



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TEEMU PYÖRNY  
KOKOONPANOYSTÄVÄLLINEN SUUNNITTELU

Kandidaatintyö

Tarkastaja:

Hasse Nylund

## TIIVISTELMÄ

**TEEMU PYÖRNY:** Kokoonpanoystävällinen suunnittelu

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 38 sivua

Maaliskuu 2018

Konetekniikka

Koneensuunnittelu ja tuotekehitys

Tohtorikoulutettava, Hasse Nylund

Avainsanat: kokoonpanoystävällinen suunnittelu, DFA, modulaarisuus

Työn tarkoituksena on esitellä kokoonpanoystävällisen suunnittelun vaiheet ja siihen liittyviä analysointimenetelmiä. Tämän lisäksi tutkitaan modulaarisuuden liittymistä kokoonpanoon ja suunnitteluun. Modulaarisuudessa käydään läpi erilaisia menetelmiä modulaarisuuden hyödyntämiseen DFA:ssa sekä modulaarisuuden mittaamiseen. Kokoonpanon menetelmiä ovat CSC-analyysi, Proaktiivinen analyysi, Hitachin menetelmä, sekä Boothroydin ja Dewhurstin menetelmä. Tutkimustuloksena on se, että modulaarisuuden avulla saadaan tehostettua kokoonpanoystävällistä suunnittelua eri tavoin. Lähdeaineistona on käytetty luotettavia julkaisuja kirjallisuudesta ja kirjoitettu teksti on perustettu mahdollisimman monipuolisesti eri lähteisiin.

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	KOKOONPANOYSTÄVÄLLINEN SUUNNITTELUN TOTEUTTAMINEN .....	3
2.1	Menetelmän vaiheet .....	6
2.2	Kokoonpanon analysointimenetelmiä .....	7
2.2.1	CSC-analyysi .....	7
2.2.2	Proaktiivinen analysointi.....	10
2.2.3	Hitachin menetelmä .....	12
2.2.4	Boothroydin ja Dewhurstin menetelmä .....	15
3.	MODULAARISUUS JA KOKOONPANOYSTÄVÄLLINEN SUUNNITTELU	18
3.1	Modulaaristen systeemien viisi elementtiä .....	18
3.2	Elinkaarimodulaarisuus kokoonpanoystävällisessä suunnittelussa.....	20
4.	MODULAARISUUTTA HYÖDYNTÄVIÄ MENETELMIÄ KOKOONPANOIHIN JA SUUNNITTELUUN .....	23
4.1	Kokoonpanoissa käytettäviä modulaarisuuden menetelmiä .....	23
4.2	Modulaarisia suunnittelumenetelmiä .....	25
4.3	Modulaarisuuden mittaus .....	28
5.	YHTEENVETO .....	33
6.	LÄHTEET.....	35

# 1. JOHDANTO

Teollisuudessa tehdään suunnittelutyötä jokaisen tuotteen ja palvelun kohdalla. Yrityksen tavoitteena on tuottaa lopputulos, joka on vähintäänkin kilpailukykyinen olemassa olevien vastaavanlaisien lopputulosten kanssa. Lopputulosten vertailuun on olemassa useita erilaisia mittareita, jotka pohjautuvat erilaisiin tarkastelukohteisiin. Esimerkiksi tuotantokustannukset, laadunhallinnan kustannukset ja työvoimakustannukset ovat välttämättömiä kuluja teollisuudessa, joten ne pyritään minimoimaan erilaisin keinoin. Yrityksellä kannattaa olla jonkinlainen kilpailuvaltti, jonka perusteella se erottuu kilpailijoistaan. Yrityksen kilpailuvaltina voi olla esimerkiksi mahdollisimman edullinen valmistusprosessi, nopea läpäisy aika, tai laadukas lopputulos. Tässä työssä tutkitaan kokoonpanoystävällistä suunnittelua sekä modulaarisuuden vaikutusta siihen. Opinnäytetyössä tarkasteltavia tutkimuskysymyksiä ovat:

- Mitä kokoonpanoystävällinen suunnittelu tarkoittaa?
- Millaisia vaiheita kokoonpanoystävällisessä suunnittelussa on?
- Millä menetelmillä kokoonpanoystävällistä suunnittelua voidaan arvioida?
- Mitä modulaarisuus on ja miten elinkaarimodulaarisuus vaikuttaa kokoonpanoystävälliseen suunnitteluun?
- Millä eri menetelmillä modulaarisuutta voidaan hyödyntää kokoonpanossa ja suunnittelussa?
- Miten modulaarisuutta voidaan mitata?

Tuotteen suunnitteluvaiheessa pystytään vaikuttamaan merkittävästi lopputuloksessa oleviin asioihin, joten yritykset pyrkivät panostamaan nimenomaan suunnittelutyöhön. Suunnitteluvaiheessa tehtävä työ ei vaadi paljoa resursseja, mutta sillä on suuri vaikutus lopullisiin kustannuksiin (Rufe 2013, s. 180). Kokoonpanon huomioon ottamisella suunnitteluvaiheessa saadaan lukuisia etuja, joita tässä opinnäytetyössä käydään läpi. Onnistunut suunnittelu voidaan saavuttaa erilaisiin periaatteiden kautta, mutta tässä työssä keskitytään kokoonpanoystävälliseen suunnitteluun. Kokoonpanoystävällinen suunnittelu eli Design For Assembly (DFA) on tämän työn tärkein tarkastelukohde. Siinä olevien vaiheiden ja menetelmien hyödyllisyyksiä esitellään ja tutkitaan erilaisilla tavoilla.

Tuotteen kokoonpanon jatkuvan tarkastelun avulla vaikutetaan lopullisiin kokoonpanokustannuksiin ja sitä kautta myös lopputuloksen kustannuksiin. Ongelmien havaitseminen kokoonpanovaiheessa tulee edullisemmaksi kuin niiden havaitseminen prosessin loppuvaiheessa. Loppuvaiheessa havaitut ongelmat ovat kalliimpia korjata, sillä silloin joudutaan palaamaan prosessissa taaksepäin ja etsimään syytä sieltä (Dalglish et al. 2000, s. 17). Kokoonpanon tarkastelu voidaan suorittaa myös siten, että hyväksikäytetään esimerkiksi omia tai jonkun muun tekemiä aikaisempia tutkimustuloksia ja menetelmiä.

Muun muassa tätä käsitellään opinnäytetyössä esittelemällä olemassa olevia toimintamalleja. Empiirinen tieto edesauttaa oppimisprosessia, jolloin tulevaisuudessa pystytään tekemään asioita paremmin. Tässä työssä perehdytään DFA:n lisäksi modulaarisuuteen kokoonpanon näkökulmasta.

Modulaarisuus tarkoittaa yleisellä tasolla sellaista tuotetta, joka voidaan valmistaa erilaisien konfiguraatioiden pohjalta. Konfiguraatioissa voidaan valita erikokoisia ja näköisiä osakokonaisuuksia juuri kyseiseen käyttötarkoitukseen sopivaksi. Modulaarisuus voi ilmetä esimerkiksi tarkasteltavan tuotteen fysikaalisena muuttumisena tai tuotteen toiminnallisena variointina. Erilaiset komponentit saavat tuotteen käyttäytymään eri tavoin, jolloin modulaarisuutta esiintyy. (Pakkanen 2015)

Modulaarisuuden tärkeimpänä tarkoituksena on saada tuotteen kokoonpanosta erilaisia versioita mahdollisimman pienillä kustannuksilla. Modulaarisuudella pyritään myös lyhentämään tuotteen tekemisen läpäisyäikää (Okudan Kremer & Gupta 2013, s. 1959). Modulaarisuutta voi esiintyä eritasoisina asteina, jolloin joissain kokoonpanoissa voidaan moduloida valtaosaa komponenteista, kun taas joissain kokoonpanoissa saattaa olla vain yksi moduloitava osa. Tätä periaatetta käytetään esimerkiksi menetelmässä Design For Manufacture (DFM). Menetelmää DFM ei käsitellä tässä työssä, mutta se painottuu valmistuksen huomioinnin maksimointiin.

Kandidaatintyössä käydään läpi suunnitteluvaiheen modulaarisuutta kokoonpantavuuden näkökulmasta ja esitellään erilaisia modulaarisuuden menetelmiä. Menetelmät keskittyvät erilaisiin asioihin ja tietty tapa on parempi joissain asioissa kuin toista lähestymistapaa edustava menetelmä. Menetelmät voivat keskittyä esimerkiksi joustavuuteen, läpäisy aikaan, materiaaleihin tai tuotekehitykseen. Kokoonpanoissa olevan modulaarisuuden mitausta käsitellään esittelemällä erilaisia laskennallisia tapoja ja niiden hyötyjä. Työn luettaan lukijalla on käsitys DFA:sta, modulaarisuudesta ja niihin liittyvistä menetelmistä.

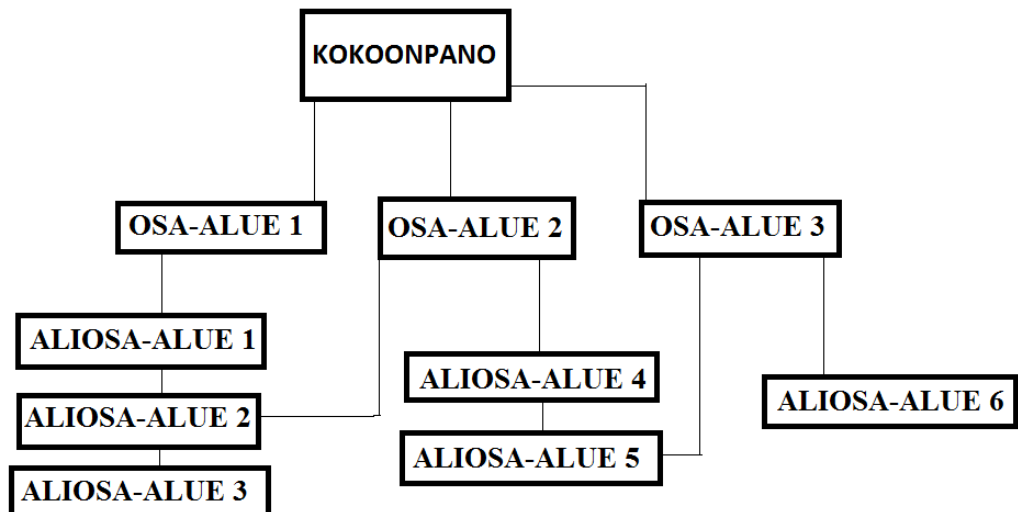
## 2. KOKOONPANOYSTÄVÄLLINEN SUUNNITTE- LUN TOTEUTTAMINEN

Kokoonpanolla tarkoitetaan kokonaisuutta, joka muodostuu komponenteista ja osakokoonpanoista. Koneistetut kappaleet kuuluvat kategoriaan komponentit. Kokoonpanossa pääideana on yhdistellä erilaisia osia toisiinsa tavoitteena luoda toimiva kokonaisuus. Kokonaisuus on tuote, joka on monimutkaisempi kuin sen komponentit. Kokoonpanon osa-alueiden avulla saadaan yksinkertaistetusti aikaiseksi seuraavanlainen ketju: Raakamateriaalin hankkiminen, koneistaminen ja koneistettujen kappaleiden liittäminen toisiinsa. Liittämisen jälkeen saadaan kokoonpano, joka perustuu edellä mainitun ketjun vaiheisiin (Andreasen 1988, s.16). Kokoonpanon lähtökohtana on siis erilaisista operaatioista muodostunut ketju, jonka avulla kokoonpano saadaan muodostettua.

Jokaisessa kokoonpanossa on operaatioita, joita on rajoitettu määrä. Eri operaatioiden pohjalta syntyy kokoonpano. Operaatiot vaativat aina huomiointia, mutta tapauksesta riippuen erilaisia operaatioita voidaan painottaa eri lailla. Kokoonpanoprosessin kolme yleisintä huomiointia vaativaa osa-alueita ovat käsiteltävyys, liittäminen ja tarkastaminen. Nämä osa-alueet voidaan jakaa erilaisiin aliosa-alueisiin, jotka kertovat tarkemmin, minkälaisista asioista osa-alueet koostuvat. (Boothroyd 2005, s. 221)

Aliosa-alueet kertovat tarkemmin osa-alueista, jotka muodostavat kokoonpanoprosessin. Aliosa-alueiden avulla luodaan katsaus yksityiskohtaisesti erilaisiin huomiota vaativiin asioihin. Aliosa-alueet voivat liittyä yhteen tai useampaan osa-alueeseen, sillä joissain tapauksissa niitä on mahdotonta sijoittaa vain yhteen osa-alueeseen. Aliosa-alueiden avulla saadaan selvitettyä tyhjentävällä tavalla kaikki kokoonpanoon liittyvät asiat ja voidaan näin ollen luoda yksiselitteinen lista asioista, jotka pitää huomioida. Kaikki osa-alueet voidaan määrittellä aliosa-alueiden avulla. (Andreasen 1988, s. 31)

Kuvassa 1 on hahmoteltu karkealla tasolla kokoonpanon muodostuminen osa-alueiden ja aliosa-alueiden avulla. Kuvassa kokoonpano koostuu osa-alueista, joihin kuuluu aliosa-alueita. Huomioitavaa on se, että aliosa-alue voi linkittyä useaan osa-alueeseen. Osa-alueilla voi myös olla keskenään eri määrä aliosa-alueita.



**Kuva 1.** Kokoonpanoon vaikuttavat osa-alueet ja aliosa-alueet, mukaillen lähdeettä (Andreasen 1988, s. 31)

Kokoonpanon muodostamisen tueksi tarvitaan osakokoonpanoja. Osakokoonpanolla tarkoitetaan vaihetta, jossa osia liitetään toisiinsa jonkinlaisen osakokonaisuuden muodostamiseksi. Osakokoonpanot ovat apuvälineitä suunnittelun ja kokoonpanon välillä. Kokoonpanot voivat olla monimutkaisia kokonaisuuksia, joiden muodostaminen voi olla todella monimutkaista ilman osakokoonpanoja. Osakokoonpanoja voidaan yhdistellä uusiksi osakokoonpanoiksi, jolloin päästään lähemmäksi varsinaista kokoonpanoa ja valmistaa tuotetta. (Andreasen 1988, s.29)

Osakokoonpanojen välillä on tarpeellista tehdä toimenpiteitä, jotta päästään tekemään seuraava osakokoonpano. Toimenpiteitä ovat esimerkiksi maalaus, pintakäsittely ja säätäminen. Toimenpiteiden avulla osakokoonpano saadaan muokattua sopivaksi seuraavia vaiheita varten. Osakokoonpanon tekemisessä voidaan käyttää kahta tai useampaa osakokoonpanoa. Osakokoonpanon muodostamisessa on myös mahdollista käyttää osakokoonpanoa ja osia tai pelkkiä osia. Osakokoonpanot ovat siis osa kokoonpanoprosessia. (Boothroyd 2005)

Kokoonpanoprosessi tarkoittaa tehtävää, jossa käytetään hyväksi muun muassa osakokoonpanoa, osa-alueita ja erilaisia operaatioita. Kokoonpanoprosessissa on usein määritetty tarkasti järjestys, jonka mukaan kokoonpanoa toteutetaan. Kokoonpanoprosessista voidaan tunnistaa erilaisia asioita, joita ovat koneistettava kappale, komponentti, rakennusblokki, muodoton materiaali ja pääkomponentti. Koneistettavalla kappaleella tarkoitetaan tuotteeseen tulevaa yksittäistä osaa, joka muodostuu yhdestä materiaalista, esimerkiksi teräksestä. Kokoonpanossa on lukuisia koneistettavia kappaleita. Komponentin määrittely ei ole yhtä spesifi kuin koneistettavan kappaleen määrittely. Komponentti on tuotteessa oleva osa, joka voi olla koneistettava kappale. Muita vaihtoehtoja sille ovat useammista kappaleista muodostuvat kombinaatiot. Kappaleita voi olla kaksi tai vaikka kaksikymmentä. (Andreasen 1988, s.27)

Rakennusblokki on osakokoonpanoa ilmaiseva kappale. Rakennusblokin avulla voidaan joissain tilanteissa simuloida osaa tai osakokoonpanoa, jota ei vielä ole valmistettu. Rakennusblokki voi siis olla jo valmistettu blokki tai vielä valmistusvaiheessa oleva blokki. Kokoonpanoprosessissa käytetään rakennusblokkeja, jotta päästäisiin selvyyteen siitä, sopiiko kyseinen blokki lopputulokseen vai ei. Muodottomalla materiaalilla tarkoitetaan nestemäistä eli toisin sanoen ei-kiinteää materiaalia. Muodoton materiaali voi olla esimerkiksi öljyä, nestettä, maalia tai vaikka liimaa. Muodottomalla materiaalilla on materiaalista riippuen tietty viskoosiarvo. Kokoonpanoprosessin voitelu tai kokoonpanoprosessin osakokoonpanoprosesseissa olevien kappaleiden käsittely ovat esimerkkejä, joita voidaan hoitaa muodottoman materiaalin avulla. (Andreasen 1988, s.27)

Pääkomponentilla tarkoitetaan kokoonpanoprosessissa keskipisteenä olevaa kappaletta. Kokoonpanoprosessissa pääkappaletta käytetään eniten kokoonpanossa, sillä siihen liitetään muut osakokoonpanossa tarvittavat osat. Pääkomponentti on yleensä suuri, koska siihen yhdistellään paljon osia. Jokaisessa osakokoonpanossa ja kokoonpanossa on tunnistettavissa niiden pääkomponentit. (Lehtonen 2007)

Kokoonpanoystävällinen suunnittelu eli Design for assembly (DFA) tarkoittaa menetelmää, jonka tavoitteena on suunnitella asioita kokoonpanoa silmälläpitäen. Menetelmän avulla pyritään muun muassa minimoimaan systeemissä olevien osien lukumäärä ja helpottamaan kokoonpantavuutta hyväksikäyttäen erilaisia keinoja. DFA:n avulla pystytään myös arvioimaan nykyistä kokoonpanoa (Mo et al. 1999). DFA:n käyttäminen perustuu siis puhtaasti kokoonpanon silmälläpitämiseen ja kehittämiseen.

DFA:ssa pyritään minimoimaan tuotteeseen liittyviä kustannuksia mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. Tämä mahdollistaa tuotteen paremman kehittämisen (Rufe 2013, s. 181). Aikaisessa vaiheessa havaittavat ongelmat saa korjattua vaivattomammin, sillä niihin pystytään heti reagoimaan. Aikaisessa vaiheessa havaitut ja korjatut ongelmat ennaltaehkäisevät lisäkustannuksia prosessin loppuvaiheessa. Ohasi et. al. (2002, s. 569) tukevat julkaisussaan tätä asiaa: Julkaisussa kerrotaan osan kokoonpantavuuden olevan helppoa jos sen kokoonpanokustannukset ovat pienet. Kappaleen tulisi siis olla mahdollisimman helposti liitettävä muihin kappaleisiin ilman erityistoimenpiteitä.

DFA-analysoinnin avulla voidaan tutkia tuotetta. Analysoinnin voi tehdä missä vaiheessa tahansa, mutta loppuvaiheen analysointi tuottaa luotettavampia tuloksia, sillä tuotteesta saadaan silloin enemmän tietoa. Alkuvaiheen analysoinnissa tarvitaan tuotteen suunnittelijaa, sillä valtaosa tuotteen yksityiskohdista on tässä vaiheessa vasta hänen tiedossa (Andreasen 1988). Analysointitapoja esitellään ja niistä kerrotaan tarkemmin osa-alueessa kokoonpanon analysointimenetelmiä.



## 2.1 Menetelmän vaiheet

Tämän otsikon alla kerrotaan Appletonin tiimipohjainen lähestymistapa DFA:n käyttämiseen. Lähestymistavassa edetään kronologisessa järjestyksessä, jotta kokonaiskuvasta tulisi mahdollisimman selkeä. Selkeän esittämistavan avulla pyritään siihen, että jokainen lukija ymmärtäisi, kuinka menetelmää käytetään oikein.

Appleton ja Garside (2000) kehittivät kirjallisuudessa aikaisemmin esiteltyjen lähestymistapojen pohjalta uudenlaisen periaatteen, jossa voidaan hyväksikäyttää tiimityöskentelyä. Ensimmäisenä vaiheena menetelmässä on purkaa kokoonpano ja järjestellä kappaleet räjäytysdiagrammimuotoon, josta voidaan erottaa kaikki tarkasteltavat komponentit. Tämän jälkeen jokainen komponentti nimetään esimerkiksi post-it lapuilla, jotta menetelmää käytettäessä komponentteihin viittaaminen olisi yksiselitteistä. Nimeämisen jälkeen tuote kootaan uudelleen siten, että jokainen kokoonpanovaihe ja siihen kuuluva aika kirjataan ylös, mielellään erivärisiin post-it lappuihin, jotta menetelmän seuraavassa vaiheessa muodostettava ruudukko pysyisi selkeänä. (Moultrie & Maier 2014, s. 48)

Ruudukon muodostaminen alkaa post-it lappujen kiinnittämisellä tyhjälle seinälle. Luotavaa ruudukkoa voidaan tutkia neljässä eri vaiheessa. Aluksi kokoonpanovaiheita kuvaavat post-it laput kiinnitetään yhdelle riville oikeaan järjestykseen. Yhtä rivin vaihetta kuvaavaan sarakkeeseen liitetään osien nimiä ja vaiheen huomioita sisältävät laput. Ruudukkoa koottaessa varmistetaan, että kaikki tiimin jäsenet ymmärtävät prosessin ja voivat nähdä sen kokonaiskuvan. Ruudukkoa muodostettaessa jokainen jäsen voi esittää uusia ideoita ja huomioita, jolloin ruudukosta tulee entistä kattavampi. (Appleton & Garside 2000, s. 165)

Seuraavana vaiheena on tunnistaa välttämättömät ja ei niin tärkeät komponentit. Vaiheen tarkoituksena on pyrkiä vähentämään komponenttien lukumäärää. Tämä tarkastelu tehdään jokaiselle komponentille ja johtopäätökset liitetään samaan ruudukkoon. Eliminoitavat komponentit poistetaan kokonaan tai yhdistellään toisiin komponentteihin siten, että jäljelle jää vain välttämättömiä komponentteja. Johtopäätösten kirjaamisen ja eliminoimisen jälkeen pyritään kehittämään parannusehdotuksia, mikäli se vaan on mahdollista. Näiden parannusehdotuksien kautta voidaan luoda optimoitu kokoonpanojärjestys. Parannusehdotukset voivat muuttaa kokoonpanojärjestystä ja tämä on myös syytä huomioida (Moultrie & Maier 2014, s. 48). Toisen vaiheen perusteella tiedossa on mahdollisimman hyvä suunnitelma tuotteen kokoonpanojärjestykselle sekä tuotteessa käytettäville komponenteille.

Kolmannessa vaiheessa suunnittelutiimi voi keskittyä kokoonpanossa käytettäviin käsitelymenetelmiin. Jokaisen komponentin yhteydessä mietitään, millaisilla tavoilla käsiteltävyyttä saataisiin helpotettua. Prosessia käydään läpi ja pyritään poistamaan tarpeeton käsittelyaika, joka voi johtua esimerkiksi orientaatiosta tai tartuttavuuden vaikeudesta.

Käsiteltävyyden jaottelun raja asetetaan tapaus- ja tiimikohtaisesti. Rajan asettamisen jälkeen keskitytään ensin kaikista tärkeimpiin vaikeasti käsiteltäviin komponentteihin ja tämän jälkeen pyritään muodostamaan kaikille helpotusta tarvitseville komponenteille toimivat ratkaisut. Käsiteltävyydvaiheessa koko tiimillä on selkeä näkemys kaikista edellä mainituista vaiheista ja he voivat keskittyä osien liittämisen tarkasteluun. Tämä vaiheen periaate on samanlainen kuin käsiteltävyydessä. Liittämisen analysoinnin jälkeen jäljellä on enää viimeinen vaihe, analysointi. (Appleton & Garside 2000, s. 167)

Tuotteen kehitysideoiden analysoinnissa tutkitaan samanaikaisesti lopullisia suunnitelmia komponenteille ja prosessille. Molemmissa tapauksissa tarkistetaan, että kaikki tarpeelliset operaatiot on tehty ja arvioitu. Tehdyn suunnitelman onnistuneisuutta voidaan arvioida vertaamalla prosessin kokonaisaikaan ennen suunnitelmaa olleeseen aikaan. Toinen hyödyllinen tapa on verrata ratkaisumallien osamäärää tai paljon muokkaamista tarvitsevien osien määrää (Appleton & Garside 2000, s. 167). Kirjallisuudessa löytyy myös lukuisia muita lähestymistapoja, mutta niitä ei sisällytetä tähän työhön. Kokoonpanoystävällisen suunnittelun oikeaoppinen käyttäminen lisää todennäköisyyttä saavuttaa toimivia lopputuloksia eri kokonaisuuksille.

## 2.2 Kokoonpanon analysointimenetelmiä

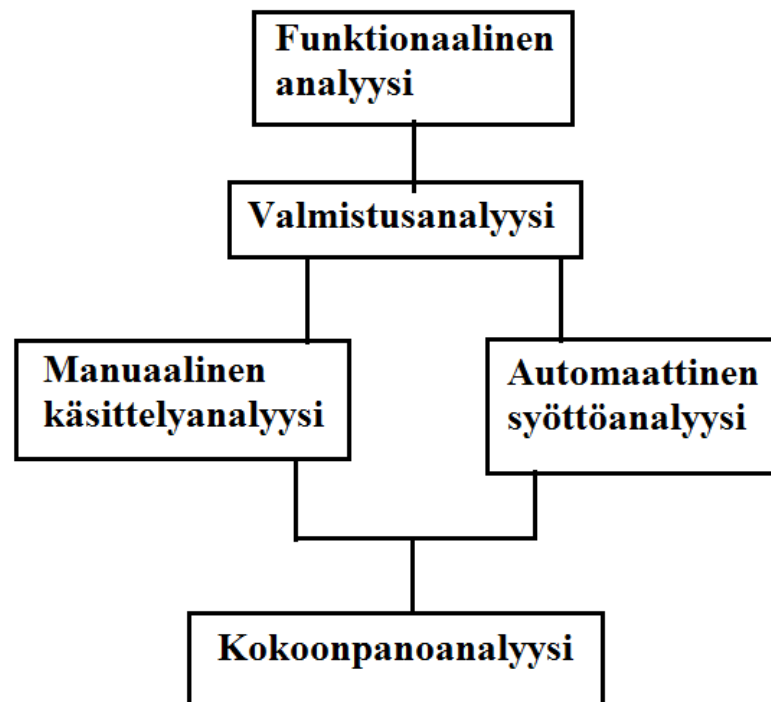
Kokoonpanojen onnistuneisuutta tarkastellaan erilaisien menetelmien avulla. Tässä työssä esitellään neljä erilaista menetelmää, jotka ovat CSC-analyysi, proaktiivinen analyysi, Hitachin menetelmä ja Boothroyd Dewhurst Inc. -menetelmä. Analysointimenetelmien avulla saadaan selville kokoonpanon onnistuneisuus ja ennen kaikkea sen ongelmakohdat. Ongelmakohtiin pystytään tunnistamisen jälkeen reagoimaan ja korjaamaan ne. Menetelmiä hyväksikäyttämällä saadaan mahdollisimman onnistunut lopputulos.

### 2.2.1 CSC-analyysi

Computer Science Corporationin Design For Assembly/Manufacturing - analyysi on menetelmä, joka hyödyntää tietynlaista kokoonpanojärjestykseen perustuvaa analysointia. Kokoonpanojärjestyksestä katsomalla suunnittelijan on mahdollista tutkia kokoonpanon jo-kaista vaihetta. Tämän perusteella mahdollinen ongelmakohta on helpompi tunnistaa ja paikantaa. CSC:n avulla saadaan siis tutkittua DFA-menetelmää. Kokoonpanojärjestyksestä tarkastelemalla saadaan selville mahdollisia ongelmakohtia ja ne pyritään korjaamaan kokoonpanojärjestyksestä muuttamalla (Booker et al. 2001, s. 63). Seuraavissa kappaleissa käydään läpi CSC:n vaiheita.

CSC-analyysin eri vaiheet voidaan tunnistaa kuvasta 2. Kuvasta käsitellään analyysitavat valmistusanalyysia lukuun ottamatta. Valmistusanalyysi ei liity design for assemblyyn, joten sitä ei tässä työssä käsitellä sen tarkemmin. Kuvassa liikutaan ylhäältä alas. Jos jokin analyysi ei onnistu, joudutaan palaamaan takaisin kuvaa edeltäviin vaiheisiin ja niiden

jälkeen ollaan taas prosessin ensimmäisessä vaiheessa. Analysointien jälkeen pitäisi lopputuloksena olla toimiva kokonaisuus.



*Kuva 2. CSC DFA/MA - analysointi, mukailen lähdettä (Dalglish et al. 2000, s. 19)*

Funktionaalilla analyysillä tarkoitetaan menetelmää, jossa jokaista komponenttia tarkastellaan sen olennaisuuden näkökulmasta. Komponenteilla on kokoonpanossa erilaisia toimintoja ja tehtäviä. Funktionaalisen analyysin tärkeimpänä tavoitteena on tunnistaa komponentit, jotka eivät ole tärkeitä. Tällaiset osat pyritään joko eliminoidaan tai saamaan tärkeiksi yhdistelemällä muita komponentteja toisiinsa. Funktionaalilla analyysillä voidaan parantaa suunnittelun tehokkuutta tunnistamalla komponentit joko tärkeiksi tai ei niin tärkeiksi. (Dalglish et al. 2000, s. 18)

Funktionaalilla analyysillä arvioidaan komponenttien relatiivista liikettä. Funktionaalissa analyysissa tutkitaan myös, onko jokin toinen materiaali soveltuvampi kyseiseen tapaukseen. Materiaalivalintaa tutkitaan toiminnollisuutta silmällä pitäen. Materiaalia vaihtamalla voidaan päästä parempaan lopputulokseen, joten sen optimointi on tärkeää. Lisäksi funktionaalissa analyysissa tarkastellaan komponentin olennaisuutta säättämisen näkökulmasta. Komponentin asettelu kokoonpanossa pystytään joskus tekemään paremmin kuin se on nykyisessä mallissa tehty. Komponentin uudelleenasettelulla voidaan

esimerkiksi helpottaa sen huoltamista, luokse pääsyä tai vaihtamista. (Moultrie & Maier 2014, s. 47)

Käsittelyanalyysissä, joka on manuaalista, erotellaan komponenttien osia valtaosasta komponentteja. Jokaisen osan ominaisuuksia tunnustetaan ja arvioidaan. Analyysissa tutkitaan myös komponenttien osien valmiutta kokoonpanon mukaiseen suuntaamiseen eli orientoitumiseen. Syöttöanalyysissä puolestaan tutkitaan samoja asioita automatisoidusti erilaisten koneiden avulla. Syöttö- ja käsittelyanalyysien avulla pyritään saamaan osista mahdollisimman helposti kokoonpantavia. (Dalglish et al. 2000, s. 18)

Käsittely- ja syöttöanalyysissä tutkitaan jokaista kappaletta kokoonpantavuutta silmällä pitäen. Kappaleesta riippuen tutkiminen hoidetaan joko manuaalisesti tai automatisoidusti. Tutkimistapaan voi vaikuttaa esimerkiksi kappaleiden lukumäärä tai tarkasteltavien muotojen tarkkuus. Vaikeasti käsiteltäviä ja syötettäviä kappaleita on muun muassa seuraavanlaisia: massiiviset kappaleet, todella pienet kappaleet, pikkutarkkoja muotoja sisältävät kappaleet, terävät kappaleet ja vaikeasti eroteltavissa olevat kappaleet. Näiden kahden analyysin päätavoitteena on minimoida mahdolliset ongelmatilanteet kokoonpanovaiheessa. (Moultrie & Maier 2014, s. 47)

Edellä mainittujen analyysien jälkeen voidaan tehdä kokoonpanoanalyysi. Sen pohjana käytetään kokoonpanokaaviota. Kokoonpanokaaviosta näkee kokoonpanojärjestyksen, jota tarkastelemalla analyysistä tulee johdonmukainen. Jos kokoonpanokaaviota ei ole saatavilla, käytetään jotain toista dokumentoitua tietoa edellä mainitun asian selvittämiseen. Kokoonpanoanalyysissä tutkitaan osien sijoittamista kokoonpanoon (Dalglish et al. 2000, s. 19). Kokoonpanoanalyysissä hyödynnetään kokoonpanojärjestyksestä saatavaa tietoa.

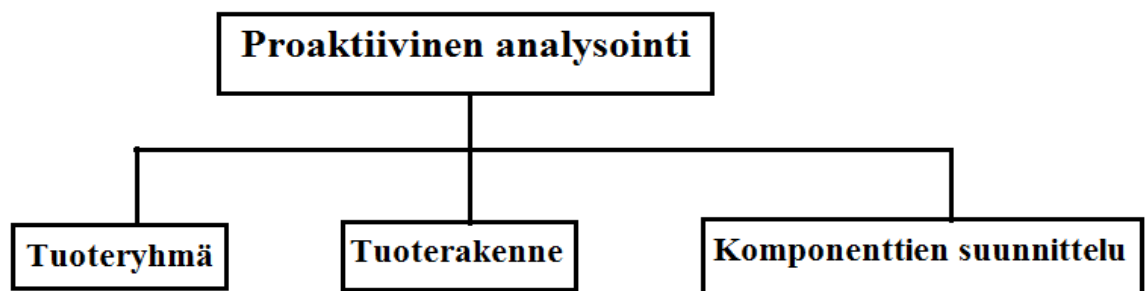
Kokoonpanojärjestyksen tavoitteena on antaa lukijalle selkeä kuva kokoonpanon muodostumisesta. Kokoonpanon muodostumisjärjestykseen vaikuttamalla pystytään ennaltaehkäisemään ongelmia, jotka johtaisivat lisäkuluihin. Kokoonpanojärjestyksen muuttaminen vaatii vähän tai ei ollenkaan uudelleensuunnittelua, joten se on varsin helppo toteuttaa. Kokoonpanojärjestys korostuu monimutkaisemmissa kokoonpanoissa, joissa on useampia kohtia, joissa mahdollinen ongelma voi olla (T. L. de Fazio et al. 1999, s. 879). Ilman kokoonpanojärjestystä analysoijan ja suunnittelijan on vaikeampi nähdä kokonaisuutta ja näin ollen havaita mahdollisia parannusideoita.

Sijoitusprosessianalyysi on osa kokoonpanoanalyysia. Analyysissä käytetään kokoonpanojärjestyksen avulla muodostettua vuokaaviota. Vuokaaviosta nähdään kokoonpanojärjestys kronologisesti. Analyysissä tavoitteena on tunnistaa yksittäisien prosessien hinnat. Kalleimpiin yksittäisiin prosesseihin kiinnitetään huomiota ja ne pyritään uudelleensuunnittelemaan, jos se on mahdollista. Tavoitteena on siis pienentää tuotteen kustannuksia karsimalla kalliita vaiheita. (Andreasen 1988, s. 157)

Kiinnitysanalyysi on myös osa kokoonpanoanalyysia. Kiinnitysanalyysilla tarkoitetaan menetelmää, jossa keskitytään kokoonpanoa varten valmisteltuun kappaleeseen. Kappaletta tutkitaan siten, että tarkastellaan sen soveltuvuutta kokoonpanon liittämiseen. Kappaleen kiinnittämisen yksinkertaisuutta kokoonpanoon tutkitaan. Lisäksi tarkastellaan kappaleen liittämisen helppoutta toisiin kappaleisiin. Kiinnitysanalyysissa tutkitaan myös kiinnikkeitä, sillä kappaleen liittämässä kokoonpanoon käytetään erilaisia kiinnikkeitä. Optimaaliset kiinnikkeet ovat jo valmiiksi täysin soveltuvia kiinnittämiseen, eikä niitä tarvitse erikseen muokata siihen sopiviksi (Moultrie & Maier 2014, s. 47). Kokoonpanoanalyysin jälkeen voidaan päättää, onko tarvetta tehdä uusi kierros vai onko muodostunut lopputulos tarpeeksi hyvä sellaisenaan.

## 2.2.2 Proaktiivinen analysointi

Proaktiivinen eli ennakoiva analysointi keskittyy tarkastelemaan DFA-menetelmän onnistuneisuutta jo sen toteutusvaiheessa. Muissa menetelmissä tulokset ovat saatavilla vasta koko prosessin tarkastelun loputtua, mutta proaktiivisessa analysoinnissa pyritään saamaan tieto ongelmakohtista mahdollisimman nopeasti niiden havaitsemisen jälkeen. Tavoitteena on saada mahdollisimman helposti koottavia ja ekonomisesti valmistettavia ratkaisuja suunnittelijalta jo suunnitteluprosessin aikaisessa vaiheessa. Proaktiivinen analysointi koostuu kolmesta pääelementistä: tuoteryhmä, tuoterakenne ja komponenttien suunnittelu (Dalglish et al. 2000, s. 20). Kuvassa 3 on esitetty proaktiivisen analysoinnin koostumus.



*Kuva 3. Proaktiivinen analysointi, mukailten lähde (Dalglish et al. 2000, s. 21)*

Tuoteryhmät eli samankaltaiset tuotteet muodostavat osa-alueita kokoonpanoissa. Tuoteryhmiin tutustumalla havaitaan, onko suunniteltava tuote uniikki vai onko sille olemassa vastaavanlaatuinen tuote jossain muussa yhteydessä. Tämä voidaan tarkastaa ja päättää

jo ennen tuotteen suunnittelua. Jos tuote ei ole uniikki, voi sille löytyä standardoituja ratkaisuja kokoonpantavuuteen. Joskus jopa koko tuoteryhmälle voi löytyä valmis ratkaisumalli. Tuoteryhmien käytön tavoitteena on hyödyntää vakioituja kappaleita, moduuleja ja menetelmiä. Tuoteryhmiä käyttämällä pyritään myös minimoimaan muuttujien määrä. Vaarana on, että standardoidaan väärinä asioita mutta tämä voidaan välttää luomalla DFA:lle rajoituksia standardoitaviin asioihin. (Dalglish et al. 2000, s. 21)

Tuoterakenteessa kokoonpanot, osat ja dokumentoidut asiat liitetään tuotteeseen ja toisiinsa koko kokoonpanoprosessin ajan. Tuoterakenteen kuvauksessa keskitytään siis objekteihin, jotka ovat kytköksissä toisiinsa tavalla tai toisella. Objekteista on olemassa tietoja, joita voidaan hyväksi käyttää tuoterakenteiden analysoinnissa. Objektien tiedot ovat esimerkiksi paino, vaikutus tuotteeseen, hinta, osan numero ja osan liittämismahdollisuudet. (Saaksvuori & Immonen 2005, s. 49)

Tuoterakenteen analysoinnissa keskitytään tuotteen rakenteen, osien lukumäärän ja kokoonpanojärjestyksen optimoimiseen. Kokoonpanojärjestykseen keskittyminen jo varhaisessa vaiheessa tuotteen suunnittelua voi antaa suunnittelijalle kuvan siitä, missä kohdissa ongelmia saattaa esiintyä. Edellä mainittujen tietojen avulla suunnittelijan tulisi tarvittaessa olla kykeneväinen muodostamaan vaihtoehtoisia ratkaisuja kyseiselle tuoterakenteelle ja kokoonpanojärjestykselle. Suositeltujen muutosratkaisujen onnistumisen taustalla on tarpeeksi kattavat tiedot valmistettavaan tuotteeseen liittyen. Informaatio voi koostua myös seuraavista muuttujista: prosessikuvaus, materiaalit, variointimahdollisuudet, kustannukset, olemassa olevat ratkaisut sekä suunnittelijan rajoitukset. (Dalglish et al. 2000, s. 22)

Komponenttien suunnittelussa on monia huomioon otettavia asioita Andreasenin (1988) teoksen kappaleessa 8.3 kerrotaan asioita, joita tulisi ottaa huomioon komponentteja suunniteltaessa. Komponenttien liittäminen tulee ottaa huomioon suunnitteluvaiheessa siten, että se on yksiselitteistä. Kappaleiden tulisi olla selkeästi symmetrisiä tai epäsymmetrisiä. Lisäksi käsiteltävyys ja työvaiheiden lukumäärä ovat huomionarvoisia asioita. Komponentit eivät saa olla liittämisen jälkeen sisäkkäin eivätkä ne saa olla huonolaatuisia. Pääkomponentin huomioiminen on olennainen osa komponentin suunnittelua, sillä suunniteltavan komponentin tulee olla kiinnitettävissä pääkomponenttiin.

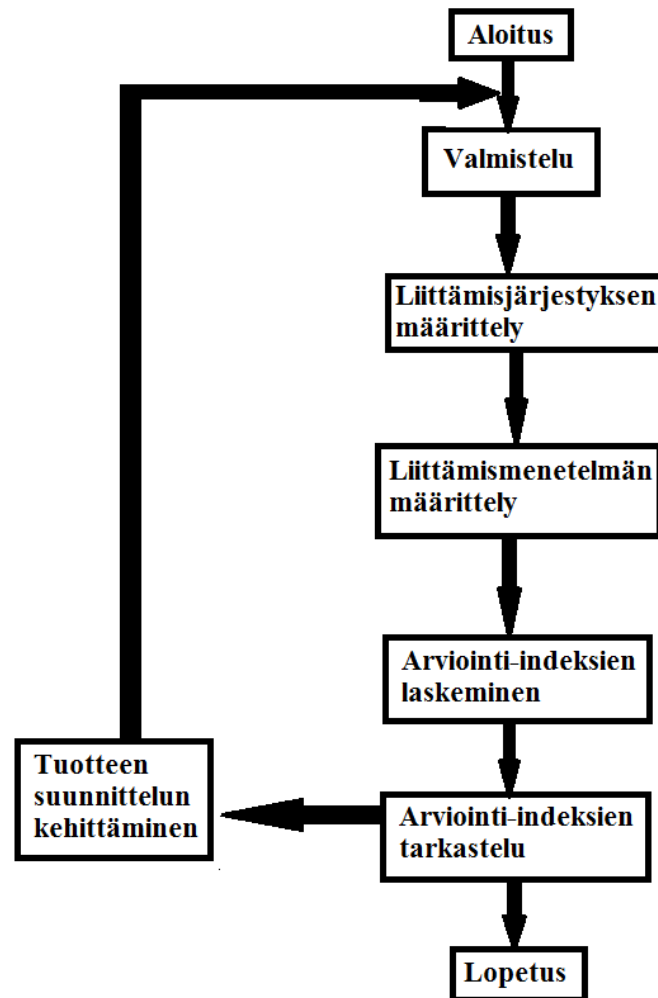
Komponenttien suunnittelussa keskitytään valmistettavuuteen ja kokoonpantavuuteen. Edellisessä kappaleessa puhuttiin pääosin liittämisestä, mutta komponenttien suunnittelussa on myös muita huomioimisen tarvitsevia asioita. Proaktiivisessa analysoinnissa saatava tieto ei aina ole täydellistä, koska prosessista on tarkasteltu vasta osa. Tiedosta saa kuitenkin jonkinlaisen käsityksen esimerkiksi komponentin valmistuskustannuksista. Käsitysten pohjalta suunnittelija saa tietoa, kuinka tarkkoja toleransseja saa käyttää ja pystyy hahmottelemaan komponentin geometriaa. (Dalglish et al. 2000, s. 23)

### 2.2.3 Hitachin menetelmä

The Hitachi Assemblability Evaluation Method on vuonna 1967 julkaistu menetelmä, joka nimensä mukaan arvioi tuotteen kokoonpantavuutta. Menetelmä antaa tuotteen suunnittelijalle aikaisessa vaiheessa palautetta nykyisen kokoonpanon helppoudesta/vaikeudesta. Menetelmän lyhempi ilmaisu on AEM, joka muodostuu sanoista Assemblability Evaluation Method. Menetelmässä ei oteta kantaa manuaaliseen ja automaattiseen kokoonpantavuuteen. Menetelmä on ollut tästä huolimatta käytössä useissa Yhdysvalloissa ja Japanissa olevissa yrityksissä. (Leaney & Wittenberg 1992)

Menetelmä korostaa tuotteen kokoonpantavuuden heikkouksia erilaisien mittareiden perusteella. Mittareista kerrotaan myöhemmin tämän otsikon alla. Kaikkien päätösten yhteydessä huomioidaan niiden aiheuttamat kustannukset, joten prosessissa arvioidaan myös tuotteen tuottavuutta. Kustannusarviointia hyväksikäyttämällä saadaan tarpeettoman kalliit prosessit karsittua pois, tai ainakin niihin kiinnitetään paljon huomiota. Aikaisen palautteen, heikkouksien ja kustannusten perusteilla muodostetaan kokonaiskuva suunnittelutyön parannuskohteista. (Ohashi et al. 2002, s. 567)

AEM-menetelmä on havainnollistettu kuvassa 4. Kuvasta näkee menetelmän vaiheiden nimet ja niiden järjestyksen. Vaiheet käsitellään yksityiskohtaisemmin läpi kuvan 4 jälkeen. Vaiheet ovat valmistelu, liittämisenjärjestyksen määrittely, liittämismenetelmän määrittely, arviointi-indeksien laskeminen, arviointi-indeksien tarkastelu ja tuotteen suunnittelun kehittäminen (Andreasen 1988, s. 152). Kuvassa liikutaan nuolten suuntaisesti ja tuotteen suunnittelun kehittäminen ei välttämättä kuulu kierrokseen.



*Kuva 4. Assemblability Evaluation Method, mukailten lähdettä (Andreasen 1988, s. 152)*

AEM alkaa valmisteluvaiheesta, jossa määritellään arvioitavat asiat. Arvioitavia asioita voivat olla erilaiset piirustukset. Piirustuksiin kuuluu yksityiskohtaiset ja konseptuaaliset piirustukset. Näitä piirustustyyppjä ovat esimerkiksi kokoonpanopiirustus ja suunnitelmallinen eli alustava piirustus. Arvioitavana asiana saattaa olla myös näytekappale, joka voi olla kokonainen tuote tai vain yksi osa siitä. Valmisteluvaiheessa määritellään myös käytettävä laskentatapa. Laskentatavan avulla pyritään saamaan mahdollisimman luotettavia tuloksia arvioitavista asioista. (Andreasen 1988, s. 152)

Valmisteluvaiheen jälkeen määritellään liittämisjärjestys. Kappaleet numeroidaan liittämisjärjestyksen perusteella. Liitettävät kappaleet myös nimetään yrityksessä käytettävällä vakioidulla tavalla tai yleisten normien perusteella. Liittämisjärjestys selkeyttää menetelmää, sillä mahdollisen ongelmakohdan sijainti voidaan paikallistaa liittämisjärjestykseen perustuen. Myös osakokoonpanojen tapauksessa liittämisjärjestys kannattaa määrittellä samasta syystä. (Ohashi et al. 2002)



Liittämisyjärjestyksen yhteydessä määritellään liittämismenetelmät. Liittämismenetelmiä ovat esimerkiksi hitsaus ja ruuvaus. Liittämismenetelmässä otetaan huomioon muun muassa käsiteltävyys, kustannukset ja turvallisuus. Liittämismenetelmiin liittyvä tarkastelu on myös osana AEM-menetelmää. Kokoonpantavuuden helppouteen ja toteutettavuuteen voidaan vaikuttaa liittämismenetelmän avulla. Jokaisen kappaleen kohdalle määritellään liittämismenetelmä erilaisten symbolien avulla. (Leaney & Wittenberg 1992; Boothroyd 2005)

Edellä mainittujen vaiheiden jälkeen ollaan valmiita laskemaan arviointi-indeksit. Arviointi-indeksien laskua ei käydä läpi tässä työssä. Laskentaan voi tutustua tarkemmin tutkimalla lähdeä (Ohashi et al. 2002). Laskennan avulla pyritään saamaan mahdollisimman luotettavia tuloksia arviointi-indeksien tarkastelua varten. Laskennan perusteella saadaan AEM-tulos, joka kuvaa valitun ratkaisun kannattavuutta. Tuloksen laskennassa voidaan painottaa eri asioita eri verran. Joskus kustannukset voivat olla tärkein asia, joskus taas toteutettavuus. Tulos saadaan siis räätälöityä painotettuja asioita silmälläpitäen. (Ohashi et al. 2002)

Arviointi-indeksien tarkastelussa tutkitaan erityisesti kolmea indeksiä, jotka ovat P, E ja K. P kuvaa jokaisen komponentin tai osakokoonpanon saamaa tulosta (Andreasen 1988, s. 151). E kuvaa kokoonpanon saamaa tulosta, jonka pohjalta voidaan arvioida suunnittelun laatua tai kokoonpanossa käytettyjen operaatioiden vaikeusastetta. P:n ja E:n maksimiarvo on 100. Maksimiarvo kuvaa siis ideaalitulannetta ja sen voi saavuttaa vain parhaalla ratkaisulla. Yleisen ohjeistuksen mukaan P:n ja E:n suositeltu arvo on vähintään 80, jotta ratkaisuehdotus olisi varteenotettava. Tätä suurempi arvo tarkoittaa yleensä sitä, että tuote tai kappale voidaan valmistaa automatisoidusti. Indeksillä K kuvaa puolestaan kustannuksia, jotka syntyvät muun muassa liittämistavasta ja komponenttien lukumäärästä. Maksimiarvo on yksi ja minimiarvo on mahdollisimman pieni. K:n suositeltu arvo on alle 0,7. Kyseinen arvo tarkoittaa sitä, että kustannuksia säästetään 30 prosenttia. (Leaney & Wittenberg 1992)

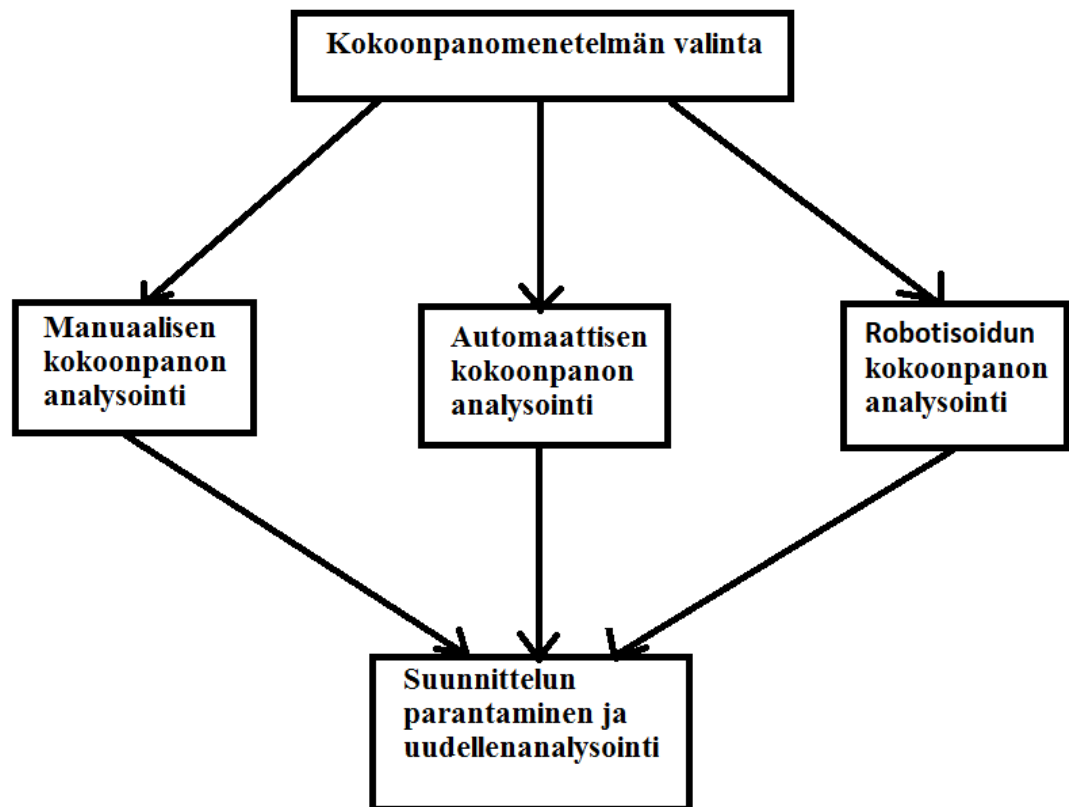
Tarkastelun lopputuloksena tehdään päätös siitä, onko kyseinen ratkaisu tarpeeksi hyvä toteutettavaksi. Indeksien arvot tarkastetaan ja niihin perustuen päätetään, onko ratkaisumallia tarvetta parantaa. P-indeksejä tutkimalla saadaan selville, missä komponenteissa ja osakokoonpanoissa sen arvo on tarpeeksi suuri. Kyseisiä operaatioita ei ole tarvetta muuttaa, joten tuotteen suunnittelun kehityksessä voidaan keskittyä muihin operaatioihin. Kehityksessä pyritään vähentämään kappaleiden lukumäärää, jotta K pienenee. Kehitysvaiheen päätyttyä E:n arvo pitäisi olla 20 tai 30 pistettä suurempi, jotta se olisi syytä ottaa huomioon. Kehitysvaiheen jälkeen vertaillaan parhaimpia kehitysehdotuksia ja yleensä paras niistä toteutetaan ja arvioidaan saman periaatteen mukaan. (Andreasen 1988, s. 152)

AEM koostuu siis kolmesta osasta, jotka ovat kokoonpanokustannukset, kokoonpanon ideaalisuus ja prosessin mahdollisimman helppo toteutus. Menetelmän avulla voidaan

saada manuaalisesta kokoonpanosta automatisoitu tai päinvastoin, vaikka se ei varsinaisesti ota kantaa siihen. AEM on käytössä useissa yrityksissä ja sen avulla on mahdollista säästää kymmeniä miljoonia euroja vuosittain (Andreasen 1988, s. 151). Menetelmä on selkeä ja johdonmukainen, joten sen käyttäminen on suoraviivaista.

## 2.2.4 Boothroydin ja Dewhurstin menetelmä

Tässä työssä käytetään Boothroydin ja Dewhurstin menetelmästä lyhennystä B&D-menetelmä. B&D-menetelmä julkaistiin ensimmäisen kerran vuonna 1980. Siitä on tehty sen jälkeen päivitettyjä versioita, jotka mukailevat alkuperäistä versiota (Leaney & Wittenberg 1992). Tässä työssä käydään läpi menetelmän perusidea. Kuvassa 5 on esitetty menetelmän päävaiheet. Kuvassa liikutaan nuolien osoittamaan suuntaan ylhäältä alas ja tarvittaessa palataan prosessin ensimmäiseen vaiheeseen, joka on kokoonpanomenetelmän valinta.



*Kuva 5. B&D-menetelmä, mukailen lähdettä (Andreasen 1988, s. 153)*

B&D-menetelmän perusideana on selvittää, voiko olemassa olevan kokoonpanon osien määrää vähentää. Menetelmässä selvitetään jokaisen osan kohdalla, onko se mahdollista eliminoida tai yhdistää yhteen tai useampaan osaan. Osia, jotka ovat välttämättömiä, ei tarkastella tunnistusvaiheen jälkeen. Kokoonpanomenetelmän valinnassa huomioidaan myös arvioitu aika, joka kuluu osan asetteluun, kiinnittämiseen ja muuhun käsittelyyn. Ajan perusteella saadaan selville sopivin kokoonpanomenetelmä. B&D-menetelmässä pyritään siis minimoimaan osien lukumäärä. (Stone et al. 2004, s. 304)

Kirjallisuudessa kerrotaan kolme erilaista kriteeriä, joiden pohjalta voidaan päättää, kannattaako osa yhdistää toisiin osiin vai ei. Osaa ei kannata yhdistää muihin osiin jos se kuuluu yhteenkin seuraavista kriteereistä. Ensimmäinen kriteeri on se, että osalla on relatiivista liikettä kaikkiin muihin kappaleisiin nähden, jotka ovat jo kokoonpanossa. Pieniä liikkeitä ei tarvitse huomioida, mutta merkittävä relatiivinen liike on syytä tarkastella. Pieni relatiivinen liike voidaan poistaa ideaalitapauksessa yhdistämällä osa toisiin osiin ja tämän johdosta saadaan myös vähennettyä erillisten osien lukumäärää. (Andreasen 1988; Leaney & Wittenberg 1992; Stone et al. 2004, s. 306; Boothroyd 2005, s. 230)

Toinen kriteeri liittyy osan materiaaliin. Osaa on hankalampi yhdistää, jos se on valmistettu eri materiaalista kuin muut kokoonpanossa olevat osat. Syytä erilaiselle materiaalille ovat esimerkiksi lämmön eristäminen, ja värähtelyn vaimentaminen. Pelkästään olennaiset syyt käyvät perusteiksi materiaaliominaisuuksien valitsemiseen. Jos eri materiaalilla ei saada merkittävää hyötyä, kannattaa osa valmistaa samasta materiaalista kuin muutkin osat. (Andreasen 1988; Leaney & Wittenberg 1992; Stone et al. 2004, s. 306; Boothroyd 2005, s. 230)

Kolmas kriteeri liittyy kokoonpanon toteutettavuuteen. Osaa ei joissain tapauksissa pysty yhdistämään muihin osiin, sillä se ei ole mahdollista tai järkevää. Osan yhdistäminen voi aiheuttaa kokoonpanon totaalisen purkamisen ja uudelleen kokoamisen, mikä vie aikaa ja rahaa. Kokoonpanossa valmiiksi asennetut osat pyritään lähtökohtaisesti pitämään liitetynä edellä mainituista syistä. Kannattaa huomioida se, että käytännössä erillisiä osia voidaan käyttää taloudellisista syistä, vaikka niiden yhdistäminen olisikin teoriassa mahdollista. (Andreasen 1988; Leaney & Wittenberg 1992; Stone et al. 2004, s. 306; Boothroyd 2005, s. 230)

Kriteerien tarkastelun jälkeen analysoijalla on tiedossa tarkasteltavat osat ja seuraavana tehtävänä on valita kokoonpanomenetelmä. Mahdollisia kokoonpanomenetelmiä ovat manuaalinen, robotisoitu ja automaattinen kokoonpanomenetelmä. Manuaalinen kokoonpano sopii pienille volyymeille, sillä siinä on hitain läpimenoaika verrattuna muihin kokoonpanomenetelmiin. Automaattinen kokoonpano on puolestaan nopein menetelmä ja se sopii sen vuoksi suurivolyyymisille kokoonpanoille. Robottinen kokoonpano asettuu manuaalisen ja automaattisen kokoonpanon välimaastoon. (Leaney & Wittenberg 1992)

Paras kokoonpanomenetelmä osien kohdilla saadaan valittua työlistan avulla. Siinä vertaillaan menetelmien eroavaisuuksia eri mittareiden avulla. Työlistassa voidaan tutkia esimerkiksi seuraavia asioita: operaatioiden lukumäärä, käsittelyaika, asennusaika, kokonaisaika, vaiheiden vaikeusaste, osien teoreettinen minimimäärä ja eri vaiheiden kustannukset. Työlistan avulla saadaan koottua kaikki tärkeimmät tiedot tapauskohtaisesti ylös. (Boothroyd 2005, s. 304)

Työlistassa olevia osa-alueita voidaan painottaa tilanteen mukaan. Jokaisella kokoonpanomenetelmällä on oma työlista, johon kerätään menetelmää käyttämällä saatavia tietoja ylös. Kaikkien menetelmien kohdalla ei voida vertailla jotain kyseistä mittaria, mutta työlistojen avulla saa kokonaiskuvan kokoonpantavuuden helppoudesta ja kustannuksista. Niiden avulla menetelmät voidaan asettaa paremmuusjärjestykseen (Andreasen 1988, s. 154). Työlistoissa olevien lopputulosten laskemisperiaatetta ei käydä tässä työssä läpi.

B&D-menetelmässä kerätään siis ensiksi ylös kaikki tarvittavat tiedot, jonka jälkeen tuotteessa olevat osat identifioidaan loogiseen järjestykseen purkamisen yhteydessä. Identifioinnin jälkeen tuote kootaan uudestaan menetelmän mukaisesti vähempien osien avulla ja täytetään määritelty työlista. Työlistan perusteella huomataan, kannattaako tuote valmistaa käytetyllä tavalla vai onko tarvetta palata alkuun ja tehdä suunnitelmat uudestaan eri tavalla. Alkuun tarvitsee palata vain silloin, kun nykyistä suunnitelmaa ei pystytä muokkaamaan paremmaksi. (Boothroyd 2005, s. 304)

### **3. MODULAARISUUS JA KOKOONPANOYSTÄVÄLLINEN SUUNNITTELU**

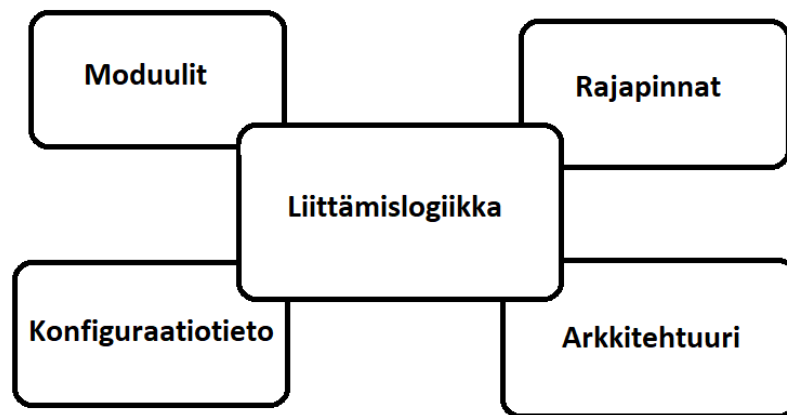
Modulaarisuus on kokonaisuus, joka sisältää useita erilaisia osa-alueita ja käsitteitä. Modulaarisuus on määritelty olevan relatiivinen ominaisuus, joka soveltuessaan tietylle yrityksen alalle on hyödyllinen apuväline tunnistamaan modularisaation hyötyjen luomista. Modulaarisuuden avulla voidaan myös analysoida ja kuvailla tuotteen rakennetta, joka koostuu moduuleista (Pakkanen 2015, s. 53). Modulaarisuutta on mahdollista hyödyntää kokoonpanoissa ja suunnittelutöissä kunhan tiedetään, mistä modulaarisuus koostuu ja mitä osa-alueita kannattaa soveltaa suunnittelutyöhön.

Modulaarisuutta määriteltäessä on syytä selvittää käsitteiden moduuli sekä modularisaatio merkitykset. Kirjallisuudessa kyseisistä käsitteistä on olemassa useita erilaisia määritelmiä, joten tässä työssä esitellään vain yleistetyt määritelmät. Moduuli on määritelty rakenteellisesti itsenäiseksi osaksi suurempaa osakokoonpanoa ja sillä on tiettyjä, ennalta määriteltyjä, funktioita ja ominaisuuksia. Moduuli voidaan siis nähdä rakennuspalikkana osien rakenteessa. (Okudan Kremer & Gupta 2013, s.1959)

Modularisaatio on määritelty seuraavasti: Modularisaation tavoitteena on luoda vaihtelevuutta asiakkaan näkemyksen perusteella, näyttäen samaan aikaan yhteneväisyyksiä moduulivarianttien ja niiden ominaisuuksien kanssa. Tavoitteena on siis yksinkertaistaa yrityksen käyttämiä monimutkaisia operaatioita. Modularisaatioon kuuluu moduulien suunnittelu, modulaarinen arkkitehtuuri sekä hyötyjen kerääminen alueilla, joissa vaikutukset voidaan nähdä luomalla optimaaliset olosuhteet modulaarisuuden avulla (Pakkanen 2015, s. 53). Määritelmässä mainituilla moduulivarianteilla tarkoitetaan erilaisia vaihtoehtoja mahdollistetuille moduuleille.

#### **3.1 Modulaaristen systeemien viisi elementtiä**

Modulaarisuuden huomioon ottamisen mahdollistamiseksi suunnittelussa on syytä kertoa modulaaristen systeemien viisi eri elementtiä, jotka ovat liittämislöyky, moduulit, rajapinnat, arkkitehtuuri sekä konfiguraatitieto. Nämä elementit ovat osana jokaista modulaarista systeemiä, joten niiden huomioiminen on olennaista (Pakkanen 2015, s. 67). Kuvassa 6 on havainnollistettu modulaaristen systeemien elementit.



**Kuva 6:** Modulaaristen systeemien viisi elementtiä, mukailten lähdettä (Pakkanen 2015, s. 68)

Moduulit on jo määritelty aikaisemmassa kappaleessa rakennuspalikoiksi, joiden avulla saadaan rakennettua suurempia kokonaisuuksia. Moduulit voidaan siis ajatella välttämättömiksi komponenteiksi osana modulaarista tuotetta. Modulaarisessa tuotteessa on tunnetusti mahdollista vaihdella sen osia ja tuotteen vaihdettavat osat ovat näitä mainittuja moduuleja.

Konfiguraatitieto on tärkeä elementti, sillä sen avulla pystytään luomaan mahdolliset variaatiot modulaariselle tuotteelle. Konfiguraatio voidaan määritellä esimerkiksi seuraavalla tavalla. Konfiguraatio on riippuvaista osien tai elementtien järjestelyä kappaleessa. Konfiguraatio koostuu ryhmästä kappaleita ja niiden yhteyksistä, se on erityinen järjestely mahdollisista järjestelyistä. Konfiguraatiolla on myös tarkoitus itsessään, joka on samankaltainen muiden samantyylisten konfiguraatioiden kanssa (Pulkkinen 2007, s. 71)

Konfiguroinnissa käytetään syötteenä asiakasvaatimuksia ja tuloksena on yksilöllinen määrittely tuotteesta. Tarkoituksena on siis muuntaa asiakasvaatimukset moduuleiksi liittämällä valitut elementit konfiguraatioiksi. Konfiguraatioiden muodostamisessa on kolme eri vaihetta: komponenttien valitseminen, yhteyksien luominen valittujen komponenttien välillä sekä soveltuvuuden ja lopputuloksen tyydyttävyyden testaus. Konfiguraatioiden muodostamisessa tuoteperheissä esiintyy viisi eri asiaa: (Pulkkinen 2007)

- jokainen välitetty tuote on sovitettu tietyn asiakkaan tarpeisiin sopivaksi
- jokainen yksittäinen tuote on määritetty kombinaatioksi etukäteen suunnitelluista komponenteista tai moduuleista.
- aikaisemmin kehitettyä tuoterakennetta käytetään hyväksi, mikäli se täyttää annetut vaatimukset
- myynti-välitys-prosessi vaatii pelkästään systemaattista varianttien suunnittelua
- välitettyjen yksittäisten tuotteiden pohjautuminen yleiseen rakenteeseen tarkoittaa sitä, että niiden kombinaatio on tuoteperhe

Konfiguraation voidaan myös sanoa liittyvän kokoonpanoystävälliseen suunnitteluun seuraavien toteamuksien perusteella. Konfiguraatio liittyy suunnitteluun siten, että se muuntaa annettua informaatiota toiseen muotoon säilyttäen vaatimukset. Lisäksi konfiguraatiossa ja suunnittelussa on tarkkaan määritelty tarvittavat lähtötiedot. Konfiguraatiolla on myös yhteneväisyyksiä kokoonpanoon, sillä molemmissa tuodaan osia yhteen ennalta määrätyillä tavoilla. Osavaiheet, kuten osien liittäminen ja niiden paikoittaminen, ovat myös samankaltaisia. Lisäksi molemmissa analysoidaan annettujen vaatimusten täyttämistä. (Pulkkinen 2007, s. 75)

Liittämislogiikan voidaan tiivistetysti sanoa kertovan syyn sille, miksi päädytään tiettyyn moduulijakoon. Suunnittelun tuotteen tulisi täyttää annetut vaatimukset, joten on syytä selittää, mitkä tuotteen osa-alueet tarvitsevat muuntelua ja miksi (Pakkanen 2015, s. 67). Liittämislogiikan avulla saadaan selkeästi esiteltyä kyseisen tuotteen ominaisuuksia ja välitettyä tietoa voidaan käyttää perusteluna valitulle rakenteelle. Muunnettujen osa-alueiden avulla valmistettu tuote on saatu kustomoitua asiakkaalle sopivaksi.

Rajapinnat määrittävät moduulien riippuvuussuhteen ja vaihdettavuuden. Rajapinnat on eräs avaintekijä modulaarisen systeemin saavuttamiseksi ja tämän vuoksi ne on syytä määritellä systeemin ja sen funktionaalisuuden suunnittelussa (Fatima & Bræk 2016, s. 230). Moduulien välille kannattaa määritellä mahdollisimman yksiselitteiset rajapinnat, jotta saadaan vältettyä vääränlaisia yhdistämisii. Moduloinnin avulla voidaan kasvattaa tuotteen arvoa, mutta moduuleista ei hyödytä, jos niitä ei saada kiinnitettyä tuotteeseen suunnitellulla tavalla.

Arkkitehtuurin avulla annetaan tietoa siitä, kuinka moduulit ja niiden rajapinnat on sijoitettu valmiiseen tuotteeseen. Modulaarinen arkkitehtuuri voidaan jakaa suljettuun ja avoimeen arkkitehtuuriin: Suljetussa arkkitehtuurissa kaikki mahdolliset moduulit ja niiden kombinaatiot on määritelty kun taas avoimessa arkkitehtuurissa tunnetaan vain osa moduuleista. Arkkitehtuurin voidaan sanoa olevan kuvaus modulaarisen systeemin layoutista (Pakkanen 2015). Arkkitehtuurin avulla pyritään esittämään mahdollisimman hyvin tietoa siitä, millaisia vaihtoehtoja tuotteesta voidaan muodostaa käytettävissä olevien moduulien avulla. Suunnittelussa kyseinen asia edesauttaa ratkaisumallien luomistyötä.

### **3.2 Elinkaarimodulaarisuus kokoonpanoystävällisessä suunnittelussa**

Elinkaarimodulaarisuus voidaan määritellä esimerkiksi seuraavalla tavalla. Elinkaarimodulaarisuus tarkastelee modulaarisuutta perustuen valmistuksen, ylläpidon tai logistiikan vaikutuksiin. Elinkaarimodulaarisuudessa moduulien jakaminen voidaan perustaa esimerkiksi valmistuksessa, kokoonpanossa, logistiikassa ja palveluissa oleviin syihin. Tämän seurauksena vaihtoehtoisia moduuleja ei tarvita ja siitä johtuen modulaarista systeemiä ei tarvita, eikä sitä yleensä edes esiinny. (Pakkanen 2015, s. 53)

Kokoonpanoystävällisessä suunnittelussa pyritään pienentämään tuotteen kustannuksia jo mahdollisimman aikaisessa vaiheessa ja saamaan aikaiseksi paras mahdollinen lopputuote (Rufe 2013, s. 181). Elinkaarimodulaarisuuden oikeaoppisella hyödyntämisellä on

mahdollista saada laadukkaita tuloksia minimoiduilla kustannuksilla. Ennen kuin elinkaarimodulaarisuutta voidaan soveltaa, on tärkeää selvittää, millaisia tyypejä kyseinen käsite sisältää.

Lehtonen (2007, s. 89-91) tarkastelee elinkaarimodulaarisuutta valmistuksen, ylläpidon ja logistiikan näkökulmista. Kolmen eri esimerkkitapauksen avulla on havainnollistettu modulaarisuuden toteuttamista kyseisissä vaiheissa. Ensimmäisessä tapauksessa moduulit valmistetaan erikseen ja kootaan valmiiksi tuotteeksi. Toisessa tapauksessa moduuleja pystytään vaihtamaan ylläpidossa ja kierrättämään niitä. Kolmannessa tapauksessa tuotteen moduulit voidaan kuljettaa erikseen kokoonpanopaikalle ja koota valmis tuote siellä. Näitä tapauksia käsitellään seuraavissa kappaleissa.

Kokoonpanoystävällisen tuotteen suunnitteluvaiheessa on mahdollista määrittää mahdollisen moduloinnin paikka tuotteen elinkaareissa. Eräs vaihtoehto on moduloida tuote johon valmistusvaiheessa, jolloin jokaista moduulia voidaan valmistaa erikseen ja koota niistä valmis tuote. Tämän pitäisi helpottaa valmistusta ja kokoonpanoa ja näin ollen pienentää kustannuksia mainituista vaiheista. Valmiissa tuotteessa ei aina ole mahdollista päivittää moduuleja, joten moduloinnista on merkittävää hyötyä ainoastaan valmistuksessa ja kokoonpanossa.

Toisenlainen lähestymistapa elinkaarimodulaarisuuteen on suunnitella moduulit olevan ylläpidon ja kierrätyksen kannalta hyödyllisiä. Tässä tavassa valmistus ja kokoonpano hoidetaan keskittymättä moduuleihin, mutta kokoonpanovaiheeseen siirryttäessä tuotteeseen voidaan määrittää moduuleja, joita on helppo päivittää ja mahdollisesti myös kierrättää. Ylläpidosta tulee siis tehokkaampaa ja halvempaa, sillä määritetyt moduulit on helppo vaihtaa.

Elinkaarimodulaarisuutta voidaan myös lähestyä sellaisesta näkökulmasta, jossa kokoonpanossa käytettävät moduulit kuljetetaan erikseen kokoonpanopaikalle. Tämä helpottaa huomattavasti suurien tuotteiden kokoonpanoa, sillä kuljetuksesta tulee yksinkertaisempaa ja halvempaa verrattuna tapaukseen, jossa massiivinen tuote kuljetettaisiin kokonaisuudessaan kohteeseensa. Moduulijako voidaan tehdä siten, että lopullinen tuote saadaan toimitettua perille ilman erityisjärjestelyitä, kuten esimerkiksi leveitä kuljetuksia. Kokoonpanoystävällisessä suunnittelussa tulisi siis ottaa huomioon logistiikka ja sen vaikutus kokonaiskustannuksiin.

Modulaarisuuden ja kustannuksien yhteydestä on tehty lukuisia tutkimuksia. Guo & Gershenson (2007) tutkivat elinkaarimodulaarisuuden elinkaaren aikana syntyvien kustannuksien yhteyttä ja vertasivat sitä aikaisemmin tehtyihin tutkimuksiin. Tutkimuksessa todettiin yleisesti ottaen modulaarisen arkkitehtuurin olevan merkittävin syy elinkaarikustannuksien pienenemiseen. Tutkimuksessa mainittiin, että moduulien helppo yhdistäminen helpottaa kierrätettävyyttä sekä pienentää hävittämisestä aiheutuvia kustannuksia.



Huomioitavaa on kuitenkin se, ettei elinkaarimodulaarisuudella ja elinkaarikustannuksilla ole merkittävää yhteyttä paitsi silloin kun on tehty suuria modulaarisuusmuutoksia. Kyseinen tutkimus tukee aikaisemmissa luvuissa esitettyjä lähestymistapoja sekä muistuttaa, että modulointi tulisi tehdä kunnolla parhaan mahdollisen lopputuloksen varmistamiseksi.

Elinkaarimodulaarisuudella on siis vaikutusta kokoonpantavuuteen ja sen huomioon ottaminen suunnitteluvaiheessa on hyödyllistä. Kokoonpanokustannuksia saadaan pienennettyä esiteltyjen lähestymistapojen avulla. Huomioitavaa on se, että hyötyjä pystytään saavuttamaan usealla eri tavalla ja tämän ansiosta kaikkiin suunnittelutapauksiin löytyy jonkinlainen tehokas menetelmä esimerkiksi kustannuksien pienentämiseksi.

## 4. MODULAARISUUTTA HYÖDYNTÄVIÄ MENETELMIÄ KOKOONPANOIHIN JA SUUNNITTELUUN

Modulaarisuus on melko laaja konsepti, joten sitä voidaan toteuttaa usealla erilaisella lähestymistavalla. Tässä luvussa käsitellään ensiksi kokoonpanoissa käytettäviä menetelmiä, jonka jälkeen esitellään suunnittelussa hyödynnettäviä tapoja. Lopuksi kerrotaan, millä tavoilla modulaarisuutta voidaan mitata. Tämän luvun tarkoituksena on esitellä erilaisia tapoja, mutta huomioitavaa on, että kirjallisuudesta löytyy lukuisia muitakin vaihtoehtoja modulaariseen kokoonpanoystävälliseen suunnitteluun.

### 4.1 Kokoonpanoissa käytettäviä modulaarisuuden menetelmiä

Kirjallisuudesta löytyy monia eri vaihtoehtoja mutta tässä alaluvussa käydään läpi kolme laajasti tunnettua menetelmää. Käsiteltävät menetelmät ovat funktioheuristinen menetelmä (function heuristic method, käytetään lyhennystä FHM), käyttäytymisperäinen funktioympäristöjärjestelmä (behavioral-driven function-environment-structure, lyhennettynä B-FES) sekä hajoamislähestyminen (decomposition approach, lyhennys on DA). (Okudan Kremer & Gupta 2013, s. 1959)

**FHM** kehitettiin funktionaalisen rakenteen moduulien tunnistamista varten. Kyseisen menetelmän avulla suoritettavasta moduulien tunnistamisesta on hyödyllistä esimerkiksi tuoteperheen moduloinnissa (Philipa et al. 2013, s. 3806). Moduulirakenteen hahmottaminen on välillä vaikeaa, mutta FHM on hyvä apuväline moduulien tunnistamiseen. Funktioheuristinen menetelmä koostuu erilaisista vaiheista, jotka esitellään seuraavaksi.

Ensimmäisessä vaiheessa luodaan musta laatikko-malli, joka havainnollistaa systeemin syöte- ja tulostevirtoja. Tämän avulla saadaan ensimmäinen näkemys tuotteesta tapahtuvista asioista. Seuraavassa vaiheessa kehitetään osafunktioista muodostuvaa ketjua. Kyseiset funktiot noudattavat standardisanoitua ja muodostavat kronologisen ketjun, jonka lopputuloksena on funktionaalinen malli lopputuotteesta. Viimeisessä vaiheessa tunnistetaan moduulit kolmen suosittelun heuristiikan avulla. Ensimmäisessä heuristiikassa tunnistetaan dominoivia virtoja musta laatikko-mallista ja järjestetään ne moduuleiksi virtauksien perusteella. Toisessa heuristiikassa tunnistetaan haarautumiskohtia ja muodostetaan moduulit haarautumisten perusteilla. Viimeisessä heuristiikassa puolestaan tunnistetaan moduulit sellaisten osafunktioiden avulla, jotka muuttavat materiaali/energiavirtaa toisen tyyppiseksi materiaaliksi tai energiaksi. (Okudan Kremer & Gupta 2013, s. 1963)

**B-FES** käyttää FHM:n tapaan funktionaalista mallinnusta hyväkseen tavoitteisiin pääsyssä. B-FES:n tavoitteena on löytää tuloste, joka käyttäytyy halutun kaltaisen funktion mukaisesti. Menetelmässä on kolme kerrosta: funktio-, ympäristö- ja käyttäytymiskerros (Okudan Kremer & Gupta 2013, s. 1966). Näiden kerrosten avulla menetelmää pystytään jaottelemaan sopivien tulosteiden sekä moduulien löytämisen helpottamiseksi. Jaottelun ansiosta menetelmä on monipuolinen ja luotettava.

Funktiokerroksessa määritellään ulkoisia funktioita siten, että ne on mahdollista toteuttaa muissa kerroksissa. Joissain tapauksissa funktiot osoittautuvat liian monimutkaisiksi vasta jälkikäteen. Tässä tapauksessa ne ohjataan takaisin funktiokerrokseen ja yksinkertaistetaan esimerkiksi osafunktioiksi jaottelun avulla (Tor et al. 2002, s. 670). Moduulien onnistumisen kannalta suunnittelulla on suuri merkitys ja tämä vaihe vaikuttaa suoraan toiminnollisuuteen, joten se on tärkeä.

Ympäristökerroksessa pyritään täyttämään ympäristön aiheuttamien solmukohtien avulla funktionaaliset vaatimukset käyttäytymisille käyttäytymiskerrosta varten. Toinen mahdollisuus on keskittyä funktiokerroksessa olevien toivottujen funktioiden toteuttamiseen (Okudan Kremer & Gupta 2013, s. 1966). Ympäristö aiheuttaa rajoitteita, joita ei pysty muuttamaan. Tässä kerroksessa vallitsevat olosuhteet koitetaan muuntaa mahdollisimman suotuisiksi modulaarisuutta silmälläpitäen.

Käyttäytymiskerroksessa itse käyttäytyminen on määritelty olevan funktionaalisten vaatimusten käyttäytymismallien sekä funktionaalisten tulosteiden muodostama kokonaisuus. Tässä kerroksessa on kolme erilaista lähestymistapaa, joista ensimmäisessä pyritään pääsemään haluttuun toiminnollisuuteen käyttäytymisellä saatavan toiminnallisen tulosteen kautta. Toinen mahdollisuus on yhdistellä osafunktioiden käyttäytymisiä ja saada siten toimiva kokonaisuus. Kolmas mahdollisuus on linkittää käyttäytymisiä ja jakaa ne toiminnollisuuksien perusteilla myöhemmin osafunktioiksi. (Tor et al. 2002, s. 668-670)

**DA** ottaa huomioon kulut ja moduulien koot yleispätevien modulaaristen tuotteiden luomisessa. Menetelmä toimii, vaikka kaikkea mahdollista informaatiota ei olisikaan saatavilla (Okudan Kremer & Gupta 2013, s. 1962). Kyseisen menetelmän huomattavana etuna on se, ettei kaikkea tarvitse olla määriteltynä lähestymistavan lähtöasetelmassa. Suunnitteluvaiheessa tämä on todennäköinen skenaario, joten moduulien luominen suunnittelussa ilman kaiken kattavia lähtötietoja on erittäin hyödyllistä.

DA:n ensimmäisessä vaiheessa muodostetaan vuorovaikutus- ja soveltuvuusmatriisit, joita lähdetään sitten muokkaamaan. Lähtötilanteessa tuotteella on tietty määrä komponentteja, joita aletaan jaottelemaan ja niiden tärkeyksiä ruvetaan tutkimaan (Huang & Kusiak 1998, s. 70). Menetelmässä tarvitsee siis tietää komponenttien lukumäärä, sekä käytettävissä olevat resurssit. Näiden pohjalta voidaan suorittaa tarvittavat toimenpiteet ja saada aikaan toimivia tuotteita.

DA:ssa hyödynnetään siis matriiseja moduulien määrittelyssä. Puutteellinen tieto ei ole este tässä menetelmässä sillä perusteella, että liian aikaisessa vaiheessa määritellyt moduulit voivat olla vääriä myöhemmässä vaiheessa. Vuorovaikutusmatriisiin muodostetaan kolmioita ja soveltuvuusmatriisi uudelleen järjestellään. Tämän jälkeen ne yhdistetään modulaarisuusmatriisiksi (Okudan Kremer & Gupta 2013, s. 1967). Modulaarisuusmatriisi on lähtökohtana lisämuokkauksille sekä lopullisten moduulien muodostamiselle.

Modulaarisuusmatriisista aletaan poistamaan komponentteja, jotka eivät ole toivottuja lisä sisällytettäviksi moduuliin tai joilla ei ole vuorovaikutusta muihin komponentteihin. Komponentteja poistetaan niin kauan kunnes jäljellä on vain komponentteja, joita ei voida poistaa. Poistamisen jälkeen aletaan kopioimaan komponentteja, jotka ovat erittäin toivottuja lisä kahteen moduuliin samanaikaisesti sekä hyödyllisiä ja tärkeitä komponentteja, joiden monistaminen ei aiheuta komplikaatioita moduulissa. Myös kopiointia jatketaan niin kauan kunnes komponentteja ei enää pystytä kopioimaan (Huang & Kusiak 1998, s. 70). Muokkausten jälkeen lopulliset moduulit voidaan jaotella ja saada aikaan toimiva ja tehokas kokonaisuus.

FHM, B-FES sekä DA ovat kaikki menetelmiä, joiden avulla pyritään tunnistamaan moduuleja ja tekemään tuotteeseen moduulijakoa. Menetelmien lähestymistavat ovat erilaisia ja huomioitavaa on myös se, että kirjallisuudesta löytyy myös lukuisia muita malleja kyseiseen tehtävään. Tämän työn perusteella ei siis löydy ratkaisua moduulijaon tekemiseen jokaisessa suunnitteluprosessissa. Kokoonpanoystävällisessä suunnittelussa moduulijaon voidaan sanoa hyödyttävän sitä, sillä sen avulla saadaan jaoteltua tuote selkeisiin kokonaisuuksiin, jotka on myös mahdollista liittää toisiinsa helposti ja tehdä kokoonpanosta mahdollisimman hyvä.

## 4.2 Modulaarisia suunnittelumenetelmiä

Suunnittelutöissä on mahdollista hyödyntää modulaarisuutta monella eri tavalla. Tässä aliluvussa esitellään muutama menetelmä modulaarisuuden hyödyntämiseen tuotetta suunniteltaessa. Modulaariset suunnittelumenetelmät voidaan jakaa neljään eri pääkategoriaan: muistilistamenetelmään, suunnittelusääntöihin, matriisien muokkaamiseen sekä askel askeleelta mittaukseen ja uudelleensuunnittelumenetelmään. (Gershenson et al. 2004, s. 39)

Muistilistat ovat yleensä yksinkertaisia ja ei niin tehokkaita kuin muut menetelmät. Suunnittelusäännöt ovat ennakoivia ja helposti toteutettavia, mutta niiden avulla ei saada vietä suunnittelua lopputuotteen tasolle asti. Matriisimuokkaus on yksityiskohtaisempaa mutta vaatii enemmän lähtötietoja. Askel askeleelta mittaus ja uudelleensuunnittelumenetelmä ovat lähestulkoon aina osana matriisimuokkausta ja vaativat moduulien muokkaamisen yksi kerrallaan perustuen modulaarisuusmittauksiin (Gershenson et al. 2004, s. 39). Jokaisessa tavassa on siis omat vahvuutensa ja heikkoutensa, mutta oikeaa kategoriaa käyttämällä päästään hyvään lopputulokseen.

**Holonic product design (HPD)** on tuotteen modulointiin ja realisointiin liittyvä muistilistamenetelmä, joka tarjoaa helppopääsyisen ja kustomoitavan työkirjan modulaarisen tuotteen kehittämiseen (Marshall & Leaney 2002, s. 293). HPD on hyödyllinen apuväline yrityksille, sillä sen avulla saadaan selville monia tärkeitä syitä ja ohjeistuksia erilaisiin tilanteisiin.

HPD:n itsearviointi auttaa yrityksiä seuraavilla tavoilla: Selventää syyt mahdolliseen modulaarisen tuotteen arkkitehtuurin muuttamiseen. Selkeyttää liikestrategian ja yrityksen tavoitteita. Määrittää yrityksen organisaatiota selkeämpään suuntaan. Asettaa hyvän lähtökohdan HPD-menetelmäopille myöhempää käyttöä varten. Tarkastelee nykyisten ja tulevaisuudessa valmistettavien tuotteiden ominaisuuksien soveltuvuutta modulaarisuuteen. Tarjoaa ohjeistuksen sopivasta modulaarisuusasteesta tuotteelle ja itse yritykselle. (Gershenson et al. 2004, s. 40)

HPD edustaa yleispätevää lähestymistapaa jossa esitetään yksityiskohtia prosesseista ja niiden perimmäisistä periaatteista. Tavoitteena on saada mahdollisimman tarkka kokonaiskuva suunnittelun toteutuksesta. Menetelmä koostuu kolmesta eri tasosta jotka ovat systeeminsuunnittelu, modulaarisuusmetodologia ja modulaarisen tuotteen kehitysprosessi (Marshall & Leaney 2002, s. 296). Edeltävä taso tukee aina seuraavaa, joten on tärkeää käyttää mahdollisimman montaa tasoa luotettavimman lopputuloksen varmistamiseksi.

Menetelmä koostuu seuraavista avainpiirteistä: modulaarisuusaste, moduulin määrittely ja itseanalyysi. Modulaarisuusaste määräytyy kompleksisuuden, resoluution (eli moduulien lukumäärän) ja rakenteen (tuotteen eri moduulien monimutkaisuuden) mukaan. Modulaarisuusaste vaikuttaa muun muassa suorituskykyyn, moduulien valmistettavuuteen, kokonaiskustannuksiin sekä muokattavuuteen. Moduulin määrittely on monimutkainen ja intuitiivinen prosessi, mutta sen yksinkertaistamiseksi on laadittu esimerkiksi seuraavia ominaisuuksia: vuorovaikutukset, geometria, funktioiden hyväksikäyttö, toimittajan kyvykyys, luonnolliset moduulit, konfigurointi, standardointi ja valmistettavuus. (Marshall & Leaney 2002)

Moduulijaon jälkeen vuorovaikutukset on selvitetty ja voidaan kehittää moduuleja, joilla on liikaa tai liian vähän vuorovaikutuksia muiden moduulien kanssa. Tämän jälkeen siirytään itsearviointiin. Menetelmässä on seitsemän kysymystä, joiden perusteella määritetään lopullinen modulaarisuusaste ja valitaan paras vaihtoehto (Marshall & Leaney 2002, s. 300). Vaikka menetelmää on helppo seurata, se on vain ohjeistus ja muistilista. HPD:n avulla saadaan vältettyjä konflikteja mutta menetelmän vähäisestä syvyydestä ja heikosta rakenteesta johtuen se ei ole usein paras mahdollinen menetelmä. (Gershenson et al. 2004, s. 40)

**Gu et al. (1997)** kehittivät suunnittelumenetelmän, jonka avulla tuotetta voidaan moduloida elinkaareen liittyvien tavoitteiden täyttämiseksi. Menetelmässä ylläpidetään tuotteen halutut toiminnollisuudet ja moduulit voidaan muodostaa yhden tai useamman tavoitteen perusteella. Menetelmässä on kolme päävaihetta, jotka ovat ongelman määrittely, vuorovaikutusanalyysi ja moduulien muodostaminen. (Gu et al. 1997, s. 71)

Ongelman määrittely sisältää suunnitteluongelmien tyyppin ja tunnuspiirteiden identifioinnin, jossa ongelma pilkotaan osaongelmiksi ja ratkaistaan modularisaation tavoitteet. Tässä päävaiheessa tutkitaan aluksi suunnittelutavoitteiden relatiivisia tärkeyksiä ja niiden vaikutusta tavoitteisiin, tämän jälkeen selvitetään osaongelmat toimintojen rakentamiseen perustuen. Lopuksi identifioidaan tunnuspiirteet tutkimalla, kuinka hyvin erilaiset tavoitteet pystytään täyttämään. (Gu et al. 1997)

Vuorovaikutusanalyysissä jokainen modulaarinen suunnittelu vaatii tietyn verran moduuleihin vaikuttavia tekijöitä, jotka pitää ottaa huomioon. Jokaiselle tavoitteelle asetetaan vuorovaikutuksista aiheutuvat arvot, jotta voidaan arvioida tavoitteiden täyttymistä. Tämän jälkeen muodostetaan vuorovaikutusmatriisi, josta nähdään eri komponenttien välillä olevat arvot. Nämä arvot skaalataan asteikolle 0-10 ja lasketaan painotettu keskiarvo perustuen komponenttiparien vuorovaikutukseen (Gershenson et al. 2004, s. 43). Näitä arvoja voidaan hyödyntää seuraavassa vaiheessa. Arvojen laskemista ei käydä läpi tässä työssä.

Moduulien muodostaminen sisältää komponenttien ryhmittämisen moduuleiksi, jotta niiden vuorovaikutukset voidaan paikallistaa ja minimoida. Käyttäjä voi halutessaan määrittää joitain rajoituksia, kuten moduulien lukumäärän ja määrättyjen komponenttien kuumumisen tiettyyn moduuliin. Ryhmittely tehdään menetelmässä määritettyjen kaavojen avulla, joista saadaan moduuleille rangaistusarvot. Suunnittelijan viimeinen homma on muokata vakioita, jotta rangaistusarvot saadaan tilanteesta riippuen halutulle tasolle. Menetelmällä saadaan siis muodostettua moduuleja annetun algoritmin avulla, mutta kyseinen algoritmi ei välttämättä toimi aina, esimerkiksi silloin kun kahta komponenttia ei voi sovittaa toisiinsa. (Gu et al. 1997, s. 72)

**Gershenson et al.** käyttävät menetelmää jossa prosessien elinkaarimodulaarisuus määritellään moduuleista ja vuorovaikutuksista, jotka koostuvat komponenteista. Nämä komponentit käyvät läpi elinkaaren eri vaiheet (muun muassa kehitys, testaus, valmistus ja kokoonpano). Menetelmää voidaan hyödyntää huollossa, valmistuksessa ja sovelluksissa, joita tarvitaan elinkaaren lopussa (Gershenson et al. 2003, s. 299). Kyseinen menetelmä käyttää hyväkseen aikaisemmin tutkittuja asioita yrittäen saada niistä toimivamman kokonaisuuden.

Menetelmän tavoitteena on uudelleen suunnitella tuote eliminoimalla tai uudelleenjärjestelemällä komponentteja tai moduuleja. Kolmas tapa on muuttaa komponentin ominaisuuksia. Eliminointi on näistä kolmesta yksinkertaisin. Uudelleenkonfigurointi aiheuttaa

komponenttien siirtämistä muihin moduuleihin nostaen kokonaisuuden relatiivista modulaarisuutta. Komponenttien ominaisuuksien muuttamisella pyritään vähentämään ulkoisia samankaltaisuuksia ja riippuvaisuuksia tai kasvattamaan sisäisiä samankaltaisuuksia ja riippuvaisuuksia. Jokainen vaihe riippuu aikaisemmasta vaiheesta, jonka johdosta suunnittelijalle jää vastuu oikean järjestyksen noudattamisesta. (Gershenson et al. 2004, s. 44)

Riippumattomuus ja samankaltaisuus ovat tärkeä osa menetelmää. Näitä voidaan lisätä kolmesta eri näkökulmasta. Ensimmäinen eli ominaisuuksien riippumattomuus sallii moduulin uudelleen suunnittelun minimoiden sen vaikutuksen tuotteen muihin osiin. Komponenttien riippuvaisuudet muihin moduuleihin yritetään siis minimoida. Toinen näkökulma on nimeltään prosessien riippumattomuus, joka sallii pienemmän kustannuksen elinkaariprosessiin ja moduulien eristämisen uudelleen suunnitteluun. Myös tässä näkökulmassa pienennetään riippuvaisuuksia moduulin ja muiden komponenttien kanssa. Viimeisessä näkökulmassa, prosessien samankaltaisuus, yhdistellään yhdessä moduulissa olevia komponentteja ja osakokoonpanoja, jotka käyvät läpi samanlaisia elinkaaren vaiheita. Tarkoituksena on minimoida toisto, saada selkeä erottelu moduulien välille ja vähentää prosessin kustannuksia. (Gershenson et al. 2003, s. 301)

Menetelmä sallii suunnittelijan vaikuttaa asteeseen, joka vaikuttaa kokonaisuuteen. Suunnittelussa on siis joustavuutta ja tavoitteet voidaan saavuttaa usealla eri tavalla. Tällä menetelmällä saadaan tuotteita, jotka sopeutuvat hyvin muuttuviin tilanteisiin, esimerkiksi moduulien vaihto on suhteellisen helppoa (Gershenson et al. 2003, s. 307). Toisaalta menetelmällä on myös heikkous. Tämä menetelmä on hidas ja kallis verrattuna muihin menetelmiin erityisesti monimutkaisten tuotteiden kohdalla. Lopputulokset ovat hyviä, mutta suunnittelijan vastuulle jää miettiä, onko kyseinen menetelmä käytettyjen resursien arvoinen. (Gershenson et al. 2004, s. 44)

### 4.3 Modulaarisuuden mittaus

Aikaisemmissa luvuissa ja aliluvuissa on määritelty modulaarisuuteen liittyviä käsitteitä ja käyty läpi erilaisia menetelmiä hyödyntää modulaarisuutta. Jokaisella menetelmällä on omat vahvuutensa ja heikkoutensa, joten on tarpeellista tietää, millä eri tavoilla modulaarisuutta voidaan mitata. Tässä aliluvussa käydään läpi muutamia eri menetelmiä ja kerrotaan, miten niissä mitataan ja arvioidaan modulaarisuutta ja sen onnistuneisuutta. Kirjallisuudessa on myös monia muita menetelmiä, joten tämä työ kattaa vain rajatun valikoiman mittaamistapoja.

Modulaarisuuden mittaamisessa voidaan tunnistaa kaksi erilaista tapaa, jotka liittyvät rajapintoihin ja toiminnollisuuksiin. Ensimmäisen tavan periaatteena on, että mitä enemmän on rajapintoja tai suljettuja rajapintoja, sitä pienempi on modulaarisuusaste. Toisen tavan mukaan mitä enemmän tuotteella on funktioita tai jaettuja funktioita, sitä pienempi on modulaarisuusaste. Nämä tavat käsittelevät vain yhtä dimensiota modulaarisuudesta,

esimerkiksi erotettavuutta tai uudelleenyhdistämistä, joten niillä ei aina saa kattavaa kuvaa kokonaistilanteesta. (Cabigiosu & Camuffo 2017, s. 105)

Rajapintoja ja toiminnollisuutta voidaan tarkastella neljällä eri tavalla, jotka on skaalattu nollan ja ykkösen väliin. Nolla tarkoittaa pienintä mahdollista modulaarisuustasetta ja ykkönen puolestaan suurinta. Ensimmäisessä tavassa funktioiden kokonaismäärä ja suljetut rajapinnat lasketaan yhteen ja otetaan siitä käänteisluku. Tätä tapaa voidaan käyttää tuotehierarkian jokaisella tasolla. Toisessa tavassa korvataan funktioiden kokonaismäärä jaettujen funktioiden määrä lisätynä yhdellä. Tämä on variantti ensimmäisestä tavasta. Kolmannessa tavassa lasketaan kokonaisfunktiot ja painotetut kokonaisrajapinnat yhteen, jonka jälkeen siitä otetaan käänteisluku ja kerrotaan skalaareilla, joka ovat nollaa suurempia. Neljännessä tavassa jaetut funktiot ja kokonaisrajapinnat lasketaan yhteen ja otetaan siitä käänteisluku. Nämä tavat voidaan esittää kaavamuodoissa

$$\frac{1}{\text{Funktioiden kokonaismäärä} + \text{Suljetut rajapinnat}}, \quad \frac{1}{1 + \text{Jaetut funktiot} + \text{Suljetut rajapinnat}},$$

$$\frac{\zeta_1}{\text{Funktioiden kokonaismäärä} + \zeta_2 * \text{Kokonaisrajapinnat}}, \quad \frac{1}{\text{Jaetut funktiot} + \text{Kokonaisrajapinnat}}$$

missä  $\zeta_1$  ja  $\zeta_2$  ovat nollaa suurempia skalaareja (Cabigiosu & Camuffo 2017, s. 105). Tapoja voidaan käyttää sen mukaan, millaisia suureita tiedetään. Erityisesti kolmas tapa on hyvä jos halutaan painottaa tiettyjä arvoja enemmän kuin toisia.

**Newcomb et al.** ovat kehittäneet tavan, jossa mitataan modulaarisuutta kahdesta eri näkökulmasta. Ensimmäisessä näkökulmassa tutkitaan, kuinka hyvin moduulit ovat sopu- soinnussa eri tavoilla tarkasteltuna. Tässä tavassa lasketaan vastaavuusarvo. Toisessa näkökulmassa puolestaan mitataan satunnaisia vuorovaikutuksia moduulien välillä. Tätä kutsutaan nimellä ryhmän riippumattomuus. Ennen kuin modulaarisuutta voidaan mitata, on syytä selvittää tuotteessa olevat moduulit (Newcomb et al. 2003, s. 252). Moduulien selvitystä ei käydä tässä aliluvussa läpi, sillä pääpainotus on modulaarisuuden arvioin- nissa.

Modulaarisuuden sanotaan olevan paras silloin kun kahden arkkitehtuurin välillä oleva vastaavuus on yhden suhde yhteen. Vastaavuusarvo (CR) lasketaan kaavalla

$$CR = \frac{|V_i(x) \cap V_j(x)|}{|V_i(x) \cup V_j(x)|},$$

jonka arvo on nollan ja yhden välillä. Ykköistä lähellä oleva arvo tarkoittaa suurta vastaa- vuutta ja päinvastoin. Symboli  $V(x)$  tarkoittaa valitusta näkökulmasta tarkasteltavaa mo- duulia, joka sisältää komponentit  $x$ . Vastaavuusarvo on hyvä moduulikohtaisessa vertai- lussa, mutta kahden eri suunnittelun välinen vertailu ei onnistu jos niillä on merkittävästi erilaiset moduulit. Eri suunnittelujen välinen vertailu onnistuu kuitenkin jakamalla vas- taavuusarvo kaikkien eri moduulien keskiarvona. Tämä tuottaa vastaavan luvun nollan ja



ykkösen väliltä ja sen avulla voidaan arvioida koko tuotteen modulaarisuutta. (Newcomb et al. 2003, s. 253)

Toinen modulaarisuuden arvioinnin näkökulma mittaa satunnaisia vuorovaikutuksia moduulien välillä ryhmän riippumattomuusarvon avulla. Moduulien riippuvaisuus määritellään moduulien väliseksi fyysiseksi kontaktiksi. Moduulien väliset yhteydet ovat tärkeitä, mutta ne täytyy rikkoa jos moduulit halutaan erottaa toisistaan. Tämän vuoksi lasketaan myös sisäisten moduulien ja kaikkien tuotteen yhteyksien välinen suhde. Ryhmän riippumattomuus (CI) lasketaan menetelmän kaavalla

$$CI = \frac{\text{Sisäisten moduulien yhteydet}}{\text{Tuotteen kaikkien moduulien yhteydet}}$$

jonka arvoksi saadaan luku väliltä nolla ja yksi. Paras tulos on yksi, joka tarkoittaa että sisäisillä moduuleilla ei ole ollenkaan yhteyksiä tuotteessa. (Newcomb et al. 2003, s. 253)

Menetelmän suositukseksi on käyttää arvioinnissa vastaavuusarvojen keskiarvoa ja ryhmän riippumattomuusarvoa. Menetelmää voidaan soveltaa varsin hyvin tuotteen käytöstä poisotossa, sillä samankaltaisuus ja riippuvaisuus ovat siinä tärkeässä asemassa. Toisaalta menetelmä ei ota niin hyvin kantaa muihin elinkaaren vaiheisiin. Tämä rajoittaa mittauksen soveltuvuutta mutta lisää tarkkuutta tarkasteltavissa alueissa (Gershenson et al. 2004, s. 38). Modulaarisuuden arvioiminen kaiken kattavasti vaatii myös muiden menetelmien käyttämistä samaan tuotteeseen. Tämä vaatii kuitenkin lisää resursseja, joten yrityksen vastuulle jää päättää, kuinka paljon resursseja modulaarisuuden mittaamiseen voidaan käyttää.

**Umeda et al.** mittaavat ja arvioivat modulaarisuutta linkittäen sen tuotteen elinkaaren. Menetelmän tavoitteena on vähentää ympäristölle aiheutuvaa kuormitusta ja tästä syystä resurssien tehokkuus on arviointi-indeksinä sisältäen ekonomisesti tehokkaan toteuttamisen. Modulaarista rakennetta arvioitaessa elinkaaren sopivuus tuotteen moduuleihin on otettava huomioon. Eräänä pääsääntönä voidaan pitää sitä, että moduuli koostuu riittävästä määrästä komponentteja, sillä tämän kaltainen toteutus vähentää ympäristölle aiheutuvaa kuormitusta (Umeda et al. 2009, s. 2). Menetelmässä käytetään erilaisia kaavoja modulaarisuuden mittaamiseen, tässä työssä esitellään tärkeimmät modulaarisuuteen vaikuttavat suureet.

Modulaarisuutta arvioidessa resurssitehokkuus (RE) ja moduulista ympäristölle aiheutuva kuorma (MR) ovat menetelmästä saatavat tärkeimmät arvot. Resurssitehokkuudella tarkoitetaan ympäristöä kuormittavaa kokonaissuuretta, joka aiheutuu tuotteeseen investoiduista resursseista. Mitä suurempi resurssitehokkuuden arvo on, sitä parempi on lopputulos. Suureen avulla tarkastellaan modulaarisuuden vaikutuksia resursseihin ja tätä kautta saadaan selville myös modulaarisuuden onnistuneisuus (Umeda et al. 2009, s. 2). Huomattavaa tässä menetelmässä on se, että modulaarisuuden onnistuneisuutta voidaan tutkia muita suureita laskemalla.

Ympäristökuorman laskemiseen on useita erilaisia tapoja. Ensimmäisessä tavassa oletetaan, ettei tuotteen mitään resursseja voida palauttaa. Elinkaaren muuttujia käyttämällä saadaan laskettua tälle arvo kaavalla  $MR_i = (1 - CR * UR_i) \overline{MR}_i$ , jossa CR on tuotteen keräysaste ja  $UR_i$  moduulin  $i$  uudelleenkäyttöaste. Toisessa tavassa resurssien uudelleenkäyttö otetaan huomioon vähentämällä kulutettuja resursseja ja mahdollistamalla kierrättäminen, minkä jälkeen saadaan ympäristökuormalle arvo kaavalla

$$MR_i = (1 - CR(UR_i + (1 - UR_i)RR_i)) \overline{MR}_i,$$

jossa  $RR_i$  kuvaa kierrätettävyydestä. Kolmannessa tavassa moduuli voidaan kierrättää vain jos se ei läpäise uudelleenkäytettävyyden testiä. Lisäksi kunnossapito ja moduulien päivittäminen vaikuttavat kaavalla  $MR_i = (1 + RN_i) \overline{MR}_i$  laskettuun arvoon, jossa  $RN_i$  kuvaa vaihdettavien osien määrää. Näillä kaavoilla saadaan laskettua jokainen kombinaatio, joka liittyy tuotteen elinkaareen. Myös suureessa MR suurempi lukuarvo on parempi (Umeda et al. 2009, s. 2). Elinkaaren tutkimisen kautta saadaan siis tutkittua modulaarisuuden onnistuneisuutta. Vaikka pääsuureilla ei ole tarkkaan määriteltyä asteikkoa, voidaan lukuarvojen suuruuksista päätellä lopputulos. Erilaiset skenaariot laskennassa mahdollistavat menetelmän luotettavan käytön kaikissa elinkaareen liittyvissä tapauksissa.

**Zhang ja Gershenson** mittaavat modulaarisuutta kahdeksalla eri tavalla, joista jokainen käy läpi viisi samanlaista vaihetta. Ensimmäinen vaihe on tuotearkkitehtuurin hajottaminen, jolloin pystytään erottelun kautta paneutumaan haluttuihin asioihin. Toinen vaihe koostuu seuraavista osista: sovelluskohteen määrittely, syötteen muuttujien asettaminen ja datan arvioinnissa käytettävän menetelmän valinta. Seuraavassa vaiheessa määritellään tuotteessa olevat moduulit, jonka jälkeen neljännessä vaiheessa käytetään syötettä hyödyntäen hajotettua tuotearkkitehtuuria. Viimeisessä vaiheessa muodostetaan matemaattinen malli modulaarisuuden mittaamista varten. (Zhang & Gershenson 2003, s. 121)

Relatiivisen modulaarisuuden mittaaminen on kahden suhteen summa, joista ensimmäinen koostuu sisäisten moduulien samankaltaisuudesta  $S_{in}$  ja niihin vaikuttavien moduulien samankaltaisuudesta  $S_{out}$ . Toinen suhde on sisäisten moduulien riippuvaisuudet  $D_{in}$  jaettuna kaikkien moduulien riippuvaisuuksilla ( $D_{in} + D_{out}$ ). Laskennassa käytettävä kaava modulaarisuudelle (TRM) on

$$TRM = \frac{\sum S_{in}}{\sum S_{in} + \sum S_{out}} + \frac{\sum D_{in}}{\sum D_{in} + \sum D_{out}},$$

jossa käytettävät suureet voidaan itse asettaa. Laskennassa selvitetään komponentin ja prosessin samanlaisuudet sekä komponenttien välisen ja komponentin ja prosessin riippuvaisuudet. Parametreille voidaan antaa subjektiivisia arvoja, jolloin menetelmää voidaan räätälöidä tapauskohtaisesti. Tässä mittaustavassa voidaan laskea modulaarisuus jokaiselle komponentille tuotteen kaikissa elinkaaren vaiheissa. Yksilökohtainen elinkaarimodulaarisuuden mittaaminen on hyödyllisintä komponentin vuorovaikutuksien sekä elinkaareen liittyvän vaikutuksen tapauksissa. (Zhang & Gershenson 2003, s. 123)

Modulaarisuuden mittaamisessa on mietittävä, miten sitä halutaan mitata ja millaisia muuttujia mittaustavassa kannattaa käyttää. Oikean mittaustavan avulla saadaan laskettua tarkka ja luotettava arvo modulaarisuudelle sekä voidaan arvioida tuotteen onnistuneisuutta. Laskennan jälkeen pystytään tekemään perusteltu päätös siitä, onko tuotetta tarvetta muokata jollain tavalla vai voidaanko se lähettää onnistuneena eteenpäin. Mittaaminen on osana modulaarisuutta ja sitä hyödyntämällä saadaan todennäköisemmin aikaan hyvä lopputuote.

## 5. YHTEENVETO

Kandidaatintyöstä syntyi monenlaisia **päätelmiä** ja havaintoja, joita käydään läpi seuraavaksi. DFA:n pohjalla on varsin selkeitä perustietoja, joiden pohjalta periaate voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Appletonin lähestymistapa vaikuttaa olevan tehokas, mutta post-it laput voisi korvata elektronisella merkkäamisella ja kirjata muistiinpanot suoraan tietokoneelle. Erittäin hyödyllisenä pidän, että jokainen tiimin jäsen huomioidaan ja heitä kannustetaan kertomaan omat näkemyksensä eri asioista. Työssä olisi voitu havainnollistaa myös yksilötason menetelmä, mutta esitelty menetelmä on selkeä ja soveltuu hyvin tähän työhön.

Kokoonpanon analysointimenetelmistä CSC-analyysissa parhaimpana ominaisuutena on jokaisen vaiheen tarkastelun mahdollisuus. Menetelmä on esitelty kattavasti ja sen käyttäminen on tehokasta. Proaktiivinen analyysi on puolestaan hyvä menetelmä sen perusteella, että sitä pystyy käyttämään jo DFA:n toteutusvaiheessa. Menetelmän vaihteita ei ole montaa, mutta se mahdollistaa nopean ongelmakohtien löytämisen. Hitachin menetelmässä on puolestaan monta vaihetta, mutta saatavat tulokset ovat luotettavia ja tarkkoja. Menetelmässä saadaan konkreettisia lukuarvoja, joiden pohjalta voidaan tehdä johdopäätöksiä. B&D-menetelmä keskittyy osien vähentämiseen ja tarjoaa hieman erilaisen menetelmän analysointiin. Tässä työssä käytetyt menetelmät soveltuvat moneen eri tapaukseen ja olen tyytyväinen lopputulokseen. Lukija saa kattavan kuvan erilaisista vaihtoehdoista suunnitteluongelmien analysointiin.

Modulaarisuuden sisällyttäminen työhön auttaa havainnollistamaan DFA:n sovelluskohdetta ja tuo lisäarvoa työhön. Elinkaarimodulaarisuus ja modulaaristen systeemien viisi eri elementtiä tarjoavat perustietoa modulaarisuuteen liittyen. Huomattava asia elinkaari-modulaarisuudessa on se, että modulointia voidaan tehdä elinkaaren eri vaiheissa ja täten hyödyntää sitä melko paljon. Tunnettuja kokoonpanoissa käytettäviä modulaarisuuden menetelmiä käydään melko yksityiskohtaisesti läpi, mutta niistä ei tuoda esille esimerkiksi tapauksia tässä työssä. Toisaalta menetelmät tulevat tutuiksi ja ne ovat periaatteiltaan erilaisia, jolloin työstä saadaan kattavampi.

Modulaariset suunnittelumenetelmät osoittautuivat opettavaisiksi. Käydyt menetelmät olivat hyödyllisiä ja niiden käyttäminen ei loppujen lopuksi ole vaikeaa. Kaikista pääkategorioista ei ole esimerkkimenetelmää mutta lukija saa käsityksen, millaisia kategorioita on ja miten esiteltyjä menetelmiä voidaan käyttää. Modulaarisuuden mittaus-aliluvussa eri menetelmiä käytiin läpi yksityiskohtaisesti myös laskentakaavojen kautta. Jälleen kerran menetelmät perustuvat eri lähtökohtiin ja niiden avulla saadaan lukuarvoja mittaamaan modulaarisuuksia. Menetelmien käyttö vaatii lähtötietojen selvittämistä ja niiden oikeaoppinen soveltaminen vie aikaa. Olen tyytyväinen esiteltyihin asioihin ja tähän työhön kokonaisuudessaan.

**Yhteenveto** laaditaan työn kirjoitusjärjestyksen perusteella. DFA on menetelmä, jossa pyritään saamaan mahdollisimman hyvä kokonaisuus kokoonpanon näkökulmasta. Menetelmään liittyvät lähtötiedot, vaiheet ja analysointitavat käytiin läpi luvussa kaksi. DFA:n vaiheet käytiin läpi Appletonin lähestymistavan kautta, joka koostuu neljästä vaiheesta: Kokoonpanon purkaminen, ruudukon muodostaminen, komponenttien tärkeyden tunnistaminen, käsittelymenetelmien tutkiminen ja lopputuloksen arvioiminen (Appleton & Garside 2000). Kokoonpanoystävällistä suunnittelua voidaan arvioida monella eri menetelmällä, joista tässä työssä läpikäytyt ovat CSC-analyysi, Proaktiivinen analysointi, Hitachin menetelmä ja Boothroydin ja Dewhurstin menetelmä. Läpikäytyt menetelmät ovat keskenään erilaisia ja niiden pohjalta voidaan analysoida eri alueita.

Modulaarisuus on laaja kokonaisuus, jota voidaan hyväksikäyttää muun muassa kokoonpanoissa ja suunnittelutöissä. Modulaaristen systeemien viisi eri elementtiä ovat moduulit, rajapinnat, konfiguraatitieto, liittämislogiikka ja arkkitehtuuri (Pakkanen 2015). Elinkaarimodulaarisuutta voidaan harjoittaa DFA:n eri vaiheissa ja näin ollen se vaikuttaa suunnittelutyöhön joskus jopa merkittävästi. Elinkaarimodulaarisuuden liittämällä DFA:han voidaan pienentää tuotteen elinkaaren kustannuksia entisestään ja saada aikaiseksi yhä parempi lopputuote. (Guo & Gershenson 2007)

Modulaarisuutta voidaan hyödyntää kokoonpanoissa seuraavilla läpikäytyillä menetelmillä: Funktioheuristinen menetelmä(FHM), käyttäytymisperäinen funktioympäristöjärjestelmä(B-FES) ja hajoamislähestyminen(DA). Suunnittelussa puolestaan modulaarisuutta pystytään hyödyntämään menetelmillä, joista tässä työssä on esitelty: HPD, Gu et al. (1997) menetelmä ja Gershenson et al. menetelmä. Modulaarisuutta voidaan mitata erilaisilla laskennallisilla menetelmillä, joiden avulla saadaan lukuarvoja modulaarisuuden onnistuneisuudelle. Läpikäytyt menetelmät ovat: Rajapintojen ja toiminnollisuuden menetelmä, Newcomb et al. menetelmä, Umeda et al. menetelmä sekä Zhang ja Gershenson menetelmä.

Kandidaatintyö vastaa kaikkiin tutkimuskysymyksiin ja käy asiat läpi loogisessa järjestyksessä. Läpikäytyissä asioissa on huomioitu työn laajuus ja kaikki toteamukset on pyritty perustamaan lähteisiin uskottavuuden osoittamiseksi. Työn luettuaan lukijalla on varsin kattava ymmärrys kokoonpanoystävällisestä suunnittelusta ja modulaarisuuden vaikutuksesta siihen kuten myös niihin liittyvistä menetelmistä ja analysointitavoista.

## 6. LÄHTEET

Andreasen, M.M. (1988). Design for assembly, 2.th ed, IFS, Bedford, 212 p.

Appleton, E. & Garside, J.A. (2000). A team-based design for assembly methodology, *Assembly Automation*, Vol. 20(2), pp. 162-170. Saatavissa: <http://www.emeraldinsight.com/doi/full/10.1108/01445150010321814>

Booker, J.D., Raines, M. & Swift, K.G. (2001). Designing capable and reliable products, in: Butterworth Heinemann, Oxford; Boston, pp. 37-108. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780750650762>

Boothroyd, G. (2005). Assembly automation and product design, in: 2nd ed., Taylor & Francis, Boca Raton, FL, pp. 219-255. Saatavissa: <http://www.crcnetbase.com/isbn/9781420027358>

Cabigiosu, A. & Camuffo, A. (2017). Measuring Modularity: Engineering and Management Effects of Different Approaches, *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 64(1), pp. 103-114. Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7737009/>

Dalglish, G.F., Jared, G.E.M. & Swift, K.G. (2000). Design for assembly: Influencing the design process, *Journal of Engineering Design*, Vol. 11(1), pp. 17-29. Saatavissa: <http://search.proquest.com/docview/214212027?pq-origsite=summon>

Fatima, U. & Bræk, R. (2016). Modular solutions to common design problems using activities and the interface-modular method, pp. 226-241. Saatavissa: [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-46613-2\\_15](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-46613-2_15)

Gershenson, J.K., Prasad, G.J. & Zhang, Y. (2003). Product modularity: Definitions and benefits, *Journal of Engineering Design*, Vol. 14(3), pp. 295-313. Saatavissa: <http://web.b.ebscohost.com/ehost/detail/detail?vid=0&sid=52393181-51d2-40af-8f5c-f4fb197efb98%40sessionmgr104&bdata=JnNpdGU9ZWZwhvc3QtbGl2ZSZZY29wZT1zaXRl#AN=10779214&db=afh>

Gershenson, J.K., Prasad, G.J. & Zhang, Y. (2004). Product modularity: measures and design methods, *Journal of Engineering Design*, Vol. 15(1), pp. 33-51. Saatavissa: <http://web.a.ebscohost.com/ehost/detail/detail?vid=0&sid=9b945684-fa68-48b5-8b72-a70baa2076c4%40sessionmgr4008&bdata=JnNpdGU9ZWZwhvc3QtbGl2ZSZZY29wZT1zaXRl#AN=11622329&db=bth>

Gu, P., Hashemian, M., Sosale, S. & Rivin, E. (1997). An Integrated Modular Design Methodology for Life-Cycle Engineering, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 46(1), pp. 71-74. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607607781?via%3Dihub>

Guo, F. & Gershenson, J.K. (2007). Discovering relationships between modularity and cost, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 18(1), pp. 143-157. Saatavissa: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10845-007-0007-y>

Huang, C. & Kusiak, A. (1998). Modularity in design of products and systems, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, Vol. 28(1), pp. 66-77. Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/document/650323/>

Leaney, P.G. & Wittenberg, G. (1992). Design for Assembling: The Evaluation Methods of Hitachi, Boothroyd and Lucas, *Assembly Automation*, Vol. 12(2), pp.8-17. Saatavissa: <http://search.proquest.com/docview/212643556?pq-origsite=summon>

Lehtonen, T. (2007). Designing modular product architecture in the new product development, Tampere University of Technology, 220 p. Saatavissa: [https://tutcris.tut.fi/portal/en/publications/designing-modular-product-architecture-in-the-new-product-development\(f2c06d6b-b46f-49b5-9507-f3870abf2f7c\).html](https://tutcris.tut.fi/portal/en/publications/designing-modular-product-architecture-in-the-new-product-development(f2c06d6b-b46f-49b5-9507-f3870abf2f7c).html)

Marshall, R. & Leaney, P.G. (2002). Holonic Product Design: A process for modular product realization, *Journal of Engineering Design*, Vol. 13(4), pp. 293-303. Saatavissa: <http://web.a.ebscohost.com/ehost/detail/detail?vid=0&sid=ca8ccb31-54b8-437f-b381-4b8c45f9577e%40sessionmgr4006&bdata=JnN-pdGU9ZWhvc3QtbGl2ZSZzY29wZT1zaXRl#AN=8987480&db=afh>

Mo, J., Cai, J., Zhang, Z. & Lu, Z. (1999). DFA-oriented assembly relation modelling, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 12(3), pp. 238-250. Saatavissa: <http://web.b.ebscohost.com/ehost/detail/detail?sid=2232d394-45cb-4351-9bbc-9e89357825b0%40sessionmgr104&vid=0&hid=101&bdata=JnN-pdGU9ZWhvc3QtbGl2ZSZzY29wZT1zaXRl#AN=3838232&db=bth>

Moultrie, J. & Maier, A.M. (2014). A simplified approach to design for assembly, *Journal of Engineering Design*, Vol. 25(1-3), pp. 44-63. Saatavissa: <http://web.b.ebscohost.com/ehost/detail/detail?sid=3c06cd6d-a8f4-4fbc-bb98-75b2263bc872%40sessionmgr120&vid=0&hid=101&bdata=JnN-pdGU9ZWhvc3QtbGl2ZSZzY29wZT1zaXRl#AN=96412226&db=bth>

Newcomb, Rosen & Bras (2003). Life cycle modularity metrics for product design, IEEE, pp. 251-258. Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1322671/>

Ohashi, T., Iwata, M., Arimoto, S. & Miyakawa, S. (2002). Extended Assemblability Evaluation Method (AEM) - (Extended quantitative assembly producibility evaluation for assembled parts and products), JSME International Journal Series C-Mechanical Systems Machine Elements and Manufacturing, Vol. 45(2), pp. 567-574. Saatavissa: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmec/45/2/45\\_2\\_567/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmec/45/2/45_2_567/_article)

Okudan Kremer, G. & Gupta, S. (2013). Analysis of modularity implementation methods from an assembly and variety viewpoints, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 66(9-12), pp. 1959-1976. Saatavissa: <http://web.a.ebscohost.com/ehost/detail/detail?sid=0d955300-1dd8-411e-a313-fb01e1fcfb4%40sessionmgr4009&vid=0&hid=4109&bdata=JnN-pdGU9ZWhvc3QtbGl2ZSZzY29wZT1zaXRl#AN=87785797&db=afh>

Pakkanen, J., (2015). Brownfield process : a method for the rationalisation of existing product variety towards a modular product family, Tampere University of Technology, Tampere, ix, 283 p. Saatavissa: [https://tutcris.tut.fi/portal/en/publications/brownfield-process\(7026bd47-f6ea-4e3f-9691-8e5737da8bbb\).html](https://tutcris.tut.fi/portal/en/publications/brownfield-process(7026bd47-f6ea-4e3f-9691-8e5737da8bbb).html)

Philipa, N., Okudana, G.E., Haapala, K.R. & Kim, K. (2013). A Comparison of Modularity Methods for Their Implications on Sustainability, IIE Annual Conference.Proceedings, pp. 3805-3814. Saatavissa: <https://search.proquest.com/docview/1471961789?pq-origsite=summon&https://search.proquest.com/abicomplete/advanced>

Pulkkinen, A. (2007). Product configuration in projecting company: the meeting of configurable product families and sales-delivery process, Tampere University of Technology, Tampere, pp. 69-78. Saatavissa: [https://tutcris.tut.fi/portal/en/publications/product-configuration-in-projecting-company-the-meeting-of-configurable-product-families-and-salesdelivery-process\(62a3c127-df0b-43d2-a1ba-bcf5e84cf4cf\).html](https://tutcris.tut.fi/portal/en/publications/product-configuration-in-projecting-company-the-meeting-of-configurable-product-families-and-salesdelivery-process(62a3c127-df0b-43d2-a1ba-bcf5e84cf4cf).html)

Rufe, P.D. (2013). 20.4 Design for Assembly, in: Fundamentals of Manufacturing (3rd Edition), Society of Manufacturing Engineers (SME), pp. 173-189. Saatavissa: [http://app.knovel.com/web/view/pdf/show.v/rcid:kt00BKEIB6/cid:kt00BKEIB6/viewerType:pdf/root\\_slug:fundamentals-manufacturing/url\\_slug:fundamentals-manufacturing?cid=kt00BKEIB6&cid=kt00BKEIB6&ga-event-value=undefined](http://app.knovel.com/web/view/pdf/show.v/rcid:kt00BKEIB6/cid:kt00BKEIB6/viewerType:pdf/root_slug:fundamentals-manufacturing/url_slug:fundamentals-manufacturing?cid=kt00BKEIB6&cid=kt00BKEIB6&ga-event-value=undefined)

Saaksvuori, A. & Immonen, A. (2005). Product Lifecycle Management, in: 2. Aufl.; 2; 2nd; Second ed., Springer-Verlag, Dordrecht, pp. 49-56. Saatavissa: <http://link.springer.com/book/10.1007%2Fb138258>

Stone, R.B., McAdams, D.A. & Kayyalethekkel, V.J. (2004). A product architecture-based conceptual DFA technique, Design Studies, Vol. 25(3), pp. 301-325. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142694X03000577>



T. L. de Fazio, S. J. Rhee & D. E. Whitney (1999). Design-specific approach to design for assembly (DFA) for complex mechanical assemblies, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 15(5), pp. 869-881. Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/document/795792/>

Tor, S.B., Britton, G.A., Zhang, W.Y. & Deng, Y.-. (2002). Guiding functional design of mechanical products through rule-based causal behavioural reasoning, *International Journal of Production Research*, Vol. 40(3), pp. 667-682. Saatavissa: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207540110090957>

Umeda, Y., Fukushige, S. & Tonoike, K. (2009). Evaluation of scenario-based modularization for lifecycle design, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 58(1), pp. 1-4. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850609000365?via%3Dihub>

Zhang, Y. & Gershenson, J.K. (2003). An Initial Study of Direct Relationships between Life-Cycle Modularity and Life-Cycle Cost, *Concurrent Engineering*, Vol. 11(2), pp. 121-128. Saatavissa: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1063293X03035427>