetty muotoilijan näkemys Tampereen raitiotielle soveltuvasta modernista raitiovaunusta.





*KUVA 10. Muotoilijan näkemys tyypillisestä modernista raitiovaunusta. Vaunu on kahteen suuntaan ajettava, kolmesta vaunumoduulista koostuva ja varustettu neljällä telillä. (Idis Design / Tampereen kaupunki)*

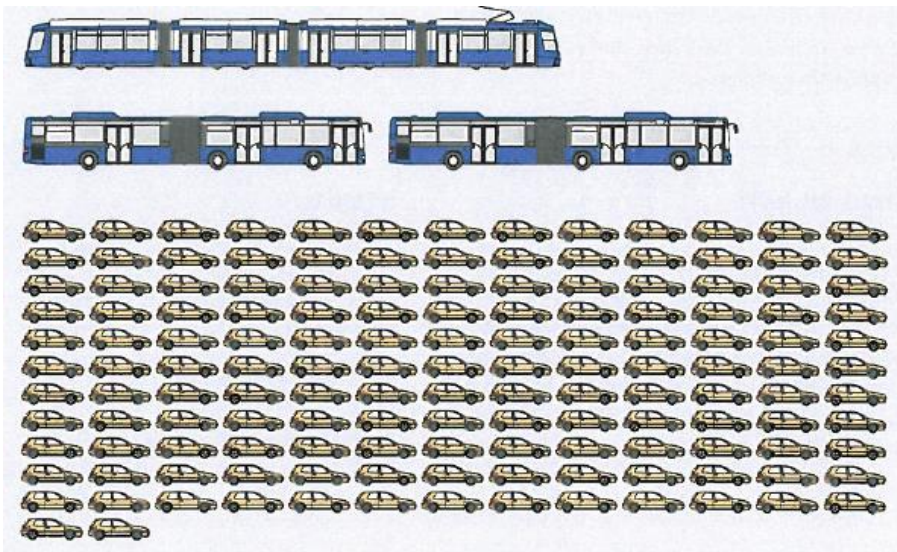
#### **4.3 Raitiovaunun edut kaupunkiliikenteessä**

Joukkoliikenteen suunnittelijoita askarruttaa usein kysymys siitä, miksi raitiovaunut ovat bussia suositumpi joukkoliikenneväline (Laaksonen 2003, viitattu 22.12.2016). Kirjoittajan omien koke-  
muksien mukaan asia nousee silloin tällöin esille erilaisissa asiayhteyksissä. Tämän luvun kirjoit-  
tamisen taustana oli ajatus siitä, että yleinen käsitys raitiovaunun eduista ei ehkä ole kovin katta-  
vasti tiedossa. Asia koskee varsinkin pääkaupunkiseudun ulkopuolella asuvia ihmisiä. Luvun  
tarkoituksena ei ole tehdä kattavaa vertailua bussien ja raitiovaunujen kesken, vaan nostaa esille  
olennaisia eroja näiden vaihtoehtojen välillä.

Yksi merkittävä tekijä joukkoliikenteen hyvyyttä arvioitaessa on pysäkeillä vietetty aika. Yleisen  
näkemysten mukaan raitiovaunujen pysäkkiajat ovat busseja lyhyemmät (Laaksonen 2003, viitat-  
tu 22.12.2016). Raitiovaunujen lyhyet pysäkkiajat on mahdollistettu matalalattiaisudella, useilla  
oviaukoilla ja esteettömällä liikkumisella vaunun sisällä. Raitiovaunun rakenteesta riippuen jokai-  
nen vaunumoduuli on yleensä varustettu yhdellä tai kahdella samalle vaunun sivulle sijoitetulla  
oviaukolla. Leveät oviaukot ja pysäkkilaiturin tasalla oleva lattia mahdollistavat nopean ja turvalli-  
sen matkustajien liikkumisen laiturin ja vaunun välillä. Vanhoissa korkealattiaisissa vaunuissa  
oviaukoilla olevat portaat muodostavat pullonkaulan matkustajien liikkumiselle. Portaiden vuoksi  
korkealattiaisella raitiovaunulla matkustaminen on liikuntarajoitteiselle matkustajalle vaikeaa ja  
pyörätuolimatkustajalle täysin mahdotonta. Matkustajavirran sujuva liike laiturilta vaunuun ja vas-  
taavasti pois vaunusta lyhentää pysäkkiaikaa. Tämä on tärkeä tekijä jo senkin vuoksi, että raitio-

vaunulla pysähdytään usein. Raitiotien tyypillinen pysäkkiväli on lyhyt, vain 200 – 300 metriä (Alku 2012, 30).

Raitiovaunuja pidetään yleisesti energiatehokkaana liikennemuotona. Raitiovaunun matkustajakohtainen energiankulutus on laskettu olevan noin viidesosa vastaavaan henkilöautolla tehtyyn matkaan verrattuna (König & Heipp 2008, 10). Bussiin verrattuna raitiovaunun matkustajakohtainen energiankulutus on noin puolet pienempi (Laaksonen 2003, viitattu 22.12.2016). Raitiovaunun energiatehokkuus perustuu tehokkaaseen sähkökäyttöön, jossa jarrutusenergia hyödynnetään vaunun lämmitykseen tai syötetään takaisin virroitinjohtoon muiden vaunujen käytettäväksi. Hyvä energiatehokkuus on myös seurausta teräspyörien ja kiskojen välisestä matalasta vierintävastuksesta. Raitiovaunu tunnetaan energiatehokkaana, tilaa säästävänä ja liikeneruuhkia ehkäisevänä ajoneuvona. Nykyaikaisen noin 40 metriä pitkän raitiovaunun matkustajakapasiteetti vastaa kahden nivelbussin kapasiteettia tai 145 henkilöauton keskimääräistä matkustajamäärää. Oheinen vertailukuva (KUVA 11) osoittaa kyseisten matkustusvälineiden tilantarpeen liikenteessä. Raitiotien paikoitellen vaatima lisätilaruote autoliikenteeseen verrattuna kompensoituu autojen tarvitseman pysäköintitilan ansiosta. (König & Heipp 2008, 11.)



KUVA 11. Matkustajakapasiteetin vertailu eri ajoneuvojen välillä (König & Heipp 2008, 11)

Muita raitiovaunujen etuja bussiliikenteeseen verrattuna on matala melutaso, kaluston pitkäikäisyys ja matkustusmukavuus. Vaikka tutkimukset osoittavat raitiovaunun aiheuttavan kumipyöräliikennettä enemmän melua kaupunkialueella, matkustajien määrään suhteutettuna raitiovaunu on kuitenkin huomattavasti autoliikennettä hiljaisempaa. Matkustajan näkökulmasta katsottuna nyky-

aikainen matkustamoltaan hiljainen raitiovaunu tarjoaa yleisen mielipiteen mukaan mukavimman ja vaivattomimman matkustustavan kaupunkialueilla (König & Heipp 2008, 11).

#### **4.4 Raitiovaunu vai pikaraitiovaunu**

Kuten aiemmin todettua raitiovaunuilla liikennöidään tyypillisesti kaupunkien keskustoihin ja niiden lähiöalueille rakennetuilla raitioteilla. Raitiotiellä tarkoitetaan järjestelmää, jossa rata kulkee kadulla ja usein muun liikenteen joukossa, joten raitioliikenteen erityispiirteenä muuhun kiskoliikenteeseen verrattuna on liikenteen sopeuttaminen kaupunkiliikenteen vaatimuksiin. Raitiovaunun liikennöinti voidaan jakaa tiiviisti muuhun kaupunkiliikenteeseen kytkeytyvään tavanomaiseen raitioliikenteeseen ja pikaraitioliikenteeseen. Jako on tosin hieman epäselvä, koska pikaraitiotie nimitystä käytetään vaihtelevasti eri maissa ja yhteyksissä. Alku (2012, 30–33) määrittelee pikaraitiotien olevan sähkökäyttöinen raidejärjestelmä, jonka kalusto voi liikkua myös kaduilla. Saksassa pikaraitiotieksi kutsutaan raitiotielinjoja, joilla on maanalaisia osuuksia. Linjoilla operoiva kalusto ei poikkea tavanomaisilla raitiotielinjoilla käytettävästä kalustosta, joten pikaraitiotien erottaa raitiotiestä vain rataympäristön eroavaisuuksista. Yleisesti ottaen pikaraitiotieradan ero normaaliin raitiotierataan on nopeaan liikenteeseen suunnitellut rataosuudet. Yhtenä pikaraitiotien määritteenä pidetään mahdollisuutta kytkeä linjalla operoivat raitiovaunut yhteen yhden kuljettajan ohjaamaksi junaksi. Hieman tulkinnanvaraisesta jaottelusta huolimatta pikaraitiotien ominaispiirteeksi voidaan yleisesti ottaen mainita tavanomaista raitiovaunua suuremmat ajonopeudet ja ratojen erottaminen muusta kaupunkiliikenteestä. Hyvin usein pikaraitioteilla käytettävät vaunut eivät kalustoteknisesti suuremmin eroa tavanomaisesta raitiovaunukalustosta (APTA 2013, 9).

#### **4.5 Raitiovaunujen hankinnan ja käytön ominaispiirteitä**

Eurooppalaisille raitiovaunumarkkinoille on tyypillistä, että raitiovaunujen hankinta tehdään 30 – 40 vuoden käyttöikää ajatellen. Yksittäiset raitiotiejärjestelmät, eli yleisimmin kaupungit hankkivat vaunuja keskimäärin 10 – 15 vuoden välein kapasiteettitarpeen kasvaessa tai olemassa olevan kaluston käytöstä poiston seurauksena. (Alku 2015a, 3.) Raitiovaunun hankintaprosessi kestää useimmiten puolesta vuodesta noin kahteen vuoteen, ensimmäisen vaunun valmistuessa noin kaksi vuotta toimitussopimuksen allekirjoittamisen jälkeen. Vaunujen toimitustahti vaihtelee val-

mistajasta riippuen, ollen nopeimmillaankin vain muutamia vaunuja kuukaudessa, joten varsinaisesta massatuotannosta raitiovaunujen kohdalla ei voida puhua. Verrattain hitaasta valmistuksesta johtuen kappalemääräisesti suurten vaunutilauksien toimitukset kestävät usein vuosia. (Alku 2015a, 9.) Tilauksesta toimitukseen kuluvan ajan ja toimitustahdin lyhentäminen olisi mahdollista tuotealustaan ja modulaariseen rakenteeseen perustuvan vaunun avulla. Hyöty saavutettaisiin tuotteen suunnittelun osalta valmiiden ratkaisujen käytöllä ja niihin perustuvien tuotantoteknologioiden hyödyntämisellä vaunujen valmistuksessa.

Muutokset vaunujen rakenteissa, tekniikassa ja kunnossapitotoiminnoissa ovat pidentäneet vaunujen elinkaarta. Aiemmin vaunujen käyttö perustui lyhyeen elinkaareen ja mahdollisimman vähäiseen huoltotarpeeseen, joka oli tyypillistä varsinkin itäisessä Euroopassa valmistetuille vaunuille. Sittenkin vaunujen elinkaaret ovat pidentyneet vaunujen huollettavuuden ja kunnossapidettävyyden merkityksen kasvaessa. Vaunujen elinkaarta jatketaan peruskorjaamalla ja modernisoimalla tekniikkaa suorituskyvyn parantamiseksi. Elinkaaren jatkamista kuitenkin rajoittaa vaunun avainkomponenttien vanheneminen ja ehkä vielä merkittävämpänä tekijänä vaunun kantavien rakenteiden väsymisestä johtuvat vauriot, joiden korjaaminen on usein vaikeaa. (Alku 2015a, 7.) Vaunujen päivitettävyyttä joko korjaamalla tai modernisoimalla edesauttaisi vaunun rakenteen modulaarisuus. Vahvasti integroituun rakenteeseen perustuvan vaunun päivittäminen väistämättä aiheuttaa enemmän työtä ja kustannuksia.

Vaunujen päivitettävyyden tarve tulee jatkossa entistä merkittävämmäksi seikaksi, sillä Alku (2015a, 7) ennustaa vaunujen käyttöiän kasvavan edelleen. Etenkin, jos vaunun rakenteiden väsymis- ja korroosiovanhenemisominaisuuksia saadaan parannettua. Merkittävät teknologiset kehitysvaiheet vaunujen rakenteissa, kuten telivaunut, nivelvaunut, elektroninen tehonsäätö, teräskorirakenteet ja matalalattiaisuus vastaavat käyttöympäristön vaunulle asettamiin vaatimuksiin ja eivät näin ollen aseta teknisiä rajoitteita vaunun käytölle. Uutta vaunukalustoa hankkimalla ei siten voida ratkaista tarpeita, joita ei olemassa olevalla kalustolla voitaisi ratkaista. Näin on varsinkin silloin, kun olemassa olevaa kalustoa päivitetään komponenttitasolla teknologisen kehityksen mukana. Vaunun elinkaaren kasvaessa modulaaristen rakenteiden mahdollistava vaunujen päivittäminen osa tai järjestelmä kerrallaan muuttuu vielä aikaisempaa merkittävämmäksi tekijäksi.

#### 4.6 Markkinavaatimukset ja kilpailukykytekijät

Tuotteen modulaarisuuden halutaan usein mahdollistavan tuotteen asiakaslähtöinen räätälöinti. Markkinoiden tarpeiden tunnistaminen on näin ollen keskeinen tekijä modulaarisen tuotteen kehityksessä. Asiakaskunnan vaatimuksia ja tarpeita kartoitetaan tavanomaisesti markkinatutkimusten avulla. Raitiovaunukalustoon liittyviä markkinatutkimuksia ei kuitenkaan ole laajemmalti saatavilla, koska tutkimuksia tilaavat tahot eivät yleensä julkaise tutkimusraportteja. Kirjoittajan löytämät tutkimukset keskittyvät pääsääntöisesti toimitettavien raitiovaunujen kappalemääriin ja kauppojen ajankohtiin. Tutkimukset käsittelevät vaunujen ominaisuuksia ja teknisiä ratkaisuja hyvin pintapuolisesti. Huomion taustalla voi olla suppean otannan lisäksi vaunujen hankintaprojektien toisistaan merkittävästi poikkeavat vaatimukset vaunujen tekniikkaan tai ominaisuuksiin liittyen. Vaatimuserot projektien välillä ovat merkittäviä ja vaunun ominaisuuksia priorisoidaan tilaavien tahojen puolelta hyvin kirjavasti. Näin ollen vaunujen rakenteesta voi olla vaikea tunnistaa osa-alueita, joissa modulaarisuuden avulla saavutettava rakenteiden asiakaslähtöinen räätälöitävyys olisi merkittävästi tarpeellisempaa kuin jossakin muussa rakenteessa. Monenkirjavista asiakasvaatimuksista huolimatta projektien välillä on myös yhteneviä vaatimuksia koskien tiettyjä vaunun ominaisuuksia ja ratkaisuja. Osaan näistä vaatimuksista voidaan vastata helpommin ja matalammin kustannuksin modulaarisella rakenteella. Modulaarisuudella voidaan myös varautua vaatimuksiin, jotka eivät ole vaunun hankintahetkellä vielä tilaajankaan tiedossa.

Yleisimpänä yhtenevänä vaatimuksena on vaunun matalalattiaisuus, jonka voi sanoa muodostuneen hankittavan kaluston vakiovaatimukseksi kaikkien matalalattiakalustolle soveltuvien raitiotiejärjestelmien kohdalla. Viimevuosien aikana toteutuneissa raitiovaunukaupoissa matalalattiaivaunujen osuus on ollut lähes 90 % hankituista vaunuista (Hondius 2011, 38). Matalalattiaisuudella tarkoitetaan konstruktiota, jossa vaunun lattiat ja etenkin ovalueiden kynnykset on laskettu korkeussuunnassa mahdollisimman lähelle kussakin raitiotiejärjestelmässä käytettyä laiturikorkeutta. Tavanomaisesti matalalattiaivaunun lattiakorkeus on 300 – 350 mm kiskonpinnasta mitattuna. Matalalattiaivaunut on kehitetty sujuvoittamaan matkustajien liikkumista pysäkkilaiturin ja vaunun välillä. Matala kynnyskorkeus ja loivat nousukulmat vaunun lattiarakenteissa tähtäävät tehokkaaseen matkustajien liikkumiseen vaunuun ja ulos vaunusta (KUVA 12). Matalalattiaisuuden ansiosta myös liikuntarajoitteisten ja lastenvaunujen kanssa matkustavien matkustajien kulku vaunuun on sujuvaa. Pysäkeillä kuluva aika lyhenee, joka tehostaa liikennöintiä. Vaunujen esteettömyys ja sujuva käytettävyys ovat vahvasti vaunun matalalattiaisuuteen liittyviä tekijöitä ja ne nousevat korostetusti esille asiakasvaatimuksissa.



KUVA 12. Vertailukuva matala- ja korkealattiaisen vaunun oviaukoilta (König & Heipp 2011, 11)

Lattikorkeuden madaltaminen on tuonut mukanaan myös ei-toivottuja ominaisuuksia raitiovaunuihin. Sen myötä vaunujen rakenteet ovat monimutkaistuneet merkittävästi. Vaunumoduulien väleihin on lisätty niveliä, jotka mahdollistavat vaunun taipumisen pystysuunnassa ilman pohjakosketuksia katuun. Korkealattiaisessa vaunussa vaunun lattiarakenteiden alle jäävä tila on hyödynnetty vaunun eri laitteiden sijoittelussa. Sen sijaan matalalattiaivaunussa laitteet, kuten esimerkiksi taajuusmuuttajat ja ilmastointiyksiköt joudutaan sijoittamaan vaunun katolle tai joissain tapauksissa matkustamoon, mikä pienentää matkustajakapasiteettia. Laitteiden sijoittaminen vaunun katolle aiheuttaa tarpeen korirakenteen jäykistämiseksi, joka taas kasvattaa vaunun kokonaisuutta. Laitteiden sijoittaminen katolle nostaa vaunun painopistettä, joka lisää vaunun kallisteluhaasteita heikentäen matkustusmukavuutta ja kasvattaen vaunun sivusuuntaista tilantarvetta. Ehkä kuitenkin merkittävin matalalattiaisuuden mukanaan tuoma tekninen haaste liittyy vaunun telihin. Perinteiselle ja hyvät kulkuominaisuudet mahdollistavalle kääntyvälle telirakenteelle on haasteellista löytää riittävästi tilaa ilman matkustamon käytettävyyttä heikentäviä ratkaisuja. Näin ollen voidaankin kärjistetysti sanoa raitiovaunujen palanneen matalalattiaisuuden ja kiinteiden telien myötä matkustusmukavuudessa historiallisten nelipyöräisten vaunujen tasolle. Matalalattiaisuuden liittyvien ongelmien ratkaiseminen ennustetaan olevan seuraavan vuosikymmenen suurin haaste koko raitiovaunuteollisuudelle. (Tramways & Urban Transit 2015, 4.)

Matalalattiaisuuden lisäksi toinen asiakasvaatimuksissa esille nouseva tekijä on vaunun sisätilojen räätälöintimahdollisuus. Tällä tarkoitetaan mahdollisuutta varustella vaunun sisätiloja eri matkustajaryhmien tai matkustajamäärien vaatimalla tavalla. Vaunun matkustajakapasiteettia voi-

daan optimoida kokonaismatkustajamäärän suhteen, jolloin istuimien lukumäärää vähennetään tai istumapaikkojen suhteen, jolloin istuimien lukumäärä maksimoidaan. Istuimien määrää vähentämällä vaunusta vapautuu lattiapinta-alaa seisoville matkustajille. Erilaiset istuinratkaisut, kuten taitto- tai nojailuistuimet toimivat usein hyvänä kompromissina näiden ristiriidassa olevien tavoitteiden välillä. Vaunun rakenteiden näkökulmasta yllä kuvattu räätälöinti voi vaatia vaunun korin seinärakenteiden uudelleen suunnittelua ja muutostarvetta istuimia ympäröiviin varusteluosiin. Vaihtoehtoisesti seinärakenne ja varusteluosien kiinnitykset voidaan suunnitella eri varusteluvaihtoehtot mahdollistavaksi. Modulaarisella rakenteella toteutettuna istuintyyppjä voidaan vaihtaa tai istuimet poistaa kokonaan vakioitujen kiinnitysrajapintojen ansiosta ilman tarvetta suunnittelu- tai muille muutoksille.

Raitiovaunuja hankkivat tahot ovat yhä enenevässä määrin kiinnostuneita raitovaunun alhaisista elinkaarikustannuksista. Kalustotoimittajaa valittaessa vaunun alhainen kappalehinta ei ole enää niin merkittävässä asemassa kuin aikaisemmin. Lisäksi jatkuvasti yleistynyt tapa on, että vaunuja hankkivat tahot edellyttävät kalustovalmistajan vastaavan kaluston huollosta ja kunnossapidosta hankintasopimuksessa määritetyn ajan. (Hondius 2011, 40.) Raitiovaunun elinkaarikustannus muodostuu vaunun hankintahinnasta ja suunnitellusta sekä suunnittelemattomasta kunnossapidosta sekä vaunun rataverkolle aiheuttamista poikkeavista ylläpito- ja korjauskustannuksista. Suunniteltuun kunnossapitoon kuuluvat eri järjestelmien ja kuluvien mekanismien tarkastukset ja vaihdot huolto-ohjelmassa määritetyin aikavälein. Suunnittelemattoman kunnossapidon osan muodostavat mm. raitiovaunulla ajettavat kolarit ja niiden korjauksesta aiheutuvat kustannukset. Raitiovaunun rakenteen modulaarisuus vaikuttaa vaunun elinkaarikustannusta laskevasti eri tavoin. Modulaarisuudella on vaunun yksikköhintaa laskeva vaikutus rakenteiden vakioinnin ja yhteiskäyttöisyyden ansiosta. Kunnossapidon kustannukset madaltuvat helpommin huollettavan ja korjattavan rakenteen ansiosta. Modulaariselle rakenteelle tunnusomainen helppo kokoonpantavuus tarkoittaa yleensä myös helppoa osien vaihdettavuutta. Aiemmin mainittu matalalattiaisuuden mukanaan tuoma rakenteiden monimutkaistuminen lisää huolto- ja vikaantumiskohteita. Näin ollen modulaarisuudella saavutetaan etuja myös vaunun matalalattiaisuuden kohdalla, vaikka modulaarisuutta ei varsinaisesti olisi hyödynnetty vaunun matalaan lattiakorkeuteen liittyvissä rakenteissa.

#### 4.7 Modulaarisuus raitiovaunuissa

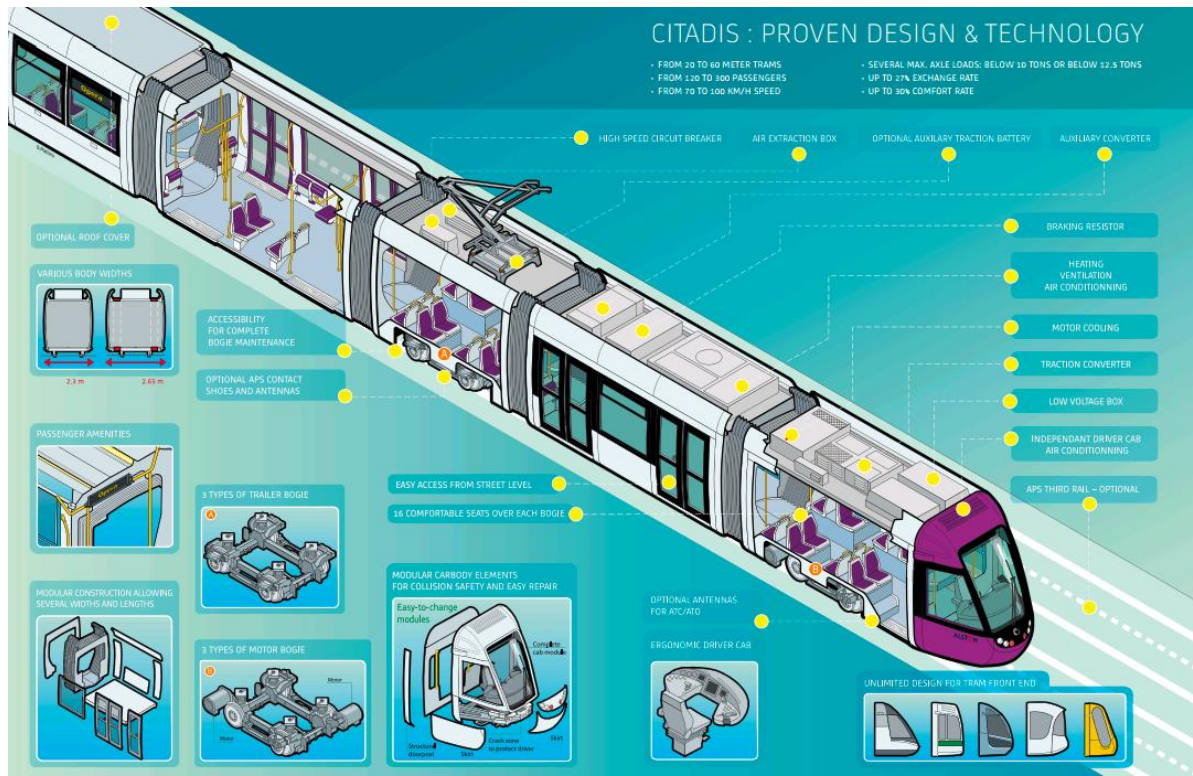
Raitiovaunun rakenteen modulaarisuuden ja sitä tukevan tuotantoteknologian käyttö parantaa vaunun hintakilpailukykyä verrattaessa sitä vastaavilla ominaisuuksilla varustettuun, mutta ilman modulaarisia ratkaisuja toteutettuun vaunuun. Tästä kilpailuedusta huolimatta markkinoilla on viime vuosiin asti ollut vain yksi täysin modulaariseen rakenteeseen perustuva raitiovaunuoteperhe. Vaunujen modulaarinen toteutustapa mahdollistaa joustavan asiakasräätälöinnin lisäksi myös valmistajalle edullisen tuotannon uudelleenikäynnistämisen mahdollisten toimituskatkojen jälkeen. (Hondius 2011, 40.) Kirjoittaja pitää näkökantaa osin oikeana, koska vain vakioituilla rakenteella ja tuotantomenetelmillä tuotteen valmistus voidaan käynnistää uudelleen kustannustehokkaasti ilman merkittäviä käynnistyskuluja. Tosin kyseisen kaltainen tilanne voi toteutua myös silloin, kun vaunuvalmistaja tuottaa vahvasti vakioitua tuotetta, joka sattuu sellaisenaan täyttämään markkinoiden vaatimukset. Toisaalta kysymys on myös tuotteen kehitysasteesta eli kypyydestä markkinoiden vaatimuksia ajatellen. Vaikka vaunun rakenne olisi toteutettu modulaarisesti, kustannusetua ei saavuteta, mikäli modulointi ei tue asiakkaiden toivomia räätälöintimahdollisuuksia. Kirjoittajan mielestä on lisäksi väärin puhua täysin modulaarisesta tuotteesta minäkään raitiovaunun kohdalla. Monimutkaisesta kokonaisuudesta johtuen vaunun rakenne ei ole koskaan täysin modulaarinen.

Vaikka kysymys vaunurakenteen täydellisestä modulaarisuudesta on vaikea tarkasti määrittää, on kuitenkin selvää, että tuotealustalla ja modulaarisuudella on paikkansa moderneissa raitiovaunuissa. Yhä useamman vaunuvalmistajan tuotteet perustuvat tuotealustoihin ja modulaariseen rakenteeseen. Modulaarisuutta ja vaunujen räätälöitävyyttä pidetään selkeästi vaunujen kilpailukykytekijänä ja sitä on nostettu esille markkinoinnissa käytettävässä materiaalissa.

Oheiset kuvat (KUVAT 13 ja 14) esittävät Alstom Citadis vaunun räätälöintimahdollisuuksia. Räätälöitäviä ominaisuuksia ovat vaunun pituus, leveys, sisustusratkaisut matkustamon ja ohjaamon osalta sekä vaunun ulkonäköön ja jalankulkijaturvavallisuuteen vaikuttavat vaunun päätyjen muotoilu. Vaunun telien kohdalla räätälöinti mahdollistaa moottoroidun tai moottoroimattoman telin valitsemisen halutun suorituskyvyn mukaisesti. Vaunu räätälöidään kahteen suuntaan ajettavaksi varustamalla vaunun molemmat päädyt ohjaamomoduleilla. Matkustamon ovet ovat sijoitettavissa vaunun molemmin puolin ja kahteen suuntaan ajettavuuden edellyttämät katon laitesijoitteluun kohdistuvat muutokset voidaan vakioitujen liitospintojen ansiosta tehdä joustavasti. Ohjaamon modulaarisuus aikaansaa kaksisuuntaisen liikennöinnin mahdollistamisen lisäksi myös ohjaamon












vaihdon suurempien kolarien varalta. Pienempien kolarien sattuessa keulan panelointiosat ovat vaihdettavissa paneelien muotoilusta riippumattomien vakioitujen liitospintojen ansiosta.



KUVA 13. Alstom Citadis raitiovaunun asiakasräätälöityvä modulaarinen rakenne (Alstom)

Vaunun leveys on valittavissa kahden yleisimmän vaunuleveyden väliltä, 2400 tai 2650 mm. Leveyden muuttuminen on rakenteen modulaarisuuden kannalta mielenkiintoinen seikka. Eri vaunulevydet tulisi toteuttaa siten, että muuttuvien rakenteiden määrä olisi mahdollisimman pieni. Näin ollen kaikissa vaunun poikkisuuntaisissa rakenteissa tulisi olla kohta, jonka mitoitusta on helppo muuttaa vaunuleveyden muuttuessa. Edullisinta on pyrkiä säilyttämään olemassa olevat rakenneratkaisut ja kohdistaa muutokset sellaisiin rakenteen kohtiin, joiden valmistukseen ei tarvita kalliita työkaluja tai joilla ei ole vaikutusta tuotantomenetelmiin ja -teknologiaan. Muutos on siis pyrittävä rajaamaan tiettyihin rakenteisiin ympäröivien rakenteiden säilyessä ennallaan. Vaunumoduulin pituuden muutos ja sen aikaansaama tarve muuttaa rakenteita on yleensä helpompaa toteuttaa pitkän ja kapean tuotteen valmistukseen valittujen valmistusmenetelmien seurauksena.

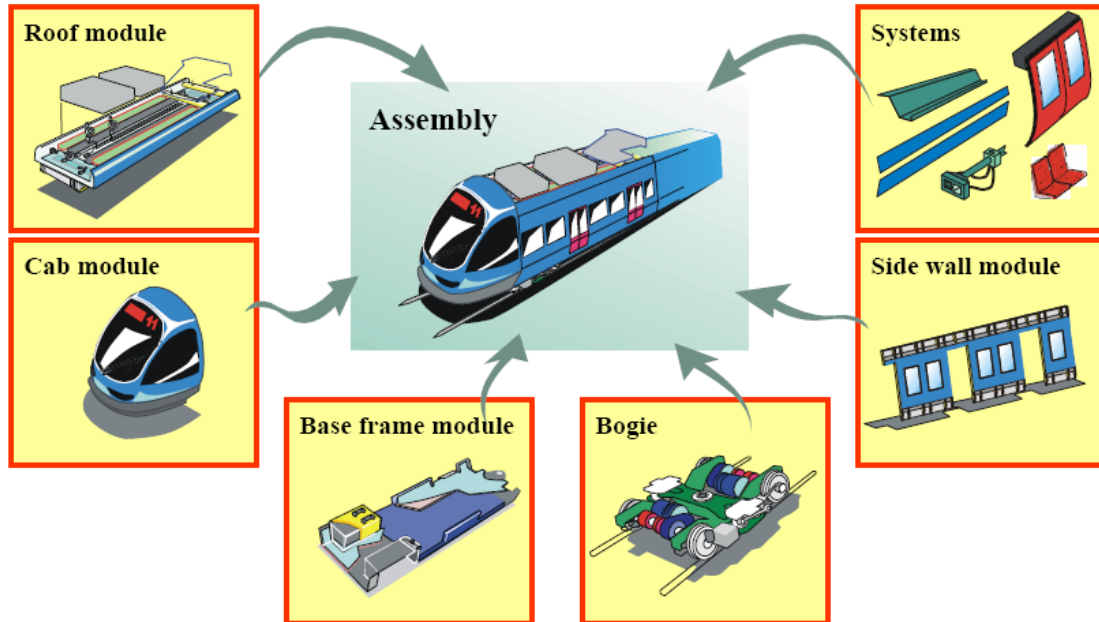
Alstom Citadis X05 variantit	Vaunumoduuleja	Pituus (m)	Ovien lkm.	Matkustajia (leveys 2,4m)	Matkustajia (leveys 2,65m)
	3	24	4 tai 8	142	●
	5	32	6 tai 12	200	221
	5	33	6 tai 12	211	233
	5	36	6 tai 12	220	●
	5	37	6 tai 12	231	●
	7	43	8 tai 16	279	301
	7	43	7 tai 14	284	307
	7	45	8 tai 16	290	313
	7	45	7 tai 14	295	319

KUVA 14. Esimerkkejä vaunuvarianteista, jotka on toteutettavissa modulaarisuuden avulla (Alstom)

Edellä esitelty Alstom Citadis raitiovaunun räätälöitävyyden kattavuus on tyypillistä suuria määriä valmistettävien vaunumallien kohdalla valmistajasta riippumatta. Kyseinen räätälöinti on tuotteen ulkoista variointia, eli asiakaslisäarvoa luovaa variointia. Vaunun rakenneratkaisujen sisäistä eli kannattamatonta variointia valmistajat pyrkivät vähentämään vakioituilla rakenneosilla.

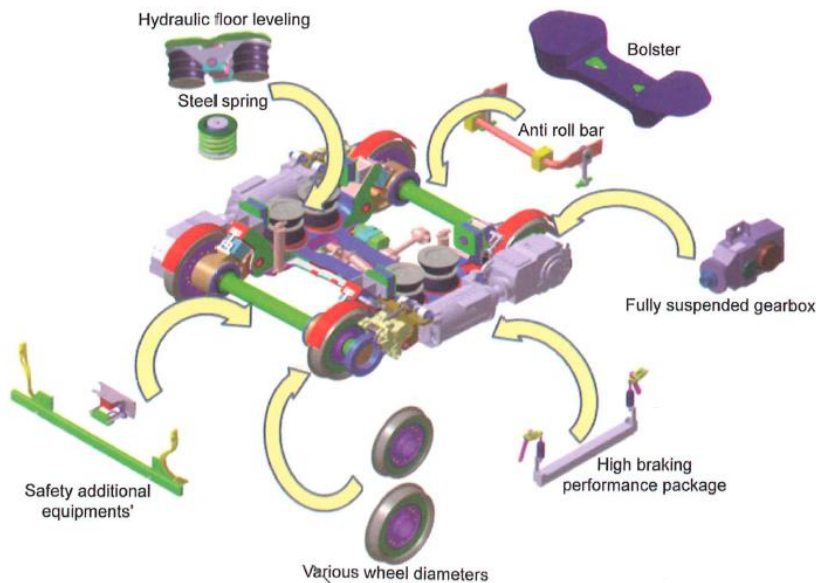
Esimerkkinä sisäisen varioinnin vähentämisestä käy oheisessa kuvassa (KUVA 15) esitetty Bombardier Flexity Swift-vaunu, jonka kaikki päärakenteet perustuvat modulaarisiin rakenneosiin. Valmistajan ilmoittaman mukaan modulaarisen rakenteen ansiosta vaunujen valmistukseen kuluva aika on noin 30 – 40 % lyhyempi kuin tavanomaisella rakenteella toteutettuna. Modulaarisuuden todetaan parantaneen merkittävästi myös vaunun kunnossapidettävyyttä. Kirjoittaja olettaa jokaisen rakennemuodulin sisältävän ennalta suunnitellut ja vakiomittaiset vaihtoehdot rakeneosat, joiden asettamisessa rajoissa asiakasräätälöinti on mahdollista. Moduulien välisiin liitospintoihin tai ”vakiovaluuleihin” kohdistuvat räätälöinnit eivät todennäköisesti ole mahdollisia, ei ainakaan ilman merkittäviä kustannusvaikutuksia. On tavanomaista, että räätälöivät ominaisuudet halutaan tiukasti rajata ennalta suunniteltujen moduulijakojen mukaisesti ja vielä tiettyihin olemassa oleviin ratkaisuihin perustuen. Näin toimimalla pyritään minimoimaan projektiokohtaisten vaatimuksien tuotekehitys- ja valmistuskustannuksia lisäävä vaikutus. Liitospintojen lisäksi moduulien sisällä on tyypillisesti ratkaisuja, joiden halutaan säilyvän muuttumattomana. Esimerkkinä tällaisesta on vakioitu seinärakenteen mitoitus, jonka seurauksena vaunun ikkuna-aukkojen koko pysyy muuttumattomana koko tuoteperheen läpi. Onkin hyvin yleistä, että samaan tuoteperheeseen

seen kuuluvat vaunumallit näyttävät ulkopuolelta katsottaessa vaunun kylkien osalta hyvin samanlaisilta, erojen rajoittuessa pelkästään vaunun väriytykseen.



KUVA 15. Bombardier Flexity Swift raitiovaunun modulaarinen rakenne (Bombardier)

Modulaarisuutta hyödynnetään myös vaunuissa käytettävissä järjestelmissä. Esimerkkinä toimii Bombardierin valmistama FLEXX Urban 3000 teli (KUVA 16). Kyseessä on matalalattiaraitiovaunuihin kehitetty telituotealusta, jossa on pyritty yhdistämään korkea komponenttien standardointiaste ja hyvä räätälöitävyys. Telistä on olemassa variantit yleisimpiin raide- ja vaunuleveyksiin. Raideleveyden muuttuessa telirungon leveys muuttuu, mutta muilta osin eri varianteissa käytetään pääasiassa samoja komponentteja. Yhteisiä komponentteja ovat muun muassa moottorivaihdeyksikkö, jarru- ja jousituskomponentit. Vastaavasti raideleveyden pysyessä muuttumattomana samasta telirungosta voidaan varustella joko moottoroitu tai moottoroimaton teli. Teli on edelleen räätälöitävissä joko kiinteäteliseen tai lisättävän bolster-palkin avulla perinteisellä kääntyvällä telillä varustettuun raitiovaunuun. (Zanutti 2009, 57.)



KUVA 16. Bombardier FLEXX Urban 3000 telituotealustan varustelumahdollisuudet (Zanutti 2009, 57)

Mainittujen telin perusrakenteen räätälöintimahdollisuuksien lisäksi telistä voidaan konfiguroida lisävarustelun avulla eri vaatimuksiin ja käyttöympäristöihin soveltuva tuote. Konfiguroitavia ominaisuuksia ovat muun muassa eri akselikuormille ja käyttölämpötiloille soveltuvat ratkaisut. (Zanutti 2009, 57.)

Raitiovaunu on kaupunkiympäristössä hyvin näkyvä ja huomiota herättävä ajoneuvo. Sen muotoilulla ja väriyksellä voidaan muokata kaupunkikuvaa ja lisätä kaupungin tunnistettavuutta. Moderilla vaunun muotoilulla voidaan esimerkiksi henkiä kaupungin uudistushalukkuutta. Toisaalla vaunun visuaalisen ulkonäön voidaan haluta olevan linjassa vanhan ja arvokkaan rakennuskannan kanssa. Uuden kaluston ilmeen halutaan usein yhdistyvän kaupungissa käytössä olevaan kalustoon jonkin muotoiluseikan tai ainakin väriksen osalta.

Kuvassa 17 voi nähdä esimerkin tavanomaisesta poikkeavasta vaunumuotoilusta ja kaupungille tunnusomaisen väriksen käytöstä. Modulaarinen rakenne mahdollistaa vaunun ulkonäköön ja myös matkustamon ilmeeseen kohdistuvien muutoksien toteuttamisen kustannustehokkaasti. Vaunun keulan ja perän paneelien muotoiluvaihtoehdot tarjoavat asiakkaalle mahdollisuuden valita parhaiten kaupunkikuvaan sopiva raitiovaunun ilme. Kuten aiemmin todettua vaunun kylkien alueilla muotoiluvapauksia ei juuri ole teknisistä syistä johtuen. Kylkipintojen mittasuhteet seuraavat ikkuna- ja oviaukkojen kokoa ja vaunun kokonaisleveyteen vaikuttavaa muotoilua rajoittaa

vaunun ulottumamitat. Sivuseinillä vaunun visuaaliseen ilmeeseen vaikuttavat muotoilumahdollisuudet rajoittuvat värityksen lisäksi vaunun kattoverhoilun ja jossain määrin myös teliä suojaavien paneelien muotoiluun.



*KUVA 17. Raitiovaunujen muotoiluesimerkkejä maailmalta, Marseillen Bombardier Flexity Outlook vasemmalla ja Le Mansin Alstom Citadis oikealla (Bombardier, Alstom)*

Koska vaunun kylkien alueella muotoilumahdollisuudet ovat hyvin rajalliset, vaunun keulan ja perän räätälöitävyydellä on suurempi merkitys. Raitiovaunun rakenteen näkökulmasta keulan ja perän muotoilun räätälöitävyys ei ole mitenkään merkittävä asia. Muotoilussa on toki joitain teknisiä ja turvallisuuteen liittyviä rajoitteita, mutta pääosin paneelien muoto on vapaa. Teknisistä rajoitteista mainittakoon muun muassa tuulilasin muoto ja keulan puskin- ja törmäysrakenteet. Turvallisuuteen liittyviä muotoilurajoitteita ovat esimerkiksi kuljettajan katvealueeseen ja jalankulkijaturvallisuuteen vaikuttavat tekijät. Paneelien muotoilulla voidaan esimerkiksi pyrkiä estämään jalankulkijaa joutumasta vaunun alle mahdollisessa törmäystilanteessa (KUVA 18).



*KUVA 18. Artic-raitiovaunun keulan muotoilutarkastelu jalankulkijaturvallisuuden näkökulmasta (Helsingin kaupungin liikennelaitos, HKL)*

## 5 TUTKIMUSKOHDE JA MODULOINTIEHDOTUKSET

### 5.1 Artic-raitiovaunu

Helsinkiin kehitetty Artic-raitiovaunu (KUVA 19) on kolmesta vaunumoduulista koostuva yhteen suuntaan ajettava matalalattiavaunu. Vaunussa on neljä teliä, joissa jokaisessa on kaksi perinteisellä läpimenevällä akselilla varustettua moottoroitua pyöräkertaa. Vaunu on kehitetty Helsingin kantakaupungin osin hyvin vanhalle raitiotieverkolle, jonka raideleveys 1000 mm. Helsingin kantakaupungin raitiotieverkko on tavanomaista raitiotietä, joten Artic-vaunu on raitiovaunu, eikä pikaraitiovaunu. Vaunussa käytetyn tekniikan puolesta vaunu tosin soveltuisi käytettäväksi myös pikaraitiotiellä. Vaunun perinteisestä kääntyvästä telirakenteesta johtuen vaunun matkustamon lattia ei ole täysin tasainen, vaan lattia on korotettu telien kohdalta. Lattian korotuksilla, eli podestereilla on järjestetty tilaa kääntyvien telien pyörille. Vastaava podesterirakenne on yleisemmin käytössä muun muassa matalalattiabusseissa. Oviaukkojen kohdalla lattiat on varustettu liuskoin, joilla kynnyskorkeus on asetettu lähelle rataverkossa käytettyä laiturikorkeutta.



KUVA 19. Helsingin Artic-raitiovaunu (Helsingin kaupungin liikennelaitos, HKL)

Vaunun erityispiirteinä muihin markkinoilla oleviin vastaaviin raitiovaunuihin verrattuna voidaan pitää ratkaisuja, joilla on pyritty varmistamaan hyvä huollettavuus ja korjattavuus mahdollisten vaurioiden syntyessä. Kunnossapidon tarpeiden huomioimisen tavoitteena on päästä mataliin elinkaarikustannuksiin ja myös varmistaa vaunujen hyvä käytettävyys. Korjaustarpeen ilmenny-

tyä vaunu tulee voida palauttaa mahdollisimman nopeasti takaisin liikenteeseen. Nopea korjaus esimerkiksi kolaritilanteissa on mahdollistettu käyttämällä yleisesti raitiovaunuissa käytettyjen liimattujen rakenteiden tilalla ruuvi- tai pikakiinnitteisiä rakenteita. Tilaajan vaatimukset näkyvät muun muassa vaunussa käytetyissä kiinnitysratkaisuissa. Tavoitteena on ollut välttää valmiissa vaunussa näkyviin jäävät kiinnitystarvikkeet. Ratkaisujen taustalla on korkean visuaalisen vaatimuksen ja nopean vauriokorjauksen lisäksi myös hyvä puhtaana pidettävyys, joka on oleellinen osa vaunujen päivittäistä kunnossapitoa. Hyvä vauriokorjattavuus on huomioitu vaunun ulko- ja sisäpinoissa käytetyissä rakenteissa siten, että korjaustoimenpiteet voidaan useimmiten kohdistaa vain vaurioituneisiin osiin. Yllä luetellut tavanomaisista raitiovaunuissa käytetyistä ratkaisuista poikkeavat vaatimukset ovat ohjanneet vaunussa käytettyjä rakenneratkaisuja monelta osin monimutkaisemmiksi ja osin myös valmistus- sekä materiaalikustannuksiltaan korkeammiksi.

Vaunun rakenteissa on huomioitu Helsingin vaativan raitiotieverkon erityispiirteet ja ilmastolliset vaatimukset. Matalalattiavaunuissa yleisesti käytetyt teliratkaisut ovat osoittautuneet soveltuvan huonosti tiukkoja vaaka- ja pystysuuntaisia kaarteita sisältävälle raitiotieverkolle. Artic-vaunun vapaasti kääntyvien telien ansiosta radan muodoista aiheutuvat voimat eivät välity vaunun korirakenteisiin samalla tavalla kuin kiinteillä teleillä varustetussa vaunussa ja näin ollen korin väsyminen ei todennäköisesti muodostu samalla tavalla ongelmaksi. Pääkaupunkiseudun vaativien ilmastolo-olosuhteiden vuoksi vaunun materiaalivalinnoissa korostuvat hyvin korroosiota kestävä materiaalit. Suuret lämpötilanvaihtelut, teiden suolaus ja meri-ilma aiheuttavat vaunun rakenteille suuren korroosikuormituksen, jonka vaikutuksia on pyritty minimoimaan tavanomaisesta poikkeavin ratkaisuin. Vaunun korirakenteen pitkäikäisyys osaltaan mahdollistaa vaunun elinkaaren jatkamisen järjestelmäpäivitysten ja esimerkiksi sisustuksen modernisoinnin avulla.

Vaunun kehitys on tehty tiiviissä yhteistyössä vaunun tilanneen Helsingin Kaupungin Liikennelaitoksen (HKL) kanssa. Yhteistyö on mahdollistanut tilaajalle kertyneen kokemukseräisen tiedon hyödyntämisen vaunun kehityksessä, mikä on tärkeä tekijä ottaen huomioon valmistajalta puuttuneen kokemuksen raitiovaunujen kehittämisestä ja valmistamisesta. Ennen Artic-vaunun kehitystä valmistajan kokemus raitiovaunuista rajoittui Helsingin edellisen matalalattiavaunukaluston kokoonpanoon, jolloin yritys toimi Helsinkiin toimitettujen Variotram-vaunujen sopimusvalmistajana. Alkun (2015b, viitattu 5.8.2016) mukaan HKL osallistui uusien vaunujen teknisten ratkaisujen määrittämiseen alalle epätyypillisen yksityiskohtaisesti. HKL:n erityiseen suhtautumiseen uuden vaunun hankinnassa lienee syynä Variotram-vaunujen käytöstä kertyneet huonot kokemukset. Lisäksi tilaaja piti markkinoilla olevien modernien raitiovaunujen ominaisuuksia sopimattomina



Helsingin rata- ja ilmasto-olosuhteisiin. Tilaaja halusi, että uuden vaunun teknisissä ominaisuuksissa kaikki oli tehty ”varman päälle”.

## 5.2 Modulaarisuus Artic-raitiovaunussa

Transtech aloitti Artic-vaunun suunnittelun HKL:n ulkopuolisella insinööritoimistolla teettämän vaunukonseptikehitystyön jälkeen. Konseptikehityksen tulokset ohjasivat vaunun perusrakenteen alusta alkaen tilaajan haluamaan suuntaan. Tilaaja halusi uuden vaunun poikkeavan ominaisuuksiltaan seuraavien, tilaajan mukaan tyypillisten 2000-luvun raitiovaunujen ominaisuuksien suhteen.

- melu ja värinä
- sivusuuntaiset heilahdukset
- lämmityksen suuri energiankulutus
- suuri pyörien ja kiskojen kulutus
- huono etenemiskyky erikoisolosuhteissa
- vaikea huollettavuus ja suuri huoltotarve
- korkea elinkaarikustannus (Heikkilä 2013, 3, viitattu 10.12.2016.)

Tilaajan kiinnostus vaunun teknisiä ratkaisuja kohtaan ei loppunut konseptikehitykseen, vaan tilaaja osallistui tiiviisti myös varsinaiseen tuotesuunnitteluun ja vielä hyvin yksityiskohtaisella tasolla. Voidaankin sanoa asiakkaan suunnitelleen tuotetta yhdessä valmistajan kanssa. Kuten aiemmin mainittu, toiminnan seurauksena vaunuvalmistaja sai tilaajalta arvokasta tietoa, joka perustui tilaajan useamman vuosikymmenen kokemukseen raitiovaunujen operoinnista Helsingissä. Toisaalta tilaajan tiivis osallistuminen vaunukehitykseen ohjasi ratkaisuja kyseessä olevan projektin tarpeita vastaaviksi ja monelta osin rakenne muodostui hyvin integroiduksi ja vahvasti projektituotteen tunnuspiirteet omaavaksi. Ratkaisuja ei arvioitu siitä näkökulmasta, miten ne soveltuisivat käytettäväksi muissa projekteissa tai miten ne olisivat tukeneet tuotteen kehittämistä modulaariseksi.

Yllä mainitun toimintatavan seurauksena Artic-vaunun rakenteiden modulaarisuus rajoittuu pääasiassa järjestelmiin, jotka on toteutettu järjestelmätoimittajan vakiotuotetta käyttämällä. Esimerk-

kinä tällaisesta on vaunun ulko-ovi käyttökoneistoineen. Ovijärjestelmä kiinnitetään vaunun koriin vakioitujen liitospintojen avulla ja kaikilla oviaukoilla käytetään samoja komponentteja. Muita modulaarisiksi luettavia järjestelmiä ja osia ovat teli, vaunun päätyjen korirakenne, nivelalueen ylikulku ja palkeet, matkustamon istuimet ja osa vaunun katolle sijoitetuista sähkö- ja ilmastointilaitteista. Yksityiskohtaisemmalla tasolla tarkasteltaessa esimerkiksi vaunun sisä- ja ulkoverhouspaneelin kiinnitysmenetelmät perustuvat monelta osin vakioituihin liitospintoihin, mutta erimittaisten paneelien ja kiinnityksessä tarvittavien osien suuresta määrästä johtuen varsinaisesta modulaarisuudesta ei voida puhua.

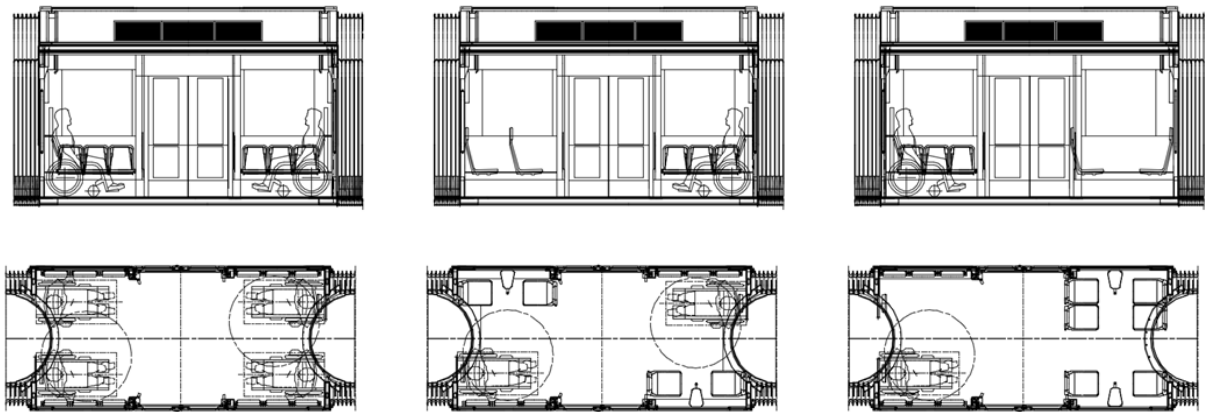
### **5.3 Ehdotukset Artic-vaunun modulaarisista ratkaisuista**

Tämä luku esittelee kirjoittajan ehdotukset nykyisen Artic-vaunun rakenteisiin pohjautuvista modulaarisista ratkaisuista. Ehdotuksissa on huomioitu olemassa olevan vaunun rakenteen asettamien rajoitteiden lisäksi työn kirjoittamishetkellä varmistuneen jatkokehitysprojektin vaatimukset. Muutosehdotukset sisältävät ehdotuksia rakenteen sisäisestä moduloinnista ja asiakaslisäarvoa lisäävästä ulkoisesta moduloinnista. Sisäisen moduloinnin tavoitteena on valmistus- ja materiaalikustannusten pienentäminen, kun taas ulkoisen moduloinnin tarkoituksena on asiakasräätälöityvyyden lisääminen. Ehdotetuissa ratkaisuissa on pyritty joustavuuteen, jotta ne soveltuisivat sellaisenaan käytettäviksi myös tulevilla projekteilla. Vahvasti integroitu olemassa oleva vaunurakenne ja käynnissä olevan projektin vaatimukset rajaavat mahdollisuuksia modulaarisuuteen tähtääviin muutoksiin merkittävästi.

#### **5.3.1 Mukautuva matkustamovarustelu**

Raitiovaunun pitkän elinkaaren ja matkustajakapasiteetin sekä -tarpeiden kehittymisen ennustamisen vaikeuden vuoksi vaunun matkustamon rakenteiden tulee mahdollistaa sisätilojen mukauttaminen muuttuviin tarpeisiin. Vaunun teli- ja korirakenteet määrittävät pitkälti telien päällä olevan matkustamon varustelun ja istuinjärjestelyt. Näin ollen sisätilojen joustavuuteen tähtäävät toimenpiteet on kohdistettava niihin kohtiin vaunua, joissa telejä ei ole. Vaunun monikäyttötilan seinä- ja lattiarakenteissa varaudutaan vaihtoehtoisin kalustekiinnityksiin, jotka mahdollistavat kalustejärjestelyn muunneltavuuden (KUVA 20). Seinärakenteissa huomioidaan eri istuintyyppien kiinnitys-

vaatimukset ja mahdolliset otetankojen kiinnityspisteet. Eri istuintyyppien, tankojen ja pöydän liitospintojen mitoitus vakioidaan, jolloin niiden määrää ja sijaintia vaunussa voidaan vaihtaa joustavasti ilman tarvetta seinärakenteen muutokselle. Pyörätuolipaikoille tarvittavien nojatukien, turvavyökiinnityksien tai tulevaisuudessa mahdollisesti tarvittavien polkupyörätelineiden liitospinnat yhtenäistetään istuimien ja tankojen kiinnityspisteisiin sopiviksi. Jotta rakenne mahdollistaisi varustelun sijoittelun mahdollisimman joustavasti, vaunun korin puoleinen kiinnityspinta tulee toteuttaa vaunun pituussuuntaisilla kiskoilla.

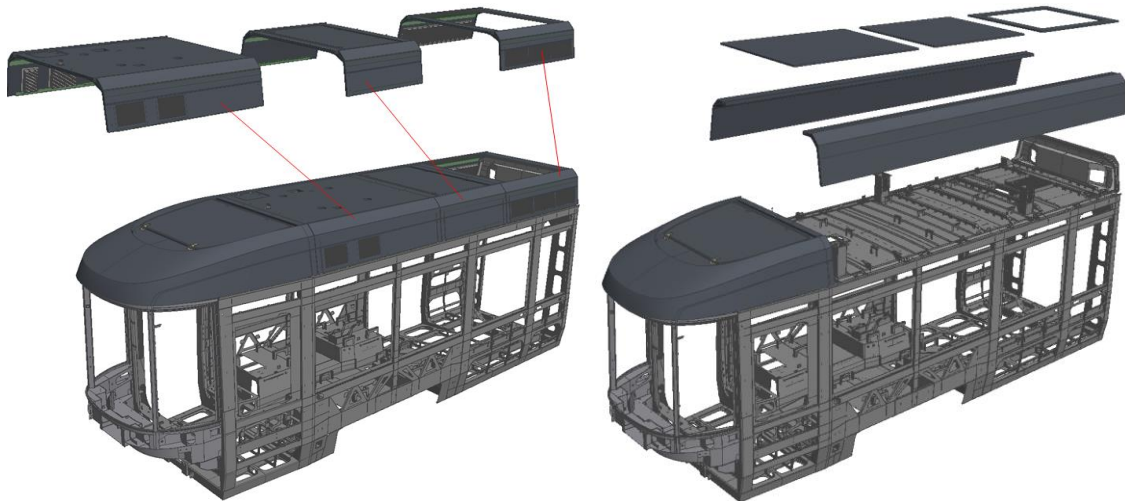


KUVA 20. Esimerkkejä vaunun matkustamon monikäyttötilan vaihtoehtoisista kalustejärjestelyistä

### 5.3.2 Vaunun ulkopuolen kattopanelointi

Raitiovaunun katon laitesijoittelu on riippuvainen vaunun konstruktiosta. Laitesijoittelussa määräviä tekijöitä ovat muun muassa telien, virroittimien ja ilmanvaihtolaitteiden sijainti. Katolle sijoitettavat taajuusmuuttajat on edullista sijoittaa telillisiin vaunumoduuleihin. Matkustamon ilmastointilaitteen sijoituksessa on huomioitava ilmanvaihtokanavien järkevän toteutustavan lisäksi laitteen sijainti mahdollisimman lähellä taajuusmuuttajia. Ohjaamon ilmanvaihtolaite tulee vastaavasti olla ohjaamon läheisyydessä turhan kanavoinnin välttämiseksi. Virroitin tai virroittimet vastaavasti halutaan yleensä sijoittaa vaunun päätymoduuleihin. Yllämainittujen lisäksi laitesijoittelussa on tavoitteena laitteiden ja etenkin vaunumoduulien välisten kaapelointien minimointi. Pitkät kaapelivedot lisäävät vaunun painoa ja vaunun varusteluun kuluva-aikaa. Laitesijoittelussa on huomioitava myös vaunun painon jakautuminen asetettujen maksimaalisten akselikohtaisten kuormien puitteissa.

Edelle mainituista syistä johtuen vaunun katolle tehtävää laitesijoittelua on tarvetta tarkastella aina vaunun konstruktion muuttuessa. Konstruktion muutoksella tarkoitetaan esimerkiksi vaunumoduulien lisäämistä tai poistamista, tai yksittäisen vaunumoduulin pituuden muutosta. Koska laitesijoittelua ei näin ollen voi ”jäädyyttää”, on sen aiheuttamat muihin vaunun rakenteisiin kohdistuvat muutokset pyrittävä minimoimaan. Tätä taustaa vasten kirjoittaja ehdottaa, että vaunun ulkopuolisissa kattopaneloinneissa luovutaan laitekohtaisesti mitoitetuista paneeleista. Panelointi toteutetaan kattopaneloinnin sivujen osalta koko vaunumoduulin pituisella komposiitti- tai alumiiniprofiileihin perustuvalla rakenteella. Kattopaneloinnin yläpinnan muodostavat lasikuitu- tai alumiinikerroslevyt, jotka varustellaan tarvittavin huoltoluukuin ja aukotuksin (KUVA 21).



*KUVA 21. Periaatekuva kattopaneloinnin muutosehdotuksesta yhden vaunumoduulin osalta, vasemmalla on nykyinen ja oikealla ehdotuksen mukainen ratkaisu*

Oleellista rakenteessa on säilyttää joustavuus kattopaneloinnin sivu- ja yläpinnan osien välisessä paikoituksessa erityisesti vaunun pituussuunnassa. Tämä mahdollistaa katolle sijoitettavien laitteiden mittoihin tehtävät muutokset ja myös laitteiden uudelleen sijoittelun ilman, että sillä on vaikutusta kattopaneloinnin osiin yksittäisten levymäisten paneelien muutosta lukuun ottamatta. Ratkaisu mukautuu joustavasti vaunun pituuden ja leveyden mukaisesti ja muutokset voidaan toteuttaa ilman merkittäviä valmistusteknologiakustannuksia. Rakenne mahdollistaa myös raitiovaunuissa tavanomaisesti käytetyn ratkaisun, jossa katon yläpintaa ei ole lainkaan paneloitu. Yläpinnan panelointi voidaan jättää pois, mikäli se ei sisälly projektin vaatimuksiin. Kattopaneloinnin tukirakenne voidaan toteuttaa Artic-vaunun tapaan koriin kiinnitettävillä metalli- tai lasikuitukaarilla, joiden avulla sade- ja sulamisvedet johdetaan korin vesikouruihin. Laitteiden välillä mah-

dollisesti tarvittavat osastoinnit toteutetaan kaariin kiinnitettävillä lasikuitu- tai alumiinikerroslevyillä. Kaarien kiinnitys koriin toteutetaan siten, että niitä voidaan joustavasti liikuttaa vaunun pituussuunnassa.

Ehdotuksen mukaisesti toteutettuna paneelien käsittely kaikissa työvaiheissa valmistuksesta kunnossapitoon on nykyisin käytössä olevaa ratkaisua helpompaa. Levymäisten osien logistiikka voidaan järjestää tehokkaasti ja osien käsittely eri työvaiheissa onnistuu ilman nosturia. Asiakasprojektien toisistaan poikkeaviin muotoiluvaatimuksiin voidaan varautua kattopaneloinnin sivupintojen profiilin yksityiskohdilla, joiden avulla paneelin näkyvälle pinnalle on kiinnitettävissä lisäosia halutun visuaalisen lopputuloksen aikaansaamiseksi.

Edellytyksenä joustavan laitesijoituksen toteutukselle on korin katolla olevien laitekiinnitykseen käytettävien korvakkeiden korvaaminen vaunun pituussuuntaisilla ja katon reunoille sijoitetuilla kiinnityskiskoilla. Kiinnityskiskot muodostavat vakioiitospinnan katolle sijoitettaville laitteille ja samalla myös paikoitukseltaan joustavan kiinnityspisteen kattopaneelien tukikaarille. Ehdotuksen mukaisten kiinnityskiskojen käyttö edellyttää itsekantavien laitekoteloiden käyttöä, koska laitteet tukeutuvat vaunun koriin vain katon reunoilta. Vakioituja laitekoteloita käytettäessä kotelot voidaan kiinnittää kiskoihin adapteriosien avulla. Kiskojen tilalla voidaan vaihtoehtoisesti käyttää koriin hitsattua profiilia, joka on rei'itetty riittävän tiheästi ajatellen tarvittavaa paikoituksen portaitaisuutta.

### **5.3.3 Seinärakenteen mitoituksen vakiointi**

Ehdotus tähtää vaunun rakenteiden mitoituksen vakioinnin mahdollistamaan asennettävien nimikkeiden vähentämiseen. Ratkaisu ei varsinaisesti tee rakenteesta modulaarista, mutta ehdotuksella pyritään saavuttamaan samoja etuja kuin tuotteen moduloinnilla yleensä. Rakenteen vakioinnin avulla yksittäisten nimikkeiden määrä vähenee yhteiskäyttöisyyden ansiosta niin varusteluosissa kuin korirakenteessakin. Muutos madaltaa materiaalikustannuksia nimikekohtaisten kappalemäärien kasvun myötä. Etua on saavutettavissa myös tuotannossa rakenteiden vakioimisen tehostaessa valmistus- ja varustelutyötä. Vaunun sisä- ja ulkopuolen varusteluosien mitoitus ja jako noudattaa nykyisellään pitkälti vaunun ikkuna-aukkojen mitoitusta. Yhteneväisellä mitoituksella on pyritty varmistamaan hyvä kunnossapidettävyyden muun muassa rajaamalla vaihdetta-

vien osien kokoa. Rakenteen yksinkertaisuuden säilyttämiseksi yhtenevä mitoitus on syytä säilyttää myös jatkossa. Näin ollen varusteluosien mitoituksen yhtenäistämistä varten korin ikkunaukkojen mitoitus tulisi vakioida siten, että erimittaisia ikkunaleveyksiä olisi mahdollisimman vähän. Vaunumoduulien pituuden vaihtelun vaikutus ikkuna-aukkojen leveyteen kompensoidaan tarvittaessa leveämpien koripilarien ja verhouspaneelien käytöllä ennalta sovitussa paikassa. Mitoituksen vakioinnissa työkaluna voidaan käyttää parametrintisääntöjä vaunun konseptisuunnittelusta alkaen. Sääntöjen käyttö ohjaa samojen rakenteiden toistuvaan uudelleen hyödyntämiseen, jonka ansiosta myös valmistusteknologiaa on kehitettävissä tehokkaammaksi. Parametrintisääntöjen tarkoitus on muodostaa ylä- ja alarajat sekä porrastus rakenteiden mitoitukselle. Säännöt toimivat siis pohjana sille, minkälaisia tuotteita halutaan tai ylipäätään voidaan valmistaa.

#### **5.3.4 Vaunun nivelalueen kaapelituenta**

Vaikka vaunun katolle tehtävällä laitesijoittelulla voidaan oleellisesti vaikuttaa vaunumoduulien väliseen kaapelointitarpeeseen, ei moduulien väliseltä kaapeloinnilta voida kuitenkaan kokonaan välttyä. Artic-vaunussa vaunumoduulien välisen ylikulun kaapelikannatus on tehty moninivelisellä mekanismilla. Kaapeleiden keston kannalta oleellista on, että niiden reititys ja kiinnitys on toteutettu siten, että kaapeleiden pienimmät sallitut taivutussäteet eivät alitu missään tilanteessa vaunun liikkussa rataverkolla. Nivelmekanismin tehtävänä on myös estää kaapeleiden hankautuminen toisiinsa tai muuhun vaunun rakenteeseen. Työvaiheena vaunumoduulien välinen kaapelointi on aikaa vievä, koska kaapelit asetetaan yksi kerrallaan moduulien väliin asennettuun kaapelikannattimeen. Asennuksien onnistumisen todennus valmiiden rakenteiden purkamisineen lisää työmäärää entisestään. Näin ollen muutosehdotuksena on vaunumoduulien välissä käytettävän kaapelituennan muuttaminen vaunusta irrallaan kokoonpantavaksi kokonaisuudeksi. Ehdotuksen mukaan kaapeleiden ja kytkentäkoteloiden läpivientilaippojen asennus kaapelitukeen tehdään kokoonpanojigissä, joka sisältää vaunumoduulien päätyjen mekaaniset ja sähkömekaaniset rajapinnat. Nivelletyllä, vaunuvälin mitoitusta vastaavalla jigillä voidaan matkia vaunumoduulien välillä rataverkolla tapahtuvaa liikettä. Kaapelituen toiminta ja kaapeliasennuksen onnistuminen voidaan testata liiketarkastelulla ennen kokoonpanon asennusta vaunuun. Jigin mitoituksessa tulee huomioida mahdollisuus vaunun leveyden ja vaunumoduulien välisen etäisyyden sekä kääntökulmien muutoksiin, jolloin sitä voidaan hyödyntää eri vaunukonstruktioissa. Ehdotuksen mukainen toteutustapa säästää aikaa vaunun varustelussa ja käyttöönottotestauksessa. Varustelutyö

tapahtuu normaaleissa työasennoissa yhdessä työasemassa, jolloin työn tehokkuus kasvaa ja laatu paranee. Testauksessa rakenteita ei nykyisin käytössä olevan tavan mukaisesti tarvitse purkaa kaapelituennan onnistumisen varmistamiseksi. Ratkaisusta tekee modulaarisen kaapelituen ja vaunun korien välisten liitospintojen vakiointi sekä ratkaisut, jotka tekevät itse kaapelituesta yhteensopivan käytettäväksi eri vaunuleveyksillä. Vaunumoduulien toisistaan poikkeavista sähkövarusteluista johtuen kaapelituen tulee soveltua eri kaapeliyhdistelmien reititystä varten. Edellytyksenä ehdotuksen mukaiselle toteutukselle on kaapeleiden kytkentäkoteloiden sijoittaminen vaunuvälin molemmin puolin, jolloin kaapeleiden pituus säilyy mielekkäänä kokoonpanojigissä tehtävää esivarustelua ajatellen. Lyhyet kaapelipituudet ovat eduksi myös myöhempää kunnossapitoa silmälläpitäen.

## 6 YHTEENVETO JA POHDINTA

Työn lähtöajatuksena oli selvittää miten modulaarisuutta voidaan hyödyntää Artic-raatiovaunussa ja sen jatkokehityksessä. Ajankohta työlle oli sopiva, sillä työn kirjoittamishetkellä aloitettiin uuden, mutta olemassa olevaan vaunuun vahvasti pohjautuvan raitiovaunumallin suunnittelu. Samoihin aikoihin yrityksen johdossa aloitettiin selvityksiä tuotealustaan perustuvan raitiovaunumallin kehittämiseksi. Modulaarisuuden ja tuotealustaperustaisen tuotteen liittyessä vahvasti toisiinsa ajankohta modulaarisuuteen liittyvän keskustelun syntymiseen yrityksen tuotekehityksessä oli otollinen. Työn johdanto-osuudessa yhdeksi työn tavoitteeksi on mainittu modulaarisuuteen liittyvän ajatustenvaihdon lisääntyminen yrityksen eri toiminnoissa. Kirjoittajan mielestä tavoite toteutui ainakin osittain. Myötävaikuttimena keskustelun lisääntymiseen oli luonnollisesti myös yritysjohdon avaus tuotealustaan perustuvan vaunun kehittämisestä.

Aihetta lähestyttiin selvittämällä mitä moduuleilla ja modulaarisuudella yleensä tarkoitetaan. Työssä tarkasteltiin perusteita ja edellytyksiä modulaarisen tuotteen kehitykselle ja tuotiin esille modulaarisuuden aiheuttamia lieveilmiöitä varsinaisen tuotteen ja sen kehityksen sekä valmistuksen näkökulmista. Teoriaosuudessa tehtiin vertailua integroidun ja modulaarisen rakenteen periaatteellisista eroista. Asia oli merkityksellinen tämän työn kohdalla, koska työn tutkimusosuudessa tehdyt modulointiehdotukset kohdistuvat raitiovaunuun, jonka rakenteellinen toteutustapa on vahvasti integroitu. Olemassa olevan vaunun rakenneratkaisut ja kirjoitushetkellä käynnissä olleen projektiin vaatimukset yhdessä rajasivat tehokkaasti modulointimahdollisuuksia. Nopeasti kävi ilmi, että ehdotukset olisi rajattava vaunun rakennearkkitehtuurissa hyvin matalalle, eli komponenttitalolle. Näin ollen toteutuessaankin moduloinnilla saavutettavat edut jäisivät rajallisiksi, hyötyjen kohdistuessa valmistettavuuteen ja jossain määrin myös räätälöitävyyden lisäämiseen.

Arkkitehtuurin ylempiin tasoihin, eli tuotevalikoimaan tai tuotteeseen kohdistuvien modulointiehdotuksien kehittäminen olisi vaatinut huomattavasti tätä työtä kattavamman selvitystyön. Ylemmän tason modulaarisuuden lisääminen olisi edellyttänyt käytettyjen rakenneratkaisujen laajamittaista uudelleensuunnittelua, jotka tietyiltä osin olisivat voineet olla ristiriidassa käynnissä olleen projektin vaatimuksien kanssa. Mikäli yrityksessä päätetään tulevaisuudessa toteuttaa laajempi selvitys tuotteen moduloinnista, kirjoittaja pitää MFD -menetelmän hyödyntämistä varteenotettavana vaihtoehtona ohjaamaan tuotekehitystyötä. Analyysin tuloksena syntyvä rakennearkkitehtuuri tukisi myös tuotealustaan pohjautuvan raitiovaunumallin kehitystä. Analyysin toteuttaminen siten, että



siitä olisi tosiasiallista hyötyä tuotteen moduloinnissa edellyttäen yrityksen eri toimintojen osallistumista ja työpanosta. Selvitys olisi toteuttava hankinnan, tuotekehityksen ja myynnin yhteistyöllä ja sen toteuttaminen tulisi olla yrityksen johdon teknologiastrateginen päätös.

Selvitystä seuraavan tuotekehityksen ja suunnittelun pääasiallisena tavoitteena tulisi olla markkinalähtöisesti varioituvan modulaarisen vaunurakenteen syntyminen. Kirjoittajan näkemyksen mukaan tuotekehitys voitaisiin toteuttaa kahdella vaihtoehtoisella mallilla. Ensimmäisessä mallissa hanke toteutetaan omana tuotekehitysprojektina, asiakasprojektin sijaan. Toimintamallin etuna on, että suunnitteluratkaisut voidaan priorisoida vain tuotealustan vaatimuksien mukaisesti. Erillisen tuotekehitysprojektin haittapuolena ovat sen luomat kustannukset, joiden hyväksymistä voisi helpottaa, mikäli kustannukset mielletäisiin useamman projektin osalle jakautuviksi elinkaarikustannuksiksi. Vaihtoehtoinen ja pitemmän aikavälin tapa on tuotealustaan pohjautuvan vaunumallin ratkaisujen kehittäminen asiakasprojekteihin tehtävän suunnittelun rinnalla. Tällöin asiakasprojektin tuotekehitysvaiheessa panostukset kohdistetaan tietyille osa-alueille, joista halutaan syntyvän tuotealustassa hyödynnettävä kokonaisuus. Toimintatapa edellyttää, että projektien suunnitteluvaiheessa tavoite alustapohjaisen tuotteen kehittämiseksi on koko ajan kirkaana mielessä. Riskinä on, että projektien vaatimukset ajavat päivittäisessä työssä pitkäaikaisen tuotealustakehityksen vaatimusten yli.

Kuten aiemmin todettua modulaarisen tuotteen kehittämisen ajurina on usein pyrkimys tuotteiden yhtenäistämiseen ja tuotealustaan perustuvan tuotteen kehittämiseen. Mahdollista tuotealustakehitystä ajatellen tuotealustaa käsittelevässä luvussa esitetään erilaisia lähestymistapoja aiheeseen ja kerrotaan tuotestrategian merkityksestä alustan kehitystä ohjaavana tekijänä. Asiakasvaatimuksien tiedostaminen, tuotevaihtoehtojen rajaaminen, yrityksen resurssien kohdentaminen ja toimittajaverkoston sitouttaminen ovat kaikki olennaisia tekijöitä tuotealustan kehityksessä. Mainittujen seikkojen merkitystä pyrittiin avaamaan muun muassa raitiovaunutotealustan kehitystä käsittelevän esimerkitapauksen avulla. Esimerkissä kuvataan pintapuolisesti yksi vaihtoehtoinen malli tuotealustan kehitysvaiheiden sisällöstä.

Raitiovaunuja käsittelevän teoriaosuuden tarkoituksena oli antaa lukijalle pintapuolinen käsitys raitiovaunujen teknologisesta kehityksestä ja selventää miksi raitiovaunuja ylipäätään suositaan kaupunkien joukkoliikennevälineenä. Raitiovaunujen modulaarisuutta käsittelevässä osuudessa selvitettiin miten eri vaunuvalmistajat hyödyntävät modulaarisuutta tuotteissaan. Markkinointimateriaalien ja erilaisten alan julkaisujen perusteella kävi selväksi, että vaunujen modulaarisuutta ja

tuotealustaan pohjautuvuutta pidetään selkeänä myyntivalttina usean valmistajan kohdalla. Modulaarisuuden mahdollistamaa vaunujen räätälöitävyyttä esimerkiksi matkustajakapasiteetin, ulkonäköön liittyvien ratkaisujen ja matkustajatilojen käytettävyyden suhteen korostettiin useassa yhteydessä. Mainitut tekijät toimivat esimerkkeinä tuotteen ulkoisesta moduloinnista. Vastaavasti esimerkkejä vaunujen rakenneratkaisuihin liittyvästä sisäisestä moduloinnista oli vaikeampi löytää. Syynä lienee, että sisäisellä moduloinnilla saavutetaan etua pääasiassa vain tuotteen valmistuksessa, joten sillä ei katsota olevan oleellista merkitystä asiakkaan näkökulmasta. Valmistajan näkökulmasta sisäinen modulointi on kuitenkin merkittävä tekijä vaunun hintakilpailukyyn ja laadun varmistamiseksi.

Kuten aiemmin todettu asiakasprojektien vaatimukset ja tuotteen ominaisuuksien priorisointi vaihtelevat suuresti eri projektien välillä. Tämä johtaa helposti toimintamalliin, jossa jokaiseen projektiin kehitetään oma yksilöllinen tuote. Vallitseva tilanne parantaa pienten ja toiminnaltaan joustavien valmistajien kilpailukykyä, koska he pystyvät ketterästi reagoimaan muuttuviin vaatimuksiin. Toisaalta yksilöllisten tuotteiden valmistaminen kustannustehokkaasti on vaikeaa. Tuotteen räätälöitävyyden rajaaminen heikentäisi pienen valmistajan kilpailukykyä ja näin ollen sitä kirjoittajan näkemyksen mukaan tulisi välttää. Räätälöinnin rajaamisen sijaan olisikin ehkä syytä miettiä miten kustannustehokkuutta voidaan parantaa räätälöitävyyden oleellisesti kärsimättä. Asian edistämiseksi yrityksessä voitaisiin tutkia Artic-vaunun ja siihen pohjautuvien kehitysversioiden moduolintimahdollisuuksia asiakasprojekteihin tehtävän tuotekehityksen yhteydessä. Tällöin painotus olisi tuotteen sisäisessä moduloinnissa ja pääasiallisena tavoitteena vaunussa käytettyjen erilaisten rakenneratkaisujen lukumäärän vähentäminen. Toimenpiteet tulisi kohdistaa osakokonaisuuksiin, joiden modulointi toisi etua rakenteiden yhtenäistämisen aikaansaamana materiaalikustannusten laskuna, valmistuksen ja kokoonpantavuuden tehostumisena sekä osin myös vaunun räätälöitävyyden parantumisena. Muutoksien tavoitteena tulisi olla rakenteellisen joustavuuden lisääminen, jolloin projektikohtaisen räätälöinnin aiheuttamat muutokset voitaisiin rajata vähäisiksi.

Sisäiseen modulointiin tähtäävän tuotekehityksen yhtenä työkaluna voisi kirjoittajan näkemyksen mukaan toimia tuotteen suunnittelussa käytettävät parametrintiohjeet. Ohjeiden tehtävänä olisi ohjata rakenteiden mitoitusta yhtenäiseen ja toistettavaan suuntaan antamalla mitoitusvaihtoehtoja, joista ei poikettaisi ilman laajempaa vaikutusten selvitystä. Valittujen mitoitusvaihtoehtojen tulisi mahdollistaa tuotestrategian mukaisten varianttien valmistus, mutta rajata pois kaikki muut vaihtoehdot.

Ohjeiden tehtävänä olisi siis myös estää ei-toivottujen tuoteominaisuuksien syntyminen. Parametroidu konsepti olisi näin ollen hyvä perusta varsinaiselle tuotesuunnittelulle ohjaten kehitystyötä kohti toivottuja tuotevariantteja. Parametrintiiohjeen laatiminen vaatisi alustakehitystyön tavoin selkeän määrityksen tuotevarianteista, joissa yritys näkee eniten markkinapotentiaalia.

Kuten sanottu Helsinkiin kehitetty Artic-vaunu on integroidulla rakenteella toteutettu projektituote, joka poikkeaa suurelta osin kilpailevista tuotteista. Perusteet vaunun toteutustavalle on helppo ymmärtää. Kyseessä on uusi tuote, jonka ratkaisut toteutettiin tilaajan vahvassa ohjauksessa ja ilman tuotestrategiaa, joka olisi ohjannut tuotteen kehitystä ratkaisuiltaan yleispäteviksi. Näin ollen ratkaisuja kehitettiin vain olemassa olevaa projektia silmälläpitäen sen kummemmin miettimättä, miten ratkaisut toimisivat seuraavissa projekteissa. Projektituotteelle ominaisessa integroidussa rakenteessa päällepäin pieneltä muutokselta vaikuttavan muutoksen toteuttaminen on osoittautunut vaikeaksi. Pienikin muutos käynnistää helposti muutosvyöryn, joka vaatii usein myös muutettavan osan ympäristön suunnittelumuutoksia. Vaunussa käytetyt erikoisratkaisut yhdessä integroidun rakenteen kanssa eivät teknisessä mielessä ole optimaalinen lähtötilanne tulevia projekteja silmällä pitäen. Sen sijaan vaunun kehityksestä ja valmistuksesta organisaatioon ja toimittajaverkostoon kertynyt tietotaito luo hyvät edellytykset tuotteen jatkokehitykselle ja mahdolliseen tuotealustaan perustuvan tuotteen kehitykselle. Kertynyt tietotaito on kirjoittajan näkemyksen mukaan olemassa olevaa tuotetta merkittävästi olennaisempi tekijä tuotealustaan perustuvan tuotteen kehittämisessä. Projektituotteeksi muodostuneen vaunun rakenteita ei sellaisenaan voida merkittävässä määrin hyödyntää tuotealustan tai modulaarisuuden kehittämisessä. Suunnitteluun ja valmistukseen kertyneen osaamisen lisäksi tuotealustan kehitykseen on tuotestrategian avulla tuotava syöte myös markkinoiden trendeistä ja ennusteista. Tällöin tuotekehityksessä tehtävät ja vaunun ominaisuuksia merkittävästi ohjaavat ratkaisut mahdollistavat mahdollisimman pitkän elinkaaren kehitettävälle tuotealustalle.

## LÄHTEET

- Alku, A. 2012. Raitiovaunu tulee taas. Helsinki: Eero Laaksonen.
- Alku, A. 2015a. Raitiovaunujen markkinakatsaus 2014 B. Kotimaiset kaupat Euroopassa. Vantaa: Alkutieto Oy.
- Alku, A. 2015b. Helsingin Raitiovaunukalusto. Viitattu 5.8.2016, <http://www.kaupunkiliikenne.net/Helsinki/helrv.html>.
- APTA, American Public Transportation Association. Standard Development Program. 2013. Modern Streetcar Vehicle Guideline. Washington: APTA.
- Bellis, M. 2007. History of Streetcars and Cable Cars. Viitattu 22.7.2016, <https://www.thoughtco.com/history-of-streetcars-cable-cars-4075558>.
- Blackenfelt, M. & Sellgren, U. 2000. Design of Robust Interfaces in Modular Products. Viitattu 10.12.2016, [https://www.researchgate.net/publication/228537681\\_Design\\_of\\_robust\\_interfaces\\_in\\_modular\\_products](https://www.researchgate.net/publication/228537681_Design_of_robust_interfaces_in_modular_products).
- Blecker, T. & Friedrich, G. 2007. Mass Customization, Manufacturing System. IEEE Transactions of Engineering Management 54 (1), 7.
- Breidert, J. & Welp, E.G. 2003. Tools Supporting the Development of Modular Systems. International Conference of Engineering Design. 2003. Stockholm.
- Ericsson, A. & Erixon, G. 1999. Controlling Design Variants: Modular Product Platforms. Viitattu 24.6.2016, [https://books.google.fi/books/about/Controlling\\_Design\\_Variants.html](https://books.google.fi/books/about/Controlling_Design_Variants.html).
- Erixon, G. 1998. Modular Function Deployment - A Method for Product Modularization. Stockholm: The Royal Institute of Technology.
- Espada, A., Pinto, P. & Henriques, E. 2004. Modular Platform Design of Railway Vehicle Components. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Fine, C.H. 2005. Are You Modular or Integral? Be Sure Your Supply Chain Knows. Viitattu 12.6.2016, <http://www.strategy-business.com/article/05205?gko=8a29a>.
- Forlingieri, M. 2014. Platform Planning and Design for Rail Rolling Stock. Berlin: Berlin Institute of Technology.
- Heikkilä, O. 2013. Artic-raitiovaunu, Paluu tulevaisuuteen. Viitattu 10.12.2016, [http://www.raitio.org/ratikat/helsinki/hkl/hkl\\_transtech/PLP\\_2013\\_OPH\\_transtech.pdf](http://www.raitio.org/ratikat/helsinki/hkl/hkl_transtech/PLP_2013_OPH_transtech.pdf).
- Heino, T. 2014. ARTIC Paluu Tulevaisuuteen. Porvoo: Bookwell Oy.

Hondius, H. 2011. Diligent newcomers drive up the competition. Metro Report International September 2011, 38-49.

Hölttä-Otto, K. 2005. Modular Product Platform Design. Espoo: Helsinki University of Technology.

Jianxin, J., Simpson, T.W. & Siddique, Z. 2007. Product family design and platform-based product development: A state - of - the - art review. Viitattu 2.7.2016, [https://www.researchgate.net/publication/226657508\\_Product\\_family\\_design\\_and\\_platform-based\\_product\\_development\\_a\\_state-of-the-art\\_review\\_J\\_Intell\\_Manuf](https://www.researchgate.net/publication/226657508_Product_family_design_and_platform-based_product_development_a_state-of-the-art_review_J_Intell_Manuf).

Jokela, M. 2011. Tuotealustaisen tietomallin käsitteet. Viitattu 11.7.2016, <http://inside-the-plm.blogspot.fi/p/tuotealustaisen-tietomallin-kasitteet.html>

Koukkunen, K. 2010. Alumiiniveneen rungon modulointi robottihitsauksen tehostamiseksi. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

König, H. & Heipp, G. 2008. The Modern Tram in Europe. An Exhibition from München Verkehrsgesellschaft mbH (MVG). 2008. München.

Laaksonen, M. 2003. Miksi raitiovaunu on suositumpi kuin bussi? Viitattu 22.12.2016, [http://www.kaupunkiliikenne.net/Ratikka\\_ja\\_bussi.htm#bus\\_or\\_lr](http://www.kaupunkiliikenne.net/Ratikka_ja_bussi.htm#bus_or_lr).

Lampel, J. & Mintzberg, H. 1996. Customizing Customization. Sloan Management Review. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.

Lehtonen, T. 2007. Designing Modular Product Architecture in the New Product Development. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.

Miller, T. D. & Elgård, P. 1998. Defining Modules, Modularity and Modularization. Proceedings of the 13<sup>th</sup> Research Seminar. 1998. Fuglsoe.

Ohvanainen, J. & Hietikko, E. 2012. Building competitive advantage through platform-based product family thinking: Case powerpacks. Journal of Industrial Engineering and Management 5 (1), 181-183.

Pimpler, T.U. & Eppinger S.D. 1994. Integration Analysis of Product Decompositions. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.

Sanches, R. & Mahoney, J.T. 1996. Modularity, Flexibility, and Knowledge Management in Product and Organization Design. Strategic Management Journal 17, 65.

Sarinko, K. 1999. Asiakaskohtaisesti muunneltavien tuotteiden massaräätälöinti, konfigurointi ja modulointi. Helsinki: Helsingin teknillinen korkeakoulu.

Säilynoja, P. 2014. Modulaarisen tuotteen mallivalikoiman ja tuoterakenteen keventäminen. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

TCRP, Transit Cooperative Research Program. 2012. Track Design Handbook for Light Rail Transit, Second Edition. Washington: TCRP.

Tramways & Urban Transit, International Light Rail Magazine. 2015. Tram design: issues and constraints. Tramways & Urban Transit 1 (925), 2-3.

Ulrich, K. & Tung, K. 1991. Fundamentals of Product Modularity. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.

Zanutti, C. 2009. Bombardier FLEXX Urban 3000: the ultimate bogie platform for urban transportation. European Railway Review 6, 56-59.

Österholm, J. & Tuokko, R. 2001. Systemaattinen menetelmä tuotemodulointiin - Modular Function Deployment. Helsinki: Metalliteollisuuden kustannus Oy.