

Miika Mononen

MILLAINEN BROWNFIELD-PROSESSI NYKYÄÄN ON?

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Väinö Karhunen
Tarkastaja: Mikko Vanhatalo
huhtikuu 2026

TIIVISTELMÄ

Miika Mononen: Millainen Brownfield-prosessi nykyään on?
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
huhtikuu 2026

Tämän diplomityön tavoitteena oli tarkastella modulaarisuuden mahdollisia hyötyjä ja haasteita sekä selvittää, miten Jarkko Pakkasan väitöskirjassa vuonna 2015 esitetty Brownfield-prosessi on kehittynyt nykyiseen Brownfield 2.0 -muotoonsa. Työssä arvioitiin lisäksi, kuinka vahvasti Brownfield 2.0 perustuu aiempaan teoriaan ja missä määrin sen sisältö on muotoutunut käytännön kehitystyön tuloksena. Tutkimus toteutettiin kvalitatiivisena tutkimuksena, jossa yhdistettiin kirjallisuuskatsaus ja Nordic Element Oy:n nykyistä toimintaa kuvaavan aineiston analyysi.

Työn kirjallisuuskatsauksessa jäsennettiin modulaarisuuden keskeisiä hyötyjä ja haasteita sekä Brownfield-ajattelun teoreettista perustaa. Empiirisen tarkastelun avulla kuvattiin, millaisena Brownfield-prosessi näyttäytyy nykyisessä käytännön toiminnassa. Tarkastelun perusteella Brownfield 2.0 on alkuperäistä Brownfield-prosessia laajempi ja käytännönläheisempi kokonaisuus. Se sisältää uusia toimintatapoja, tarkennuksia ja työkaluja, joiden avulla modulaarisuutta voidaan mallintaa, hallita ja viedä käytäntöön aiempaa systemaattisemmin. Tuloksena työssä syntyi käyttökelpoinen käsikirja kohdeyrityksen Nordic Element Oy:n toiminnasta. Sitä voidaan käyttää myynti-, koulutus- ja kehitysmateriaalina.

Tulosten perusteella modulaarisuuden keskeisiä hyötyjä ovat muuntelun hallinnan parantuminen, tehokkuuden lisääntyminen, toimitus- ja suunnittelutyön selkeytyminen sekä mahdollisuus tukea liiketoiminnan skaalautuvuutta. Samalla työssä tunnistettiin myös haasteita, jotka liittyvät erityisesti rajapintojen määrittelyyn, standardoinnin ja asiakaskohtaisen muuntelun yhteensovittamiseen sekä muutoksen läpivientiin organisaatiossa. Brownfield 2.0:n todettiin perustuvan osittain vakiintuneeseen teoriaan, mutta sisältävän myös merkittävästi käytännön kehitystyössä syntyneitä laajennuksia. Työn tuloksena muodostettiin kuva Brownfield 2.0:sta sekä sen teoreettisesta ja käytännöllisestä perustasta.

Avainsanat: modulaarisuus, hybridimodulaarisuus, Brownfield-prosessi, arvontuotto, arvonpyydystys

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

ABSTRACT

Miika Mononen: What does the Brownfield process look like today?

Master's thesis

Tampere University

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

April 2026

The aim of this thesis was to examine the possible benefits and challenges of modularity and to find out how the Brownfield process, originally presented in Jarkko Pakkanen's doctoral thesis in 2015, has developed into its current Brownfield 2.0 form. The thesis also assessed how strongly Brownfield 2.0 is based on earlier theory and to what extent it has developed through practical work. The study was carried out as a qualitative study that combined a literature review with an analysis of material describing the current practices of Nordic Element Oy.

The literature review examined the main benefits and challenges of modularity as well as the theoretical foundation of Brownfield thinking. The empirical part of the study was used to describe what the Brownfield process looks like in current practice. Based on the analysis, Brownfield 2.0 is a broader and more practice-oriented approach than the original Brownfield process. It includes new practices, clarifications, and tools that help companies model, manage, and implement modularity in a more systematic way. As an outcome of the study, a practical handbook on the operations of the case company, Nordic Element Oy, was developed. It can be used as material for sales, training, and development purposes.

The results show that the main benefits of modularity are better management of product variety, improved efficiency, clearer design and delivery work, and better support for business scalability. At the same time, the study identified challenges related especially to interface definition, balancing standardization and customer-specific variation, and implementing change within the organization. Brownfield 2.0 was found to be partly based on established theory, but it also includes important additions that have developed through practical work. As a result, the thesis provides a description of Brownfield 2.0 and its theoretical and practical foundation.

Keywords: modularity, hybrid modularity, Brownfield-process, value creation, value capture

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
- Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia:

ChatGPT ja Microsoft Copilot

Tekoälysovellusten nimet ja versiot:

ChatGPT 5, Microsoft Copilot

Käyttötarkoitus: Tekoälyä on käytetty kunnollisen tekstin muodostamisessa omista muistiinpanoista. Tekoälyllä on myös etsitty muutamia lähteitä, joiden pätevyys on aina tarkastettu ennen niihin viittaamista.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty:

Kaikissa opinnäytteen kohdissa on käytetty tekoälyä kielen tarkistamiseksi ja kunnollisen tekstirakenteen muodostamiseksi.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	8
2. TUTKIMUSSTRATEGIA JA -MENETELMÄT	10
3. KIRJALLISUUSKATSAUS	15
3.1 Moduloinnin vaikutukset yrityksissä	15
3.1.1 Modulaarisuuden hyödyt	15
3.1.2 Moduloinnin haasteet	18
3.1.3 Yhteenveto moduloinnin hyödyistä ja haasteista	19
3.2 Arvontuotto ja -pyydystäminen	20
3.2.1 Arvontuotto eri sidosryhmien näkökulmasta	21
3.2.2 Arvontuoton ja -pyydystämisen yhteenveto	23
3.3 Brownfield-prosessi	24
3.3.1 Moduulijärjestelmä	25
3.3.2 Kapseleiden tunnistaminen ja löytäminen	26
3.3.3 Rajapinnat	27
3.3.4 Arkkitehtuuri	30
3.3.5 Tuotteen jakotavat	31
3.3.6 Konfigurointitieto	33
3.3.7 Yhteenveto Brownfield prosessista	34
3.4 Brownfield 2.0	34
3.4.1 PSP	35
3.4.2 Hybridimodulaarisuus	36
3.4.3 DRP	39
3.4.4 Suunnittelu- ja toimitusvirtaukset	41
3.4.5 Siirtyminen modulaariseen toimintatapaan	44
3.4.6 Muutoksenpysäytysvyöhykkeet	46
3.4.7 Yhteenveto Brownfield 2.0	47
4. AINEISTON ESITTELY JA ANALYYSI	49
5. TULOKSET	52
6. POHDINTA	56
LÄHTEET	62
7. LIITTEET	67
7.1 Liite A: Käsikirjan executive summary	67

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1. Diplomityön tutkimusstrategia.</i>	11
<i>Kuva 3. Tiedonhakuprotokolla.</i>	13
<i>Kuva 4. Haut, joilla saatiin suurin osa käytetyistä lähteistä.</i>	13
<i>Kuva 5. Tuotevariaation kehittämisen arvonluontimekanismit valmistavassa teollisuudessa (Pakkanen et al., 2018).</i>	23
<i>Kuva 6. Brownfield-prosessin elementit. Muokattu lähteestä (Pakkanen et al., 2016).</i>	25
<i>Kuva 7. Esimerkki RACI-matriisista.</i>	26
<i>Kuva 8. Rajapintatyyppit ja niihin liittyvän tiedon sisältö (IP-1–IP-13) (Parslov, 2016).</i>	28
<i>Kuva 9. Jakotavat modulaarisuudessa (Pakkanen et al., 2020b).</i>	31
<i>Kuva 10. K- & V-matriisi menetelmän rakenne (Bongulielmi et al., 2002).</i>	33
<i>Kuva 11. Esimerkkikuva DEx-työkalussa piirretystä virtauksesta.</i>	42
<i>Kuva 12. Esimerkkikuva ajoneuvon rungon muutoksenpysäytysvyöhykkeistä, Muokattu lähteestä (Holmqvist, 2004).</i>	47

TAULUKKOLUETTELO

<i>Taulukko 1. Alkuperäisen Brownfield-prosessin (Pakkanen, 2015) ja Brownfield 2.0 erot.....</i>	<i>49</i>
<i>Taulukko 2. Brownfield 2.0 uusien osa-alueiden tiedonkeruu haastatteluista.....</i>	<i>51</i>
<i>Taulukko 3. Brownfield 2.0 osa-alueet.....</i>	<i>52</i>
<i>Taulukko 4. TK1 & TK2 tuloksia.....</i>	<i>53</i>
<i>Taulukko 5. Brownfield 2.0 uudet osa-alueet.....</i>	<i>54</i>
<i>Taulukko 6. Brownfield 2.0 perustuminen teoriaan.....</i>	<i>54</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

BBE	Big Building Elements
BCE	Big Common Element
BfP	Brownfield Process
BIA	Business Impact Analysis
CAD	Computer-aided design
CSL	Company Strategic Landscape
CTO	Configure-to-Order
DEx	Design Explorer
DRP	Design Reasoning Pattern
ERP	Enterprise Resource Planning
ETO	Engineering-to-Order
FBE	Frame-Based Element
FE	Function-Based Elements
HVLV	High Value Low Volume
K/V-matriisi	Konfigurointi- ja yhteensopivuusmatriisi
MCE	Multifunctional Core Element
MCQ	Main Customer Questions
NE	Nordic Element Oy
PCC	Possible Customer Choice
PDM	Product Data Management
PLM	Product Lifecycle Management
PSP	Product Structuring Principles
RACI	Responsible, Accountable, Consulted, Informed
SBE	Small Building Elements

1. JOHDANTO

Diplomityön pohjana toimii Jarkko Pakkasen (2015) väitöskirjassa esitelty Brownfield-prosessi, jossa esitellään menetelmä ja työkalut, joilla voidaan muuttaa olemassa oleva tuote modulaariseksi eli muunneltavaksi. Tämän diplomityön päätavoitteena on tunnistaa Brownfield-prosessin nykytila ja kuvata, miten prosessi on kehittynyt alkuperäisestä julkaisustaan kohti nykytilaa. Tässä työssä nykytilasta käytetään termiä Brownfield 2.0. Työssä pyritään selvittämään, mitä prosessiin on vuosien varrella lisätty, mitä on tarkennettu ja mitkä asiat ovat aidosti muuttuneet. Keskeinen tavoite on myös dokumentoida ja tuoda näkyväksi kohdeyrityksen asiantuntijoiden kokemukseen perustuva hiljainen tieto.

Työn konkreettisenä tuotoksena syntyy käsikirjamainen materiaali, jota kohdeyritys voi hyödyntää useassa käyttötarkoituksessa. Tässä diplomityössä tuloksena esitellään tiivistelmä käsikirjasta. Materiaalia voidaan käyttää uusien työntekijöiden perehdytyksessä ja kouluttamisessa, jolloin kriittinen osaaminen ei jää vain yksittäisten henkilöiden varaan. Toiseksi käsikirja tukee myyntityötä, koska se auttaa kuvaamaan Brownfield-tyyppisen kehitysprojektin etenemisen ja hyödyt johdonmukaisesti myös asiakkaalle. Kolmanneksi materiaalia voidaan hyödyntää yrityksen oman toiminnan kehittämisessä. Lisäksi tavoitteena on, että käsikirja on rakenteeltaan sellainen, että sitä voidaan myöhemmin päivittää, kun tekeminen tai osaaminen muuttuu tai prosessiin tulee jotain täysin uutta.

Työn rajaus on tehty niin, että tutkimus pysyy hallittavana ja liittyy selkeästi kohdeyrityksen käytännön tekemiseen. Tässä työssä rajataan pois tuotteen ja tuotteistamisen rooli Brownfield-prosessissa. Toisin sanoen työn painopiste ei ole siinä, miten lopputuote tuotteistetaan tai miten modulaarisuutta hyödynnetään tuotteistamisstrategiassa, vaan siinä, miten Brownfield-prosessi näyttäytyy tänä päivänä. Lisäksi työ rajataan investointihyödykkeisiin ja pääosin myös HVLV-tyyppisiin (high value, low volume) tuotteisiin, joissa tuotekehityksen ja toimitusprojektien toiminta poikkeaa selvästi massatuotannosta.

Tutkimus jäsennetään neljän tutkimuskysymyksen avulla. Kysymykset on rakennettu siten, että ensin luodaan yleisempi pohja modulaarisuuden hyödyistä ja vasta sen jälkeen syvennytään Brownfield-prosessin kehitykseen sekä Brownfield 2.0 -vaiheiden syntyyn ja perusteluihin:

TK1: Mitkä ovat moduloinnin mahdolliset hyödyt?

Tämän kysymyksen tarkoitus on kuvata moduloinnin keskeiset hyödyt ennen kuin siirrytään Brownfield-prosessin yksityiskohtiin. Näin lukijalle syntyy selkeä lähtötaso siitä, miksi modulaarisuutta ylipäättään tavoitellaan ja millaisia vaikutusmekanismeja sillä on prosessin toimivuuteen ja kustannuksiin. Tavoitteena luoda lukijalle mielenkiintoa sekä ymmärrystä modulaarisuudesta ja moduloinnista.

TK2: Mitkä ovat moduloinnin mahdolliset haasteet?

Pitää myös olla kriittisyyttä moduloinnin suhteen, koska se ei aina ole kannattavaa. Riskien sekä haasteiden ymmärtäminen kannustaa todella panostamaan modulointiin, jos siihen ryhtyy. Tämä luo myös lukijalle edelleen laajempaa kuvaa modulaarisuudesta ensimmäisen tutkimuskysymyksen rinnalla.

TK3: Miten Brownfield-prosessin soveltaminen käytännössä eroaa siitä, miten se on kuvattu kirjallisuudessa?

Brownfield-prosessi on kehittynyt ajan myötä erityisesti tiiviissä yhteistyössä yliopiston kanssa, ja prosessia on laajennettu käytännön tarpeiden mukaan. Kehitystä ovat ohjanneet myös yrityksen omat havainnot ja kokemukset. Joitakin asioita tehdään tietoisesti eri tavalla kuin teoriassa esitetään, koska todellisessa toimintaympäristössä lähtötiedot, resurssit ja aikataulut eivät aina mahdollista ideaalimallin mukaista etenemistä. Lisäksi prosessin tueksi on kehitetty uusia työkaluja ja viitekehyksiä, joita ei ole kuvattu alkuperäisessä Brownfield-prosessin esityksessä, mutta jotka ovat osoittautuneet hyödyllisiksi käytännön työssä. Katsotaan myös, miten uudet tai päivittyneet menetelmät ja tavat perustuvat teoriaan.

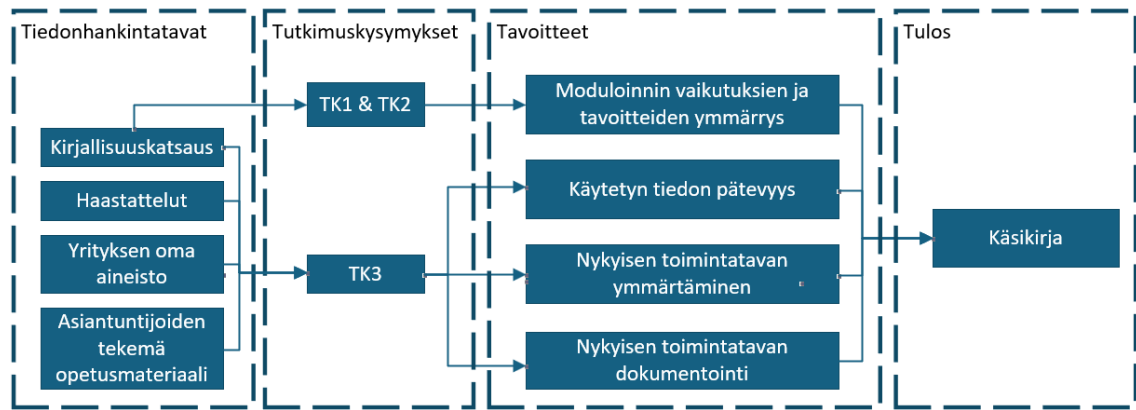
2. TUTKIMUSSTRATEGIA JA -MENETELMÄT

Tämä diplomityö toteutettiin empiirisenä ja kvalitatiivisena tutkimuksena. Empiirisyys tarkoittaa sitä, että tulokset perustuvat kirjallisuuteen, käytännön havaintoihin, kokemuksiin ja yrityksen toimintaympäristöstä kerättyyn aineistoon. Kirjallisuuskatsauksen tyyppi on osin systemaattinen kirjallisuuskatsaus ja osin myös konseptuaalinen kirjallisuuskatsaus (Petticrew & Roberts, 2006). Konseptuaalista kirjallisuuskatsausta ovat ne osat, joissa selvitetään yleisesti aihealuetta ja pyritään hahmottamaan kokonaiskuva. Systemaattista kirjallisuuskatsausta ovat ne osat, joissa tuodaan esille kirjallisuus, jolla todistetaan tutkimuskysymysten vastausten pätevyys. Kvalitatiivinen lähestymistapa tarkoittaa tätä siten, että tavoitteena ei ole tuottaa tilastollisia yleistyksiä vaan muodostaa syvälinen ja kontekstisidonnainen ymmärrys tutkittavasta ilmiöstä (Eskola & Suoranta, 1998).

Työn keskeinen tavoite on kuvata ja dokumentoida nykyistä toimintatapaa sekä tuottaa sen pohjalta selkeämpi, paremmin perusteltu ja päivitetty Brownfield-prosessi, jota kutsun tässä työssä nimellä Brownfield 2.0. Tutkimus toteutettiin kvalitatiivisena, koska sen tavoitteena oli muodostaa syvälinen ymmärrys Brownfield-prosessin nykytilasta, kehittämisestä ja käytännön soveltamisesta ilmiönä, jota ei voida tarkoituksenmukaisesti kuvata pelkästään määrällisten mittareiden avulla.

Kuva 1 esittää työn tutkimusstrategian. Työssä käytetään pääosin kolmenlaista aineistoa: asiantuntijahaastatteluja, kirjallisuuskatsausta eli teoriapohjaa sekä aiempia caseja ja yrityksen dokumenttiaineistoa. Näiden avulla saadaan vastaukset tutkimuskysymyksiin.

TK1 ja TK2 aineisto kerättiin lähes täysin kirjallisuuskatsauksesta. Iso osa TK3 aineistosta on haastatteluista peräisin, mutta myös aineistotutkimuksella ja kirjallisuuskatsauksella saatiin siihen aineistoa. Yrityksen asiantuntijoiden haastattelut toimivat työn pääaineistona, erityisesti käsikirjaosuuden sisällössä. Kirjallisuuskatsauksessa tarkoituksena on saada vastaukset TK1 ja TK2 sekä selvittää, kuinka moni Brownfield 2.0 vaiheista perustuu teoriaan ja kuinka moni ei. Näin saadaan vastaus käytetyn tiedon pätevyuteen. Työssä hyödynnetään myös case-esimerkkejä ja yrityksen sisäisiä materiaaleja sekä asiantuntijoiden tekemiä opetusmateriaaleja, joilla saadaan lisää ymmärrystä moduloinnin vaikutuksista ja nykyisestä toimintatavasta.



Kuva 1. Diplomityön tutkimusstrategia.

Jokaisessa haastattelussa oli etukäteen rajattu joukko teemoja ja niihin liittyviä kysymyksiä, mutta keskustelulle jätettiin tilaa. Näin haastatteluissa pystyttiin tarkentamaan käsitteitä ja palaamaan esiin nousseisiin yksityiskohtiin joustavasti, mikä on teemahaastattelun keskeinen vahvuus (Hirsjärvi & Hurme, 2001). Haastattelujen painopiste oli kuuntelemisessa ja tarkentavissa kysymyksissä. Muistiinpanot olivat pääosin palaverin ajankohtia, joissa jotain teemaa käsiteltiin, jotta tallenteesta pystyi palaamaan nopeasti olennaisiin kohtiin. Haastateltavina oli kolme yrityksen asiantuntijaa, joista yksi on Brownfield-prosessin alkuperäinen kehittäjä. Haastattelut tallennettiin ja litteroitiin, jotta analyysi voitiin tehdä systemaattisesti eikä vain muistin varassa, koska laadullisessa tutkimuksessa systemaattiset analyysit tukevat aineiston jäljitettävyyttä ja arvioitavuutta (Kirk & Miller, 1986).

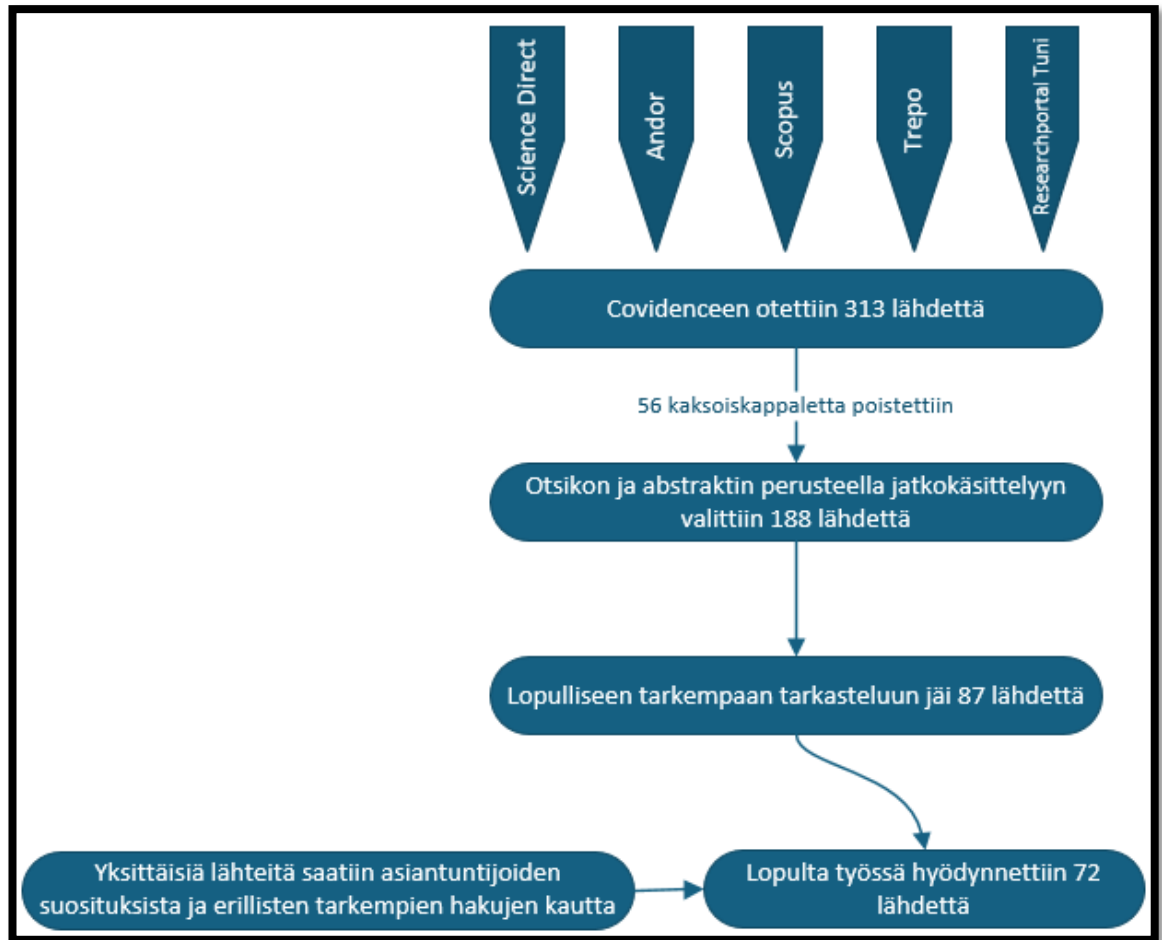
Lopuksi haastatteluaineistoa verrattiin muuhun vertaisarvioituun teoriaan sekä muuhun saatavilla olevaan aineistoon. Käsikirja muodostettiin näiden lähteiden perusteella synteessä, jossa yhdistettiin haastatteluista tunnistetut käytännön toimintatavat ja kirjallisuudesta löytyvä teoreettinen tausta yhtenäiseksi kokonaisuudeksi. Tämä synteesi toimii työn tuloksena esitettävän käsikirjan perustana ja kuvaa, miten Brownfield-prosessia ja modulaarisen tuotekehityksen käytäntöjä sovelletaan nykyään Nordic Elementin (NE) toiminnassa.

Erityisesti yrityksen työkaluihin liittyvissä haastatteluissa käytettiin samaa kysymyspohjaa, jossa haettiin eri henkilöiden näkökulmia ja hyötyjä sekä työkalun syntymistä ja käytön ohjeistusta. Haastatteluissa hyödynnettiin seuraavaa kysymyspohjaa:

1. Teema: Mihin kokonaisuuteen tai kokonaistavoitteeseen käsiteltävä työkalu liittyy?
2. Miten kyseinen työkalu on syntynyt? – menetelmän yleinen kuvaus ja tarina, miten se on kehitetty.

3. Arvontuottonäkökulma – millaista arvoa tässä tuotetaan – pystytäänkö tämän arvon tärkeyttä liiketoiminnalle pohtimaan? (liiketoimintajohtajan näkökulma)
4. Menetelmän käyttäjän näkökulma – millaisin askelin menetelmä etenee. Mitkä asiat ovat tärkeitä? Onko jokin helppoa tai jokin toinen vaikeaa? Millaista on käyttää tätä menetelmää? (lähinnä NE:n konsultin näkökulma)
5. Syntyvän tuloksen käyttäjän näkökulma – miten menetelmä tuottaa, jalostaa, dokumentoi ja/tai jäsentää tietoa. Kuinka haastavaa on tuottaa lähtöaineisto. Millaista on menetelmästä syntyvä tulos. (kehitystyöhön osallistuvien yrityksen edustajien näkökulma).
6. Mitä halutaan asiakkaan oivaltavan ja miten tämä helpottaa asiakkaan työtä?
7. Suunnittelutieteen näkökulma – mihin teorioihin tai tutkimukseen menetelmä nojautuu
8. Fasilitaattorin näkökulma. Mitä fasilitoijan pitää huomioida menetelmän esittelyssä ja käytössä? Onko joitain valmiita pohjia/työkaluja/metodeja, joita tässä käytetään?
9. Lopetus teemaan: Miksi tämä menetelmä pystyy vastaamaan teeman tavoitteisiin? (Johtopäätös: Mikä on kuvatun menetelmän arvo?).

Kuva 2 näyttää, että kirjallisuutta haettiin useista tietokannoista (Science Direct, Andor, Scopus, Trepo ja Tunin researchportal). Hauissa hyödynnettiin myös Scopus AI tekoälyä, jolla löydettiin hyvin kyseisellä aihealueella vallitsevia paljon viitattuja artikkeleita. Artikkeleiden läpikäyntiin käytettiin Covidence-työkalua. Monia artikkeleita rajattiin Covidence-työkalussa pois ensinnäkin sen takia, että ne esittelivät joko uuden menetelmän tai työkalun, jotka eivät liittyneet työhön. Rajausta tehtiin myös sen perusteella, että artikkeli oli tehty sellaisen casen perusteella, joka ei liittynyt lainkaan työn aiheeseen.



Kuva 2. Tiedonhakuprotokolla.

Lähteiden käyttöä varten muodostettiin ensin kappalejako ja sisällysluettelo, minkä jälkeen lähteet jaettiin niihin teemoihin, joihin ne parhaiten sopivat (tarvittaessa useaan kohtaan). Näin kirjallisuuskatsausta oli helppo tehdä, kun sopivat lähteet oli jo etsitty ja kohdistettu oikeaan kohtaan. Lähteitä löydettiin myös asiantuntijoiden ja ohjaajan suositusten perusteella sekä yksittäisten tarkempien hakujen perusteella. Kuvassa 3 esitetään haut, joilla löydettiin suurin osa käytetyistä lähteistä.

modular product AND (architecture OR interface OR configure)	("architecture" OR "design" OR "building" OR "construction") AND ("modularity" OR "modular" OR "component") AND ("flexibility" OR "adaptability" OR "scalability" OR "interchangeability") AND "efficiency" OR "performance" OR "optimization") AND ("space" OR "layout" OR "configuration" OR "structure")	("interface" OR "interaction" OR "connection" OR "link") AND ("modularity" OR "modular" OR "component" OR "segment") AND ("design" OR "architecture" OR "structure" OR "system") AND ("flexibility" OR "adaptability" OR "scalability" OR "interoperability")	("modular product" OR "product modularity" OR "modular product architecture") AND (architecture OR interface* OR configur* OR "product family" OR platform OR commonality OR variety) AND (design OR development OR engineering)
("customer value" OR "value creation" OR "customer satisfaction" OR "customer experience") AND ("product development" OR "product design" OR "innovation" OR "product management") AND ("consulting" OR "advisory" OR "services" OR "support") AND ("strategy" OR "process" OR "methodology" OR "framework")	("modular design" OR "modular product design" OR "modular product development" OR "modular product") AND ("variability need" OR "customer variety" OR "product variety" OR "product architecture" OR "product structure") AND ("business value" OR "product value" OR "value creation" OR "customer value")	("modular design" OR "modular product design" OR "modular product development" OR "modular product") AND ("variability need" OR "customer variety" OR "product variety" OR "product architecture" OR "product structure" OR "product configuration" OR "optimisation OR optimization") AND ("business value" OR "value captur*" OR "product value" OR "value creation" OR "customer value" OR lifecycle)	("modular product" OR "product modularity" OR "modular architecture") AND (architecture OR interfaces OR configuration OR "product family" OR platform) AND (design OR development OR engineering)

Kuva 3. Haut, joilla saatiin suurin osa käytetyistä lähteistä.

Diplomityö toteutettiin prosessikirjoittamista hyödyntäen. Käytännössä tämä tarkoitti sitä, että jokaiseen kappaleeseen kirjoitettiin ensin lyhyt kuvaus sisällöstä. Sen jälkeen kappaleen alle kerättiin ranskalaisilla viivoilla havaintoja ja sisältöä, kunnes materiaalia oli riittävästi varsinaisen tekstin kirjoittamiseen. Tekstistä tehtiin ensin raakaversio, minkä jälkeen rakennetta ja luettavuutta parannettiin. Osassa vaiheista hyödynnettiin tekoälyä rakenteen selkeyttämiseen ja kielen sujuvoittamiseen, mutta sisältö tarkastettiin ja korjattiin aina ennen lopullista versiota.

3. KIRJALLISUUSKATSAUS

3.1 Moduloinnin vaikutukset yrityksissä

Moduloinnilla tarkoitetaan teknisessä tuotekehityksessä menetelmää, jossa tuotteelle luodaan modulaarinen arkkitehtuuri, eli tuote jaetaan itsenäisiin osakokonaisuuksiin eli moduuleihin, joilla on hyvin määritellyt rajapinnat keskenään (Pakkanen et al., 2022). Tavoitteena on lisätä tuotteiden yhteisten osien määrää ilman, että asiakastarpeiden mukaisen variaation mahdollisuus vähenee (Pakkanen et al., 2022). Modulaarisuus mahdollistaa siten tuotteiden joustavan muuntelun ja uudelleenkäytön. Moduuleja voidaan vaihtaa ja yhdistellä eri tuotevariaatioihin, kunhan rajapinnat ja yhteensopivuussäännöt on vakioitu (Baldwin ja Clark, 2000; Pakkanen et al., 2022). Modulaarisuus mahdollistaa variaation hallinnan, elinkaaren aikaisen muunneltavuuden sekä työnjaon organisaatioiden ja toimitusverkkojen välillä (Gershenson et al., 2003; Ulrich, 1995; Bonvoisin et al., 2016).

Moduloinnin vaikutukset ulottuvat koko elinkaareen: tuotekonfigurointiin, valmistukseen, huoltoon, modernisointeihin ja käytöstä poistoon (Bonvoisin et al., 2016; Pakkanen et al., 2022). Modulaarinen tuotehallinta edellyttää, että kokonaisuutta hallitaan yhtenä järjestelmänä. Yksittäisten moduulien kehitystyön tulee tapahtua hallitusti, jottei modulaarisen tuoteperheen arvo kärsi (Pakkanen et al., 2022). Seuraavaksi käsitellään moduloinnin keskeisiä hyötyjä eri näkökulmista, mahdollisia haittoja ja haasteita sekä modulaarisuuden soveltuvuutta Brownfield-prosessin näkökulmasta.

3.1.1 Modulaarisuuden hyödyt

Modulaarisuus tehostaa tuotekehitystä etenkin suunnittelutyön uudelleenkäytön kautta. Suunnittelun uudelleenkäyttö modulaarisissa rakenteissa vähentää uuden suunnittelun tarvetta kutakin toimitusta kohden, mikä voi lyhentää tuotekehityksen läpimenoaikaa ja pienentää kustannuksia sekä virhemahdollisuuksia (Bonvoisin et al., 2016; Duffy & Ferns, 1998; Pakkanen et al., 2022). Kertaalleen suunniteltuja ratkaisuja voidaan hyödyntää useissa tuotteissa, mikä parantaa myös laatuvaatimusten täyttymistä, kun hyväksi havaitut suunnitteluratkaisut toistuvat tuotteesta toiseen (Lau et al., 2007). Lisäksi modulaarisuus helpottaa uuden tekniikan käyttöönottoa. Kun tuotteen suunnitteluparametrit on eristetty omiin moduuleihinsa, voidaan uutta teknologiaa tai komponenttia tuoda tuotteeseen vaihtamalla vain kyseinen moduuli ilman, että koko järjestelmää tarvitsee suunnitella uudelleen (Pakkanen et al., 2022).

Moduuleihin jaettu tuoterakenne auttaa suunnittelijoita myös hahmottamaan paremmin suunnittelupäätösten vaikutuksia kokonaisuuteen, mikä vähentää osaoptimointia ja päällekkäistä työtä (Pakkanen et al., 2022). Tuloksena tuotekehityksessä syntyy läpinäkyvämpi ja hallittavampi tuoteportfolio, jossa esimerkiksi tuoteperheen optimointi perustuu faktoihin ja yhteisiin ratkaisuihin yksittäisten improvisoitujen erikoisratkaisujen sijaan (Juuti, 2008; Pakkanen et al., 2022).

Modulaarisuus tukee myös myyntiä ja tarjous-toimitusprosessia, erityisesti Engineering to Order (ETO) -ympäristössä. Modulaarinen tuote mahdollistaa konfiguroinnin, jolloin myyntivaiheessa voidaan hyödyntää tuotteen modulaarista rakennetta asiakkaan tarpeisiin sopivan kokoonpanon luomiseksi valitsemalla vaihtoehtoisia moduuleja. Tähän liittyen modulaarisuus mahdollistaa tuotekonfiguraattoreiden käytön, mikä on ETO-yrityksissä yhä tärkeämpi keino hallita tarjontaa (Haug et al., 2019; Pakkanen et al., 2022). Konfiguraattoreiden avulla tarjous- ja suunnitteluprosessit nopeutuvat ja virheiden määrä vähenee, koska tuoterakenteet ja sallitut yhdistelmät ovat ennalta määritetty (Haug et al., 2019). Tämä lyhentää läpimenoaikaa ja parantaa tarjousdokumenttien sekä tuotespesifikaatioiden laatua, kun yrityksen osaaminen saadaan tallennettua sääntöpohjaisiin konfiguraattoreihin (Haug et al., 2019; Pakkanen et al., 2022).

Asiakkaalle modulaarinen tuote näkyy parempana palveluna. Tuotteita voidaan räätälöidä joustavasti moduulivalinnoilla, jolloin asiakkaan tarpeet ja paikalliset vaatimukset pystytään täyttämään joutuisammin (Lau et al., 2007; Pakkanen et al., 2022). Samalla myynnin henkilöt saavat käyttöönsä aiempaa täydellisempää tietoa tuoteratkaisuista jo tarjousvaiheessa, mikä helpottaa tarjousten laatimista ja antaa enemmän aikaa esimerkiksi myyntiargumenttien kehittämiseen (Pakkanen et al., 2022). Modulaarisuus voi näin ollen parantaa yrityksen reagointikykyä markkinoiden muutoksiin ja vahvistaa kilpailukykyä (Lau et al., 2007).

Tuotannon näkökulmasta modulaarisuuden hyödyt ovat merkittäviä. Yhteisten moduulien käyttö useissa tuotteissa lisää volyymeja osatasolla, mikä puolestaan mahdollistaa mittakaavaedut hankinnoissa ja valmistuksessa (Baldwin & Clark, 2000; Pakkanen et al., 2022). Komponenttien ja materiaalien hankinnassa suuremmat yhtenäisten osien erät laskevat yksikkökustannuksia, ja hyvin määritellyt moduulirajapinnat voivat laajentaa toimittajaverkostoa. Esimerkiksi alihankkijat voivat valmistaa moduuleja rinnakkain, mikä hajauttaa tuotantoa tehokkaasti (Lau et al., 2007; Pakkanen et al., 2022). Modulaarisuus myös mahdollistaa esivalmistuksen. Yhä suurempi osa tuotteesta voidaan rakentaa valmiiksi tehtaalla kontrolloiduissa olosuhteissa. Tämän ansiosta lopullinen kokoonpano asiakkaan luona (esim. asennus työmaalla) nopeutuu ja virhemahdollisuudet vähenevät, kun ennalta testattuja

moduuliratkaisuja kootaan yhteen (Pakkanen et al., 2022). Kokoonpanovaiheen kustannuksia voidaan pienentää siirtämällä työtä modulaarisuuden avulla pois kalliista kenttäasennuksesta kohti tehdasvalmisteisia kokonaisuuksia (O'Connor et al., 2014; Pakkanen et al., 2022). Lisäksi modulaarinen suunnittelu tukee tuotantoprosessin läpinäkyvyyttä ja ennustettavuutta. Kun tuotteet koostuvat vakioiduista moduuleista, valmistusvaiheiden kesto ja resurssitarve voidaan arvioida tarkemmin etukäteen (Pakkanen et al., 2022). Myös laadunvalvonta tehostuu, koska vakioidut moduulit on mahdollista testata erikseen ennen lopullista kokoonpanoa (Pakkanen et al., 2022).

Logistiikassa modulaarisuus tuottaa hyötyjä virtaviivaistamalla toimitusketjua. Kun tuotevalikoima koostuu modulaarisista osista, erilaisten varianttien lukumäärä pysyy kurissa ja tarvittavien komponenttien kirjo suppeampana. Tämä vähentää varastoinnin hallinnan kustannuksia ja yksinkertaistaa materiaalien hallintaa (Erixon, 1998; Pakkanen et al., 2022). Modulaarisessa rakenteessa komponenttien ja alikokoonpanojen pakkaus sekä kuljetus voidaan suunnitella tehokkaammin. Esimerkiksi moduulien vakioidut koot ja muodot mahdollistavat paremman tilankäytön kuljetuksissa ja helpottavat kuljetusaikataulujen optimointia (Pakkanen et al., 2022). Lisäksi modulaarisuus mahdollistaa tuotteiden myöhäisen muuntelun (late point differentiation) lähellä asiakasta. Tuote pidetään mahdollisimman pitkään geneerisenä moduulien tasolla ja asiakaskohtainen variaatio toteutetaan lisäämällä tai vaihtamalla vain tietyt moduulit loppuvaiheessa (Lee & Tang, 1997). Tällä tavoin varastoitavien keskeneräisten tuotteiden määrä pienenee ja logistiikan joustavuus paranee, kun suuri osa arvosta lisätään vasta toimitusketjun loppupäässä (Lee & Tang, 1997). Tärkeää on myös panostaa toimittajaverkoston integroimista tuotantoon, sillä se vahvistaa modulaarisuuden vaikutusta sekä kehitysaikaan että tuotteen suorituskykyyn (Danese & Filippini, 2013). Kaiken kaikkiaan modulaarinen tuoterakenne yksinkertaistaa logistiikkaa ja vähentää toimitusten läpimenoaikoihin liittyviä epävarmuuksia (Pakkanen et al., 2022).

Modulaarisuuden hyödyt jatkuvat myös tuotteen käyttö- ja ylläpitovaiheessa. Modulaarinen tuote on tyypillisesti helpompi huoltaa, koska vialliset osat voidaan korvata moduulitasolla sen sijaan, että korjattaisiin monimutkaisia osakokonaisuuksia komponentti kerrallaan. Vakioidut rajapinnat mahdollistavat vanhojen moduulien päivittämisen uusiin (esim. teknologiapäivitykset) tai vaurioituneiden moduulien nopean vaihtamisen, mikä vähentää huoltojen vaatimaa seisokkiaikaa (Pakkanen et al., 2022). Lisäksi huolloissa voidaan välttää turhia komponenttinvaihtoja. Kun moduulien eliniät on huomioitu suunnittelussa, ei tarvitse vaihtaa toimivia osia ennenaikaisesti, vaan ainoastaan ne moduulit, jotka ovat elinkaarensa päässä (Umeda et al., 2000; Pakkanen et al., 2022). Modulaarisuus tukee myös kiertotaloutta ja kestävästä kehitystä. Käytöstä

poistetut moduulit voidaan kunnostaa ja käyttää uudelleen toisissa tuotteissa tai kierrättää materiaalina tehokkaammin, kun moduulit ovat selkeästi eroteltavissa (Umeda et al., 2000; Pakkanen et al., 2022). Tämä nostaa tuotteen jäännösarvoa elinkaaren lopussa ja vähentää ympäristökuormitusta pidemmällä tähtäimellä (Umeda et al., 2000).

3.1.2 Moduloinnin haasteet

Vaikka modulaarinen tuotekehitys tarjoaa monia etuja, siihen liittyy myös haasteita ja mahdollisia haittavaikutuksia, jotka on huomioitava. Kirjallisuudessa on tuotu esiin, että modulaarisen tuotejärjestelmän kehittäminen on usein vaativampaa ja alkuvaiheessa kalliimpaa kuin yksittäisen, täysin integroidun tuotteen suunnittelu (Baldwin ja Clark, 2000; Pakkanen et al., 2022). Moduuleiden määrittely ja rajapintojen suunnittelu lisäävät alkuinvestointia tuotekehityksessä, ja modulaarisuus saattaa joissain tapauksissa johtaa kompromisseihin tuotteen optimoinnissa. Esimerkiksi modulaarinen rakenne voi olla fyysisesti raskaampi tai kalliimpi valmistaa yksittäistä käyttötilannetta varten kuin täysin räätälöity, integroidusti suunniteltu tuote (Fixson, 2006; Gershenson et al., 2003; Lorenzi & Di Lello, 2001). Kuitenkin nämä ylimääräiset kustannukset pyritään perustelemaan saavutettavilla pitkän aikavälin hyödyillä, ja niiden takaisinmaksu toteutuu yleensä tuoteperheen elinkaaren aikana skaalaetujen ja tehokkuuden muodossa (Pakkanen et al., 2022).

Organisatoriset ja kulttuuriset haasteet ovat myös yleisiä modulaarisuutta käyttöön otettaessa. Perinteisessä ETO-projektitoimitusympäristössä saattaa esiintyä muutosvastarintaa, kun siirrytään modulaariseen tuotealustaan. Projektipohjainen suunnittelukulttuuri voi olla ristiriidassa modulaarisen tuotehallinnan kanssa (Pakkanen et al., 2019). Pakkanen et al. (2019) raportoivat tapaustutkimuksissa, että eriytyneet projektitiimit ja yksilölliset asiakasratkaisut voivat törmätä modulaarisuuden vaatimaan vakiointiin, mikä vaatii johdolta aktiivista muutoksenhallintaa. Lisäksi modulaarisuus edellyttää usein uusia työkaluja ja tietojärjestelmiä. Modulaarisen tuoteperheen hallinta tuo mukanaan tarvetta hallita konfiguraatiosääntöjä, moduulien versioita ja rajapintadokumentaatiota, mikä asettaa vaatimuksia yrityksen PDM/PLM-järjestelmille (Pakkanen et al., 2022). Tuotekonfiguraattorien käyttöönotto on sekin merkittävä investointi, ja vaikka ne tuovat hyötyjä, tutkimuksissa on havaittu myös huomattavia kustannuksia ja haasteita tällaisissa projekteissa (Haug et al., 2019). Yrityksen onkin punnittava modulaarisuuden tuomia pitkän aikavälin hyötyjä suhteessa siihen siirtymävaiheen vaivaan, joka modulaarisen järjestelmän rakentamisesta koituu. Danese & Filippini (2013) kertovat toimittajaverkoston koordinoinnin tärkeydestä. Vaikutukset kehitysaikaan ja suorituskykyyn ovat osin ehdollisia toimittajaverkoston toimivuudelle.

Ilman tätä modulointi voi jäädä pelkäksi rakennesuunnitteluksi, joka ei tuota läpimenoetuja. (Danese & Filippini, 2013)

On myös huomioitava, ettei ole olemassa yhtä ainoaa oikeaa tapaa toteuttaa modulaarisuutta, vaan moduloinnin menetelmävalinta ja modulaarisuusaste vaikuttavat lopputulokseen (Holtta & Salonen, 2003). Esimerkiksi liian hienojakoinen modulaarisuus voi johtaa tarpeettoman monimutkaiseen rakenteeseen ja vaikeuttaa hallintaa, kun taas liian karkeat moduulirajat eivät tuo toivottuja joustoetuja. Suunnittelutiimin osaaminen ja yrityksen aikaisemmat käytännöt vaikuttavat modulaarisuuden onnistumiseen, joten haasteena on löytää juuri kyseiselle yritykselle ja tuotteelle sopiva modulaarisuusstrategia (Pakkanen et al., 2019). Yhteenvedon voidaan todeta, että modulaariseen tuotekehitykseen siirtyminen on strateginen investointi, joka vaatii huolellista suunnittelua, mutta oikeilla toimenpiteillä haasteet ovat ratkaistavissa ja moduloinnin hyödyt todennettavissa.

3.1.3 Yhteenvedo moduloinnin hyödyistä ja haasteista

Moduloinnin edut teknisessä tuotekehityksessä ovat laajat. Modulaarisuus vauhdittaa tuotekehitystä, tehostaa valmistusta ja toimitusprosessia, tukee myyntiä ja asiakaskohtaista konfigurointia sekä helpottaa tuotteiden ylläpitoa ja parantaa kestävä kehityksen mukaista elinkaaren hallintaa. Yksi isoimmista eduista on tuotevariaation ja suunnittelun uudelleenkäytön yhdistäminen. Nämä hyödyt ovat saavutettavissa, mikäli modulaarinen arkkitehtuuri suunnitellaan ja toteutetaan huolellisesti. Samalla on tärkeää tiedostaa modulaarisuuden käyttöönottoon liittyvät haasteet, joita ovat muuan muassa alkuvaiheen investoinnit, organisaation muutosvastarinta ja uudenlaisen suunnittelutiedon hallinnan tarpeet. Tiedostamalla nämä haasteet voidaan varautua ja vastata tarkoituksenmukaisin toimenpitein.

Brownfield-prosessi tarjoaa yhden systemaattisen lähestymistavan modulaariseen tuotekehitykseen erityisesti yrityksille, joilla on olemassa oleva tuotekanta. Brownfield-prosessissa korostuu moduloinnin liiketoimintahyötyjen tunnistaminen ja modulaarisuuden asteittainen soveltaminen siten, että yritys voi siirtyä kohti modulaarista tuotealustaa menettämättä kykyään palvella asiakaskohtaisia tarpeita. Brownfield-prosessin näkökulmasta moduulien jakotapa varmistaa, että variaatio kohdistuu liiketoiminnan kannalta oikeisiin kohtiin (Pakkanen, 2015; Pakkanen et al., 2016). Kokonaisuutena modulaarinen tuotekehitys on oikein sovellettuna voimakas keino parantaa kilpailukykyä ja operatiivista tehokkuutta teknologia-alan yrityksissä (Lau et al., 2007; Pakkanen et al., 2022).

3.2 Arvontuotto ja -pyydystäminen

Arvontuotto ja arvon pyydystäminen on hyvä erottaa toisistaan. Yritys voi tuottaa asiakkaalle selvästi paremman ratkaisun, mutta silti epäonnistua pyydystämään osuuttaan arvosta esimerkiksi hinnoittelun, neuvotteluvoiman tai käyttöönnoton ongelmien vuoksi. Modulaarisuudessa tämä ero korostuu, koska hyödyt realisoituvat usein viiveellä. Kehitysvaiheen investoinnit tehdään etupainotteisesti, mutta hyödyt näkyvät myöhemmissä toimituksissa ja elinkaaripalveluissa. (Bowman & Ambrosini, 2000; Hackl et al., 2020)

Strategisessa kirjallisuudessa arvontuottoa ja arvon pyydystämistä on jäsennetty erottamalla käyttöarvo ja vaihtoarvo. Käyttöarvo on asiakkaan subjektiivisesti arvioima hyöty ratkaisun käytössä, kun taas vaihtoarvo realisoituu myyntihetkellä hintana ja sitä kautta tulona. Arvon pyydystäminen liittyy siihen, miten suuri osa asiakkaalle syntyneestä käyttöarvosta muuntuu yrityksen tulokseksi vaihtoarvon ja kustannusrakenteen kautta. (Bowman & Ambrosini, 2000) Modulaarisuuden näkökulmasta tämä tarkoittaa sitä, että modulaarinen arkkitehtuuri voi kasvattaa asiakkaan käyttöarvoa esimerkiksi joustavuuden ja huollettavuuden kautta. Arvon pyydystäminen edellyttää kuitenkin, että yritys kykenee kytkemään nämä hyödyt kaupallisiin mekanismeihin, kuten hinnoitteluun, palvelusopimuksiin tai kustannusetuihin. Muutoin luotu arvo voi valua kilpailijoille tai arvoketjun muille toimijoille. (Grönroos, 2011; Bowman & Ambrosini, 2000)

Modulaarisuuden tavoitteena on lisätä yhteiskäyttöä ja hallita tuotevariaatiota ilman, että asiakkaan tarpeisiin vastaaminen heikkenee. Pakkanen et al. (2018) korostavat, että modulaarisuutta voi tarkastella joukkona arvonluontimekanismeja, jotka voivat sekä lisätä että vähentää kannattavuutta. Tämä on tärkeä havainto, koska modulaarisuus ei ole automaattinen hyöty, vaan valinta, joka sisältää kompromisseja. (Pakkanen et al., 2018; Hackl et al., 2020) Taloudellisten tavoitteiden näkökulmasta modulaarisuuspäätökset vaikuttavat samanaikaisesti useisiin mittareihin, kuten tuotekehityskustannuksiin, valmistuksen tehokkuuteen, toimituskykyyn ja riskitasoon. Hackl et al. (2020) esittävät, että modulaarisuutta tulisi arvioida nimenomaan yrityksen taloudellisten tavoitteiden kautta, koska yksittäiset vaikutusketjut voivat olla ristiriitaisia. Esimerkiksi suurempi vakiointi voi pienentää valmistuskustannuksia, mutta kasvattaa kehitysvaiheen panostusta ja rajoittaa tuotteen optimointia yksittäisiin käyttötapauksiin (Hackl et al., 2020).

Kustannusvaikutuksista on myös empiiristä näyttöä, jonka mukaan modulaarisuuden ja kustannusten suhde ei ole yksinkertainen. Guo & Gershenson (2007) korostavat

tutkimuksessaan, että keskeinen kysymys on, säästääkö modulaarisuuden lisääminen kustannuksia, ja että suhde voi riippua sekä mittaustavasta että modulaarisuuden muutoksen suuruudesta. Tämä kannustaa perustelemaan modulaarisuutta elinkaaren ja implementoinnin kautta eikä pelkästään yleisinä oletuksina. (Guo & Gershenson, 2007)

3.2.1 Arvontuotto eri sidosryhmien näkökulmasta

Asiakkaan näkökulmasta modulaarisuus tuottaa arvoa, kun ratkaisu voidaan sovittaa käyttökontekstiin ja kun muutokset voidaan toteuttaa elinkaaren aikana hallitusti. Modulaarinen rakenne voi tukea päivitettävyyttä, huollettavuutta ja muunneltavuutta, jolloin asiakkaan kokema käyttöarvo kasvaa esimerkiksi pienempinä seisokkeina tai parempana käytettävyytenä. (Pakkanen et al., 2022; Grönroos, 2011) Asiakas voi myös osallistua arvontuottoon yhteiskehittämisen ja vuorovaikutuksen kautta. Kristensson et al. (2011) painottavat asiakas-yritys-vuorovaikutusta tuotekehityksessä ja korostavat, että kommunikaatio voi auttaa yritystä ymmärtämään asiakkaan käyttötilanteita ja siten parantaa lopputulosta. Tämä linkittyy palvelulogiikkaan, jossa arvo konkretisoituu vasta käytössä, joten käyttötilanteen ymmärtäminen on keskeinen edellytys arvontuotolle. (Kristensson et al., 2011; Grönroos, 2011)

Tuotekehityksessä modulaarisuus tuottaa arvoa erityisesti suunnittelun uudelleenkäytön ja integraatoriskin hallinnan kautta. Pakkanen et al. (2018) nostavat esiin, että tuotevariaation kehittämisessä merkittävä arvontuottimekanismi on suunnittelun uudelleenkäyttö, joka vähentää toistotyötä ja helpottaa varianttien hallintaa. Samalla rajapintojen selkeyttäminen voi vähentää järjestelmäintegraation epävarmuutta (Pakkanen et al., 2018). Suunnittelijan näkökulmasta arvontuotun pyydystämisen kannalta kriittistä on, että modulaarinen rakenne muuttuu käytännön työkaluksi. Hyödyt realisoituvat, kun modulaariset ratkaisut ovat dokumentoituja, konfiguroitavia ja organisaation laajasti hyväksymiä. Muutoin modulaarisuus voi jäädä yksittäiseksi arkkitehtuurikuvaksi, mikä ei helpota suunnittelukuormaa seuraavissa projekteissa. (Hackl et al., 2020; Pakkanen et al., 2018)

Valmistuksen ja toimitusketjun näkökulmasta modulaarisuus voi tuottaa arvoa, kun toistuvuus kasvaa ja varianttikohtainen työ vähenee. Tuotevariaation hallinnassa keskeinen idea on late point differentiation, eli asiakaskohtaiset valinnat tehdään mahdollisimman myöhään prosessissa, mikä parantaa ennustettavuutta ja voi pienentää varasto- ja läpimenoaikariskejä. (Pakkanen et al., 2018) Elinkaaripalveluissa modulaarisuus voi lisätä arvoa, jos moduulirakenne tukee huoltoa, varaosia ja päivityksiä. Tällöin asiakkaan käyttöarvo kasvaa ja yritykselle avautuu mahdollisuus kerätä arvoa palvelutuloina tai parempana asiakaspitoisuutena. Palvelulogiikan

näkökulmasta juuri käyttöprosessin tukeminen on keskeinen kanava, jossa yritys voi siirtyä pelkästä arvon fasilitoinnista aktiivisempaan yhteisluontiin. (Grönroos, 2011; Pakkanen et al., 2022)

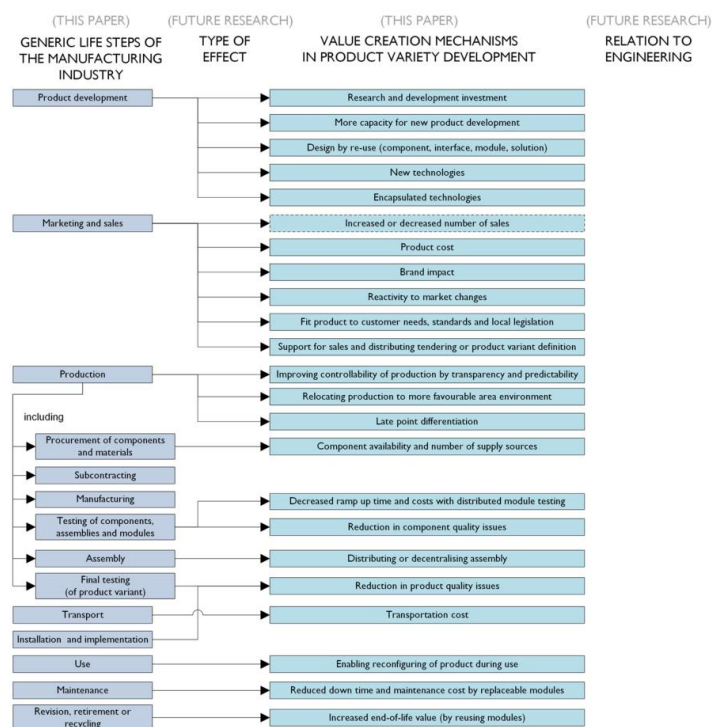
Modulaarisuus voi muuttaa myös arvoketjun rooleja. Kun moduulit ja rajapinnat ovat selkeitä, toimittajille voidaan antaa laajempia vastuita moduulien suunnittelusta tai valmistuksesta. Samalla arvon kerääminen riippuu neuvotteluvoimasta, koska jos tärkeimmät rajapinnat ovat avoimia ja vakioituja, vaihtokustannus voi pienentyä ja osa arvosta siirtyä ostajalle. Jos taas yritys hallitsee arkkitehtuuria ja yhteensopivuussääntöjä, se voi kerätä arvoa paremmin. (Bowman & Ambrosini, 2000; Hackl et al., 2020)

Kirjallisuudessa modulaarisuuden taloudelliset vaikutukset kytkeytyvät erityisesti kustannusvaikutuksiin, myynnin ja tulojen kehitykseen sekä riskiprofiilin muutoksiin (Hackl et al., 2020; Pakkanen et al., 2018; Pakkanen et al., 2022). Kustannusetu syntyy esimerkiksi suunnittelun uudelleenkäytöstä ja tuotannon toistuvuudesta, mutta se edellyttää, että modulaarisuuden taso ja toteutus ovat riittäviä ja että organisaation prosessit tukevat yhteiskäyttöä. Tämä on tärkeää, koska modulaarisuus ei välttämättä yksinään alenna kustannuksia ilman toimivaa mittarointia ja implementointia. (Guo & Gershenson, 2007; Pakkanen et al., 2018) Tulon parantuminen voi perustua esimerkiksi parempaan asiakassovitukseen ja laajempaan tarjontaan. Tuotevariaation kehittämisen arvonluontimekanismit liittyvät usein myynnin ja toimituksen kykyyn tarjota sopivia ratkaisuja hallitulla kustannuksella. Asiakasvuorovaikutus tuotekehityksessä voi tukea tätä, koska se parantaa ymmärrystä käyttötilanteista ja voi johtaa markkinassa menestyvämpiin tuotteisiin. (Pakkanen et al., 2018; Kristensson et al., 2011)

Strategisen näkökulman mukaan arvon pyydystäminen on vaihtoarvon realisoitumista, ja se määräytyy osin ostajan ja myyjän koetun neuvotteluvoiman kautta. Modulaarisuudessa neuvotteluvoima kytkeytyy muun muassa rajapintojen hallintaan, yhteensopivuuteen ja vaihtokustannuksiin. Tämän vuoksi arvon pyydystämisen logiikka on yhtä lailla arkkitehtuurinen kuin kaupallinen kysymys. (Bowman & Ambrosini, 2000; Hackl et al., 2020) Arvon keräämisessä on usein myös ajallinen viive. Kehitysvaiheen työ tuottaa potentiaalista arvoa, mutta taloudelliset hyödyt realisoituvat vasta, kun modulaarisuus on viety läpi toimitusketjun, myynnin, tuoterakenteiden ja normaalien työskentelykäytäntöjen tasolle. Modulaarisuuden taloudellisten tavoitteiden arviointi edellyttää vaikutusten tarkastelua päätösten jälkeisessä vaiheessa, ei vain suunnittelupäätöksen hetkellä. (Hackl et al., 2020)

3.2.2 Arvontuoton ja -pyydystämisen yhteenveto

Pakkanen et al. (2018) kokoavat tuotevariaation kehittämiseen liittyvät arvontuottimekanismit kuvaan 4. Tämä kehys auttaa tunnistamaan, missä kohdissa elinkaarta arvo syntyy ja mihin liiketoiminnallisiin tavoitteisiin mekanismit kytkeytyvät. Tämä on hyödyllistä modulaarisuuden tarkastelussa, koska sama arkkitehtuuriratkaisu voi tuottaa arvoa eri toimijoille eri vaiheissa ja arvontuottimekanismit voivat poiketa arvontuottimekanismit kohdista. (Pakkanen et al., 2018)



Kuva 4. Tuotevariaation kehittämisen arvontuottimekanismit valmistavassa teollisuudessa (Pakkanen et al., 2018).

Kuvan keskeinen tulkinta arvontuoton ja arvontuottimekanismit näkökulmasta on se, että esimerkiksi suunnittelun uudelleenkäyttö ja modulaarinen arkkitehtuuri tuottavat arvoa tuotekehityksessä, mutta yritys kerää arvontuottimekanismit vasta, jos nämä ratkaisut muuttuvat toistuviksi toimituksiksi ja jos kustannus- tai aikahyödyt realisoituvat tuotannossa ja projektien läpivienneissä. Käytännössä tämä edellyttää, että myös myynti- ja toimitusprosessi kykenevät hyödyntämään modulaarista tuotetta eikä sitä käsitellä joka kerta yksittäisenä prototyyppinä tai projektina. (Pakkanen et al., 2018; Hackl et al., 2020) Kuva tukee myös palvelulogiikan näkemystä arvontuottimekanismit syntymisestä käytössä. Mekanismit, jotka liittyvät huollettavuuteen, päivitettävyyteen ja elinkaaren hallintaan, kohdistuvat

asiakkaan käyttöprosessiin. Tällöin arvon pyydystäminen yritykselle voi tapahtua esimerkiksi palvelusopimusten, varaosalogistiikan tai päivitysmoduulien kautta, eli kanavissa, joissa yritys pystyy osallistumaan asiakkaan käyttöprosessiin ja vaikuttamaan siihen. (Grönroos, 2011; Pakkanen et al., 2022)

Modulaarisuus tuottaa arvoa useille sidosryhmille. Asiakkaalle arvo näkyy muun muassa käyttöarvona, kuten joustavuutena ja elinkaaren hallittavuutena. Tuotekehitykselle arvo syntyy esimerkiksi uudelleenkäytöstä ja integraatoriskin hallinnasta. Valmistukselle ja toimitusketjulle arvoa syntyy esimerkiksi toistuvuudesta ja myöhäisestä differoinnista. Näiden vaikutusten tunnistaminen on edellytys, jotta modulaarisuudesta voidaan rakentaa perusteltu tuotekehitysinvestointi. (Pakkanen et al., 2018; Pakkanen et al., 2022)

Arvon pyydystäminen edellyttää kuitenkin erillisiä päätöksiä ja kyvykkyyksiä. Se riippuu hinnoittelusta, neuvotteluvoimasta ja ennen kaikkea käyttöönotosta. Modulaarisuuden taloudelliset hyödyt realisoituvat vasta, kun modulaarisuus on osa organisaation arkea. (Hackl et al., 2020) Tästä syystä modulaarisuutta tulisi arvioida paitsi teknisenä myös organisatorisena muutoksena, jossa arvon luonti ja arvon kerääminen ovat sidoksissa toisiinsa (Bowman & Ambrosini, 2000; Grönroos, 2011).

3.3 Brownfield-prosessi

Brownfield-prosessi (BfP) on Pakkasen (2015) väitöskirjassa esitelty menetelmä, jonka tavoitteena on rationalisoida olemassa oleva tuotevalikoima modulaariseksi tuoteperheeksi siten, että tuotekonfigurointi ja suunnittelun uudelleenkäyttö mahdollistuvat. Toisin kuin Greenfield-lähestymistavassa, jossa tuotealusta suunnitellaan tyhjästä, Brownfield hyödyntää yrityksen nykyistä tuotekantaa, dokumentoitua ja hiljaista suunnittelutietoa sekä toteutuneita asiakasratkaisuja (Pakkanen et al., 2016). Prosessin perusajatus on kasvattaa yhteisten, vakioitujen ratkaisujen osuutta ilman, että kyky tuottaa asiakaskohtaisia variaatioita menetetään. Ideaalisti konfiguroitava tuoteperhe kattaa asiakasvaatimusten kirjon vähäisellä määrällä hyvin määriteltäviä moduuleja ja rajapintoja (Pakkanen et al., 2016; Pakkanen et al., 2022).

Brownfield-prosessi poikkeaa monista aikaisemmista modulaarisen tuoteperheen menetelmistä siinä, että se käsittelee yhtenä kokonaisuutena sekä liiketoiminnallisen jakologiikan että tekniset ratkaisut, mukaan lukien konfigurointitiedon, joka yhdistää asiakastarpeet moduulivalintoihin (Pakkanen et al., 2016). Kirjallisuuden perusteella onnistunut modulaarinen tuoteperhe edellyttää kuvassa 5 näkyvien viiden keskeisen

suunnittelukäsitteen huomioimista: jakotapa, moduulijoukko, rajapinnat, arkkitehtuuri ja konfigurointitieto (Pakkanen et al., 2016) Seuraavissa osioissa tarkastellaan Brownfield-prosessia näiden osa-alueiden mukaan jäsennehtynä sekä suhteessa tuoreeseen modulaarisuus- ja konfigurointikirjallisuuteen.



Kuva 5. Brownfield-prosessin elementit. Muokattu lähteestä (Pakkanen et al., 2016).

3.3.1 Moduulijärjestelmä

Moduulijärjestelmä tarkoittaa koko tuoteperheen moduulien, rajapintojen, arkkitehtuurin, jakologiikan ja sääntöjen hallittua kokonaisuutta. Brownfield-prosessissa moduulijärjestelmä rakennetaan vaiheittain. Geneeriset elementit konkretisoidaan moduuleiksi ja moduulivariaatioiksi, rajapinnat vakioidaan ja konfigurointitieto viimeistellään, minkä jälkeen kokonaisuus dokumentoidaan ja sen liiketoimintavaikutukset arvioidaan (Pakkanen et al., 2016). Järjestelmän kurinalainen hallinta on edellytys sille, että modulaarisuuden hyödyt säilyvät ja kasvavat tuoteperheen elinkaaren aikana.

Tutkimukset osoittavat, että moduulijärjestelmä parantaa reagoitakykyä markkinamuutoksiin, skaalautuvuutta sekä valmistuksen ja huollon tehokkuutta, kun yhteisiä ratkaisuja voidaan hyödyntää laajasti ja muutokset rajataan paikallisesti moduulitasolle (Ulrich, 1995; Alizon et al., 2009; Pakkanen et al., 2022). Toisaalta järjestelmän ylläpito edellyttää hallittua muutoksenhallintaa. Yksittäisen moduulin muutokset tulee arvioida koko järjestelmän näkökulmasta erityisesti rajapintavaikutusten osalta. (Parslov & Mortensen, 2015; Pakkanen et al., 2016)

Käyttööntöövaiheessa suositeltavaa on laatia selkeä dokumentaatio, joka kuvaa geneeristen elementtien, moduulien, rajapintojen ja konfigurointisääntöjen väliset suhteet (Pakkanen et al., 2016). Samalla on hyvä määritellä moduulivastuullisten roolit

ja periaatteet, jotta moduulijärjestelmä pysyy hallittuna eikä hajoa ad hoc -päätöksistä (Haug et al., 2019; Pakkanen et al., 2022). Roolit ja vastuut voidaan määrittellä kuvassa 6 näkyvän RACI-matriisin (Responsible, Accountable, Consulted, Informed) avulla. Tällä tavalla jokaiselle on selvää, mikä rooli hänellä on moduloinnissa tai muussa toiminnassa. (Lee et al., 2021)

MODULE DEVELOPMENT RACI-matrix	PM	Technical specialist	Module System Manager	Module Engineer
Manage Module System Documentation		I	R	
Manage Module System Interfaces		I	R	
Modify Generic Module, major modification	I	C	R	C
Modify Generic Module, minor modification	I	C	R	C
Modify Generic Module, fix defect			A	R
Add or remove Generic Module			R	C

Kuva 6. Esimerkki RACI-matriisista.

Kuvassa 6 esitetään muutama esimerkkirooli ja muutama esimerkkivastuualue, joihin tarvitaan eri rooleja. Todellisuudessa sekä vastuutehtäviä että vastuullisia rooleja on myös enemmän. Kuvasta kuitenkin saa hyvän käsityksen siitä, mitä RACI-matriisilla haetaan.

3.3.2 Kapseleiden tunnistaminen ja löytäminen

Kapseleiden tunnistaminen ja löytäminen tarkoittaa keinoja, joilla tunnistetaan tuotteen vaatimukset kattavat, itsenäiset ja uudelleenkäytettävät kokonaisuudet. Nordic Elementin toiminnassa käytetään termiä kapseli, koska se kuvaa hyvin sitä, miten muuntelu kapseloidaan oikeilla moduuleilla. Brownfield-prosessissa kapselien tunnistaminen alkaa nykyisten tuotteiden geneeristen elementtien muodostamisella. Olemassa olevista ratkaisuista abstrahoidaan rakennuspalikoita, jotka kapseloivat tietyn muuntelun sisälleen (Pakkanen et al., 2016). Geneeriset elementit eivät ole vielä lopullisia moduuleja vaan ehdokkaita, joiden laajuus ja rajat tarkentuvat myöhemmissä vaiheissa moduulien ryhmittelyn ja rajapintojen määrittelyn myötä (Pakkanen et al., 2016).

Moduulien tunnistamisessa hyödynnetään usein toimintoperustaista analyysiä ja heuristiikkoja. Teoriassa on esitetty menetelmiä, joissa tuotteen toiminnot, flowt ja vuorovaikutukset ryhmitellään moduuleiksi, jotta korkeat sisäiset kytkökset ja matalat ulkoiset kytkökset minimoisivat rajapintojen monimutkaisuutta (Stone et al., 2000; Dahmus et al., 2001). Nämä menetelmät ovat osoittautuneet käyttökelpoisiksi myös Brownfield-kontekstissa, kun niitä täydennetään liiketoimintalähtöisellä jakotavalla ja konfigurointitiedolla (Pakkanen et al., 2016).

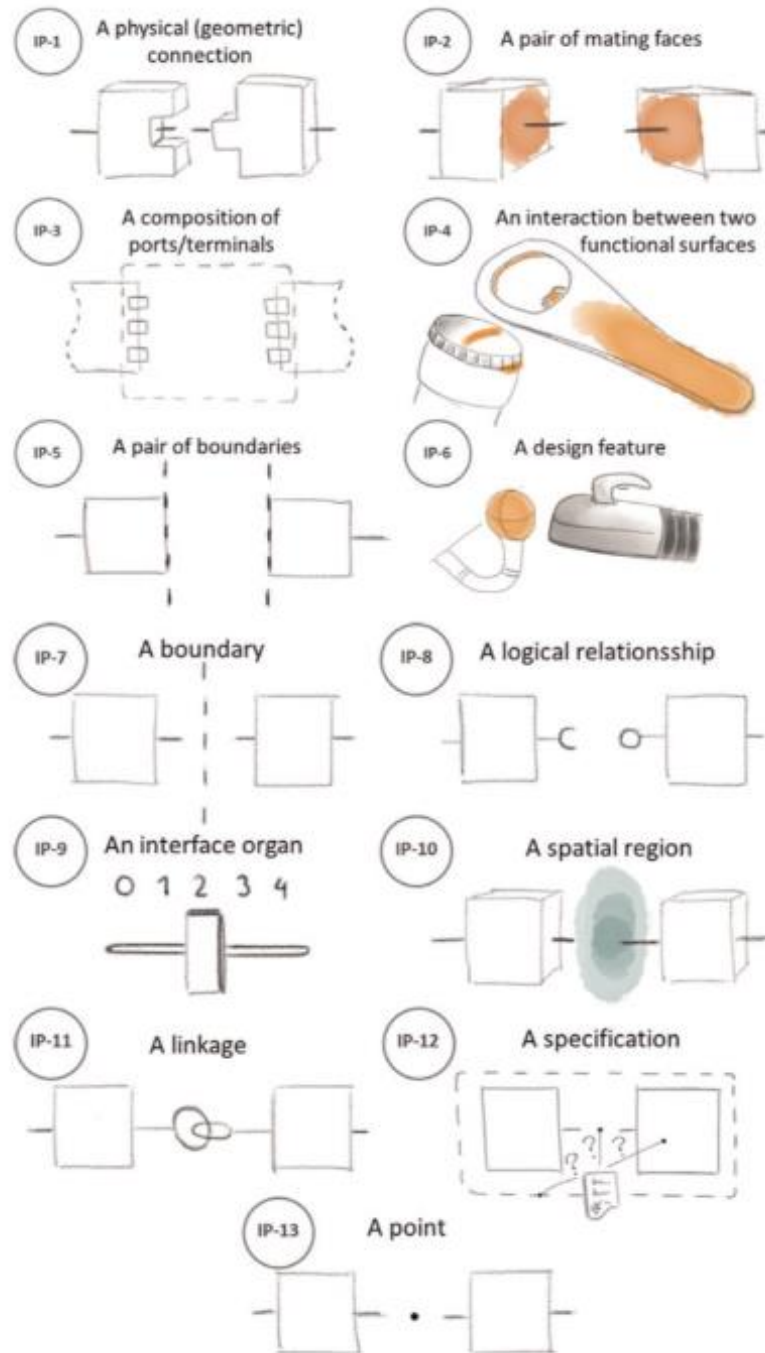
Moduulien löytymisen kriteerejä voidaan johtaa suoraan asiakatarpeista ja käyttöympäristön vaatimuksista. Esimerkiksi kapasiteetti-, suorituskyky- ja asennusympäristöerot ovat tyypillisiä muunteluajureita, jotka kannattaa erottaa omiksi moduuleikseen (Ulrich, 1995; Jiao et al., 2007). Samalla on pyrittävä minimisoimaan tarpeettomat variaation lähteet, eli tuoteperheen laajuus tulee saavuttaa mahdollisimman pienellä moduulien määrällä, jolloin suunnittelun, hankinnan ja tuotannon skaalaedut kasvavat (Alizon et al., 2009; Lau et al., 2007). Brownfield-prosessissa tätä tuetaan moduulijärjestelmän avulla (Pakkanen et al., 2016).

Käytännön työssä potentiaalisten moduulien tunnistus tehdään tyypillisesti työpajoissa, joissa yhdistetään markkina-, suunnittelu- ja tuotantoasiantuntemus. Tämä mahdollistaa sekä teknisten riippuvuuksien että liiketoiminnallisen arvon (kustannus, läpimenoaika, laatu) huomioimisen samanaikaisesti (Pakkanen et al., 2016; Pakkanen et al., 2022). Lisäksi analyyttisiä välineitä, kuten riippuvuusmatriiseja ja komponenttien vuorovaikutusverkkoja (Sosa et al., 2007), voidaan hyödyntää paljastamaan luonnolliset moduulirajat ja kriittiset kytkökset.

3.3.3 Rajapinnat

Rajapinnat varmistavat, että moduulit kytkeytyvät toisiinsa hallitusti ja että moduulivaihtoehtoja voidaan yhdistellä ilman yhteensopivuusongelmia. Brownfield-prosessissa rajapinnoista tehdään vakioituja määrittelemällä liitospinnat, mitoitusperiaatteet, toiminnalliset riippuvuudet ja sallitut variaatiot moduulien välillä (Pakkanen et al., 2016; Pakkanen et al., 2022). Vakioidut rajapinnat ovat edellytys sekä konfiguroitavuudelle että moduulien itsenäiselle kehittämiselle.

Parslov & Mortensen (2015) osoittavat, että kirjallisuudessa rajapinnan käsite kattaa vähintään kolme tasoa: fyysiset (rakenteelliset), toiminnalliset ja järjestelmätason rajapinnat. Tämä jaottelu on hyödyllinen, sillä se ohjaa dokumentoimaan sekä kiinnitykset ja liitännät (fyysinen taso) että energia-, materiaali- tai informaatiovirrat (toiminnallinen taso) sekä moduulien roolit osana korkeamman tason järjestelmiä (Parslov & Mortensen, 2015). Selkeä rajapintadokumentaatio myös tukee myöhempiä muutoksia ja päivityksiä minimoiden ei-toivotut sivuvaikutukset. Kuvassa 7 näkyy Parslov (2016) väitöskirjassa esitellyt rajapintatyyppit IP1-IP13.



Kuva 7. Rajapintatyypit ja niihin liittyvän tiedon sisältö (IP-1–IP-13) (Parslov, 2016).

Alla esitellään lyhyesti kaikki kuvassa näkyvät rajapintatyypit:

IP-1 Fyysinen (ja usein geometrinen) liityntä, jossa yhteensopivuus syntyy muodon ja mittojen kautta. Esimerkkejä ovat kolikon syöttö automaattiin tai hammaspyörän kiinnitys akseliin.

IP-2 Rajapinta kahden erillisen pinnan välillä siten, että elementti voidaan vaihtaa jättämällä järjestelmään jäävä pinta ennalleen. Järjestelmässä oleva pinta ei kuitenkaan vaihdu ilman, että myös siihen liittyvät elementit muuttuvat.

Esimerkkinä langaton viestintä, jossa radiotaajuus toimii yhteisenä pintana: jos taajuus vaihtuu, myös päätelaitteiden on mukauduttava.

IP-3 Porttien ja terminaalien muodostama liityntä, jonka kautta kulkee energiaa, materiaa tai informaatiota. Käytännön esimerkkejä ovat Ethernet- ja HDMI-liitännät, joissa signaalit siirtyvät sovitun standardin mukaisesti.

IP-4 Toiminnallisten pintojen välinen rajapinta, jossa pinnat on suunniteltu tuottamaan haluttu vuorovaikutus. Tällainen vuorovaikutus voi olla esimerkiksi tuenta, ohjaus tai voimansiirto kahden elementin välillä.

IP-5 Kahden vastakkaisen elementtirajan kohtaamis- ja liitoskohta, jossa rajat yhdistyvät toisiinsa ja muodostavat liitynnän.

IP-6 Rajapinta, jossa yhden elementin muoto, ominaisuus tai suunnittelupiirre ohjaa toisen elementin muotoa tai ominaisuutta. Tyypillinen tilanne on, että elementin liikerata tai reitti määräytyy, kun se ohjataan toisen elementin sisään, jolloin vaikutus ulottuu varsinaista kosketusaluetta laajemmalle. Tämä liittyy usein design feature -ratkaisuihin, kuten mekaaniseen tukeen, vääntövoiman siirtoon, sähköiseen liitännään tai virtausyhteyteen.

IP-7 Yhteinen raja-alue tai taso, jonka elementit jakavat ja jossa ne liittyvät toisiinsa niin, että toivotut vuorovaikutukset ovat mahdollisia. Tätä voidaan tulkita myös suunniteltuna raja-alueena, joka helpottaa muuntelun, välysten ja toleranssien hallintaa.

IP-8 Loogista riippuvuutta kuvaava rajapinta, jossa elementtien ominaisuudet kytkeytyvät toisiinsa syy–seuraussuhteella. Esimerkiksi renkaan kosketuspinta-ala riippuu renkaan leveydestä. Tuoterakenteessa tämä liittyy myös siihen, täyttääkö moduuli sille järjestelmäkuvauksessa asetetun tehtävän ja roolin.

IP-9 Rajapinta, jonka yli tapahtuu teknologia-alueiden välinen muunnos tai käännös. Esimerkkeinä näppäimistö tai mikrofoni, joissa fyysinen toiminta muutetaan digitaaliseksi tiedoksi tai toisinpäin, sekä vastaavasti äänenvoimakkuuden säätö.

IP-10 Elementtien välinen alue -rajapinta, johon liittyy energia- tai materiavirtoja ja jonka kautta myös tilankäyttö määrittyy. Tätä voi tarkastella tilavarauksena tai muutoksenpysäytysvyöhykkeenä eli alueena, joka varmistaa moduulin mahtumisen sekä estää muutosten leviämistä.

IP-11 Linkkirajapinta, jota kuvataan esimerkiksi geometrian, toleranssien, lämmönsiirron tai kaistanleveyden kaltaisilla määrittelyillä. Usein tähän liittyy

myös tietojärjestelmäyhteensopivuus: pystyykö moduuli liittymään tiedonsiirtoratkaisuun ja kommunikoidaan sen kanssa.

IP-12 Yhteensopivuuden ja vuorovaikutusten kuvaus rajapintana, usein taulukkona, standardina tai ohjeistuksena. Tällainen määrittely kertoo, millä ehdoilla moduulit toimivat yhdessä ja täyttääkö moduuli kokonaisuuden suorituskyky- ja toimivuusvaatimukset.

IP-13 Rajapinta, jossa vuorovaikutus sidotaan tunnettuun, yhteiseen viitepisteeseen. Tällaisia voivat olla esimerkiksi koordinaattipisteet tai muut referenssipisteet, joiden avulla sijainti määritetään yksiselitteisesti 3D-mallissa ja lopulta fyysisessä tuotteessa.

Rajapintojen suunnittelussa on tärkeää tasapainoilla joustavuuden ja kurinalaisuuden välillä. Liian tiukat rajapinnat voivat estää tulevien teknologioiden käyttöönottoa, mutta liian väljät määrittelyt johtavat helposti yhteensopivuusongelmiin ja kasvaneeseen testauksen tarpeeseen (Ulrich, 1995; Sosa et al., 2007). Brownfield-kontekstissa suositeltava käytäntö on sitoa rajapinnat tuotearkkitehtuurin pysyviin kohtiin ja sallia variaatio rajapintojen sisällä kontrolloiduissa kohdissa, mikä tukee sekä vaihtomahdollisuuksia että takaa ennakoitavan integraation (Pakkanen et al., 2016).

3.3.4 Arkkitehtuuri

Tuotearkkitehtuuri kuvaa, miten moduulit ja niiden rajapinnat järjestyvät yhdeksi kokonaisuudeksi tuotteessa (Ulrich, 1995). Brownfield-prosessissa arkkitehtuuri määritellään kaksivaiheisesti. Ensin hahmotetaan geneeristen elementtien layout ja keskinäiset kytketytymiset, minkä jälkeen määritellään konkreettiset moduulit ja niiden väliset vakioidut rajapinnat (Pakkanen et al., 2016). Tämä erottaa konseptuaalisen arkkitehtuurin ("mikä liittyy mihin") toteutuksen tasosta ("mitä moduuleja ja rajapintoja käytetään").

Arkkitehtuuri toimii tuoteperheen runkona, joka mahdollistaa erilaisten varianttien kokoamisen samoista rakennuspalikoista. Modulaarinen arkkitehtuuri vähentää riippuvuuksia moduulien välillä, jolloin muutokset yhdessä moduulissa eivät heijastu hallitsemattomasti muihin (Ulrich, 1995; Jiao et al., 2007). Samalla arkkitehtuurin on tuettava valmistettavuutta, huollettavuutta ja logistiikkaa. Esimerkiksi moduulien sijoittelu ja kuljetus/asennusrajat kannattaa huomioida varhaisessa suunnittelussa (Pakkanen et al., 2022; Lau et al., 2007).

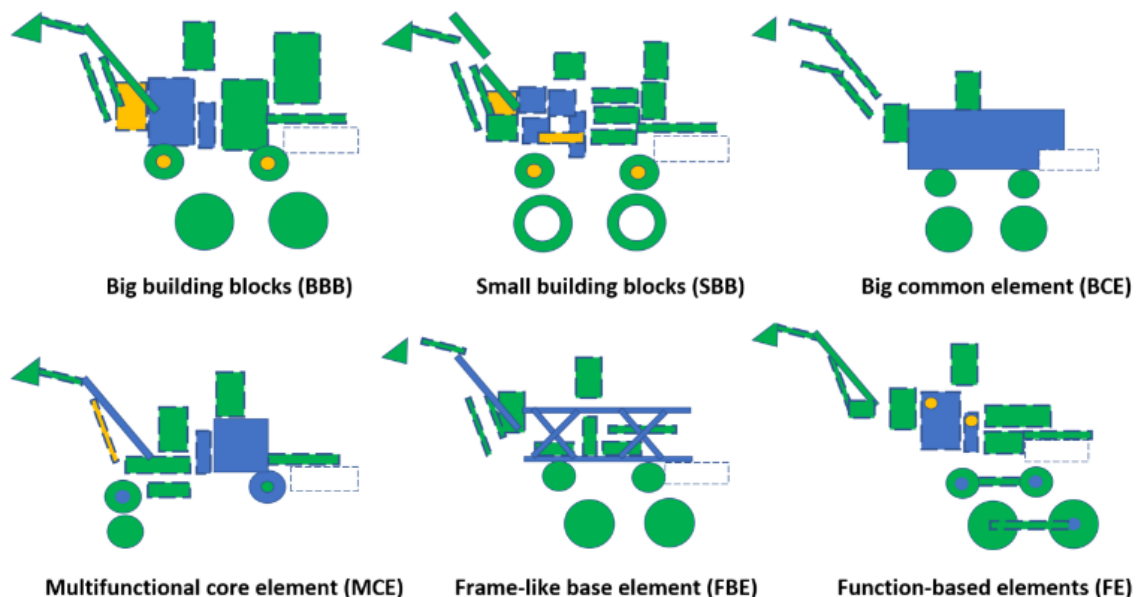
Kirjallisuudessa on esitetty useita arkkitehtuurin arviointitapoja, kuten riippuvuusmatriiseja ja komponenttiverkkoja (Sosa et al., 2007), joiden avulla voidaan

mitata modulaarisuuden astetta ja paljastaa integraatiokohtia. Brownfield-prosessissa arkkitehtuurin päätökset tehdään suunnittelun, tuotannon ja hankinnan näkemykset yhdistäen. Tämän jälkeen päätökset dokumentoidaan, jotta ratkaisuperiaatteet säilyvät organisaatiossa (Pakkanen et al., 2016).

Arkkitehtuurin olennainen osa on tilavaraukset. Tilavarauksella tarkoitetaan etukäteen määriteltyä aluetta tai tilaa, johon moduulit tai komponentit on tarkoitus sijoittaa. Förg et al. (2014) kuvaavat tätä rekoissa. Kokonaistila jaetaan selkeisiin alueisiin ja niille määritetään vakioitu layout, joka kattaa suuren osan tyypillisistä varianteista. Tällöin muutokset aiheuttavat harvemmin ketjureaktioita muualle rakenteeseen ja modulaarisuuden hyödyt toteutuvat helpommin. (Förg et al., 2014)

3.3.5 Tuotteen jakotavat

Modulointi on keskeinen lähestymistapa tuotteen rakenteen hallintaan erityisesti tilanteissa, joissa asiakaskohtainen räätälöinti ja tuotannon tehokkuus ovat samanaikaisia tavoitteita. Moduloinnissa on kysymys siitä, miten tuote tulisi jakaa moduuleihin, eli millaista jakotapaa tulisi soveltaa. Pakkanen et al. (2020b) tarkastelevat tätä kysymystä empiirisesti sekä teoreettisesti ja esittävät kuvassa 8 kuusi erilaista jakotapaa, jotka voivat toimia suunnittelun tukena modulaarisen tuotearkkitehtuurin kehittämisessä.



Kuva 8. Jakotavat modulaarisuudessa (Pakkanen et al., 2020b).

Tutkimuksessa tunnistetut jakotyypit ovat seuraavat:

1. **Big Building Elements (BBE)** – Tuote jaetaan muutamaan suureen moduuliin. Tämä vähentää liitäntöjen määrää ja yksinkertaistaa kokoonpanoa, mutta voi rajoittaa muunneltavuutta ja uudelleenkäytettävyyttä.
2. **Small Building Elements (SBE)** – Tuote jaetaan useisiin pieniin moduuleihin, mikä lisää joustavuutta ja mahdollistaa laajemman tuotevariaation. Haittapuolena on liitäntöjen ja hallinnan monimutkaistuminen.
3. **Big Common Element (BCE)** – Yksi suuri, yhteinen perusrakenne, johon muut moduulit kiinnittyvät. Tämä tukee myöhäistä konfigurointia toimitusketjussa ja voi vähentää varastointikustannuksia.
4. **Multifunctional Core Element (MCE)** – Ydinmoduuli, joka sisältää useita tuotteen perustoimintoja. Tämä lähestymistapa muistuttaa tuotealustaa (product platform) ja mahdollistaa tehokkaan uudelleenkäytön.
5. **Frame-like Base Element (FBE)** – Runkomainen perusrakenne, johon muut moduulit kiinnitetään. Tämä rakenne ei ole vaihdettavissa, mutta tarjoaa rakenteellista vakautta ja tukee modulaarista laajennettavuutta.
6. **Function-based Elements (FE)** – Tuote jaetaan moduuleihin toimintojen perusteella. Tämä on teoreettisesti vahva lähestymistapa, mutta käytännössä haastava erityisesti monimutkaisissa tuotteissa, joissa toiminnot ovat hajautuneita.

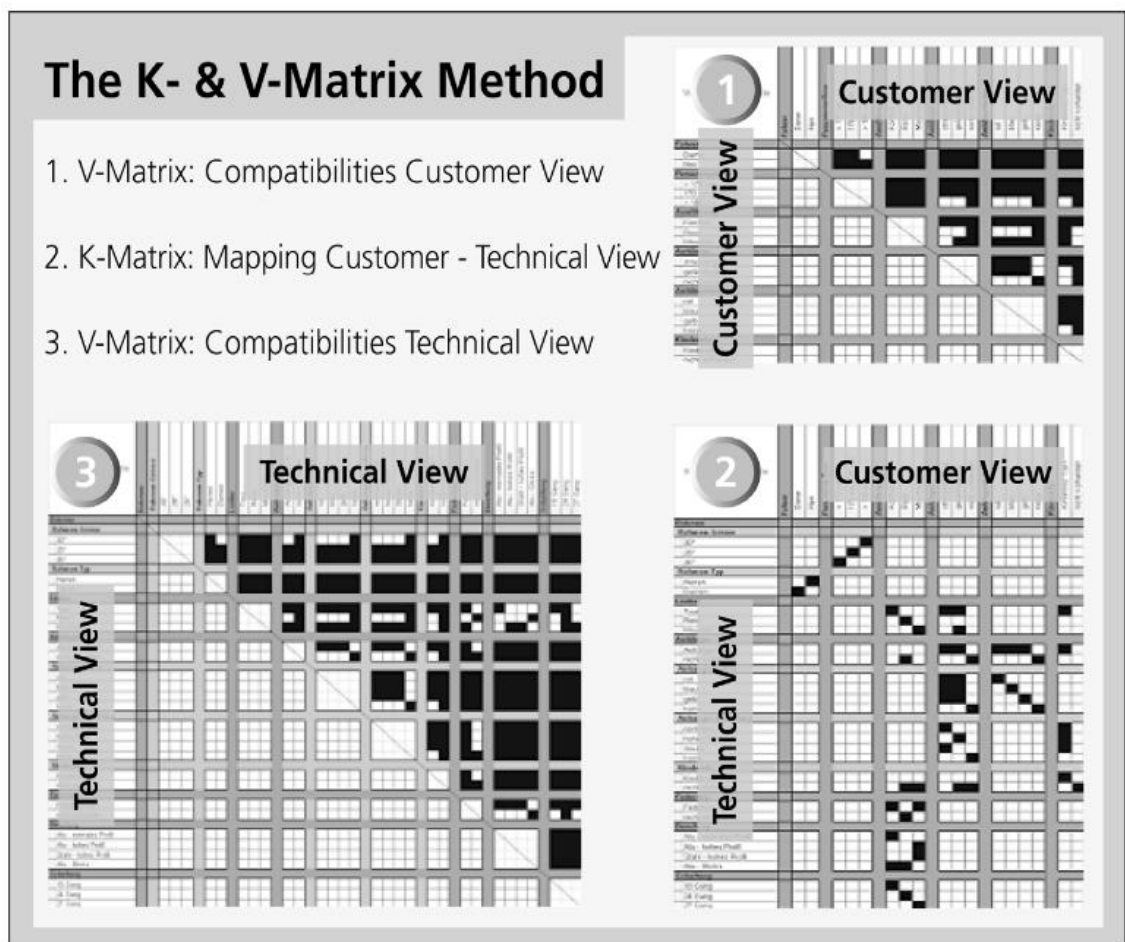
Pakkanen et al. (2020b) osoittavat, että näiden jakotyyppien eksplisiittinen kuvaaminen voi tukea suunnittelijoita erityisesti silloin, kun modulaarinen ajattelu ei ole vielä vakiintunutta. Heidän opetuskokeensa LEGO-pyöräkuormaajien parissa osoitti, että esimerkiksi MCE-tyyppi tarjosi hyvän tasapainon muunneltavuuden ja rakenteellisen selkeyden välillä. Sen sijaan BBE ja BCE osoittautuivat haastaviksi erityisesti asiakasvaatimusten täyttämisen näkökulmasta. SBE ja FE jäivät opiskelijoilta käyttämättä osin dokumentointivaatimusten ja rakenteellisten kompleksisuuksien vuoksi. (Pakkanen et al., 2020b)

Tutkimus tuo esiin, että eri jakotyypeillä on omat vahvuutensa ja heikkoutensa, ja niiden soveltuvuus riippuu tuotteen luonteesta, liiketoimintaympäristöstä ja suunnittelun tavoitteista. Kirjallisuuskatsauksen näkökulmasta tämä tarjoaa hyödyllisen viitekehyksen, jonka avulla voidaan tarkastella ja vertailla erilaisia modulointistrategioita sekä niiden vaikutuksia tuoteperheiden hallintaan ja konfiguroitavuuteen.

3.3.6 Konfigurointitieto

Konfigurointitieto kuvaa säännöt ja riippuvuudet, joilla asiakkaan tarpeet käännetään sallituiksi moduuliyhdistelmiksi ja täsmällisiksi tuotekokoonpanoiksi. Brownfield-prosessissa konfigurointitieto kytkee asiakastarpeet ennalta määriteltyihin moduuleihin ja tuotteen jäsentämisperiaatteisiin. Tuotekonfigurointi tarkoittaa sopivien moduulien valintaa asiakkaille, joilla on tietyt muunteluvaatimukset ja sitä, että konfigurointitieto ehdottaa tiettyä moduulijoukkoa, kun tietyt asiakastarpeet ovat olemassa. (Pakkanen et al., 2016)

Kirjallisuudessa konfigurointitieto kytketään usein tuotekonfiguraattoreihin ja sääntöpohjaisiin malleihin, joiden avulla rajataan pois yhteensopimattomat yhdistelmät ja kiihdytetään tarjous- ja suunnitteluprosesseja (Forza & Salvador, 2002; Haug et al., 2019). Tehokas konfigurointimalli sisältää valintaparametrit, pakolliset ja poissulkevat riippuvuudet sekä mahdolliset arvojoukot, joista konfigurointi tehdään. Brownfield-prosessissa käytetään usein matriisiesityksiä, jotka tuovat näkyviin asiakasvaatimusten ja moduulien suhteet ja auttavat säännöstön yhteistarkastelussa (Pakkanen et al., 2016). Kuvassa 9 esitetään Bonguiliemi et al (2002) K- & V-matriisin rakenne.



Kuva 9. K- & V-matriisi menetelmän rakenne (Bonguiliemi et al., 2002).

Bongulielmi et al (2002) esittävät metodissaan kolme erilaista matriisia. Yksi V-matriiseista esittää, miten asiakasvaatimukset sopivat keskenään yhteen. Toinen V-matriiseista kuvaa, miten moduulivariantit tai tekniset ratkaisut ovat keskenään yhteensopivia. K-matriisi kuvaa, miten moduulivariantit tai tekniset ratkaisut ovat yhteensopivia muuntelutarpeiden kanssa. (Bongulielmi et al., 2002)

ETO-ympäristöissä konfigurointitiedon arvo on erityisen suuri, koska osa ratkaisusta voi jäädä tilauskohtaisesti suunniteltavaksi. Tällöin konfigurointimalli rajaa geneeriset, valmiiksi määritellyt osat ja osoittaa kohdat, joissa suunnittelua tarvitaan. Samalla se turvaa yhteensopivuuden ja rajapintojen säilymisen (Haug et al., 2019; Pakkanen et al., 2016). Hyvin määritelty konfigurointitieto lyhentää läpimenoaikoja, vähentää virheitä ja tallentaa organisaation osaamista eksplisiittiseen muotoon (Forza & Salvador, 2002; Haug et al., 2019).

3.3.7 Yhteenveto Brownfield-prosessista

Brownfield-prosessi tarjoaa systemaattisen tavan siirtyä olemassa olevasta, usein hajanaisesta tuotevalikoimasta kohti modulaarista ja konfiguroitavaa tuoteperhettä. Moduulijärjestelmän osuus on merkittävä osa Brownfield-prosessia, sillä useat moduloinnin hyödyistä toteutuvat vasta kun koko moduulijärjestelmä on suunniteltu (Pakkanen, 2015). Olennaista on myös jakaa roolit ja vastuut esimerkiksi RACI-matriisilla. Tällä tavoin moduulijärjestelmällä ja sen osilla on omistajat, jotka hallinnoivat ja vastaavat omasta osastaan. (Lee et al., 2021)

Keskeistä on käsitellä rinnakkain moduulien löytymistä, rajapintoja, arkkitehtuuria, tuotteen jakotapoja, konfigurointitietoa ja moduulijärjestelmää. Toisin sanoen on tutkittava sekä jakotapaa että teknistä arkkitehtuuria ja dokumentoida päätösten perustelut siten, että ne säilyvät organisaatiossa (Pakkanen et al., 2016). Kirjallisuuden perusteella tällainen lähestymistapa tuo merkittäviä hyötyjä suunnittelun uudelleenkäytössä, läpimenoajoissa, kustannuksissa ja laatuvarmuudessa samalla, kun asiakaskohtainen joustavuus säilyy hallitusti (Ulrich, 1995; Jiao et al., 2007; Haug et al., 2019; Pakkanen et al., 2022).

3.4 Brownfield 2.0

Brownfield 2.0:lla tarkoitetaan tässä työssä Brownfield-prosessin nykytilaa ja käytännössä vakiintunutta soveltamistapaa. Lähtökohtana on Pakkanen väitöskirjassa esitelty Brownfield Process (Pakkanen, 2015). Prosessin periaatteita ja menetelmäkuvausta on täsmennetty myöhemmässä vertaisarvioidussa kirjallisuudessa, jossa Brownfield-prosessia kuvataan systemaattisena tapana hallita keskeisiä

suunnittelukonsepteja, kuten jakotapaa, moduulijoukkoa, rajapintoja, arkkitehtuuria ja konfigurointitietoa (Pakkanen et al., 2016). Tämän vuoksi Brownfield 2.0 ei ole uusi menetelmä irrallaan alkuperäisestä vaan prosessin kehittynyt ja laajentunut nykytilakuvaus

Kehitys on tapahtunut kahdesta suunnasta. Ensinnäkin tutkimus on tuottanut lisää ymmärrystä moduloinnista ja muusta tuotekehityksestä. Toiseksi teolliset havainnot ovat ohjanneet prosessin laajentamista kohti tilanteita, joissa tuotteet ovat vain osittain konfiguroitavia, ja tarvitaan täsmällisempiä toimintamalleja järjestelmän hallintaan (Pakkanen et al., 2021a). Tässä osiossa kuvataan näiden Brownfield-prosessin julkaisun jälkeen käyttöön otettujen täydennysten ja lisäysten teoriatausta Nordic Elementin toimintaympäristössä.

3.4.1 PSP

PSP (Product Structuring Principles) tuo Brownfieldiin mukaan perustelut ja prinssiipiinit, joiden mukaan tuotteen rakenne toimii. PSP:t voidaan määritellä periaatteiksi, jotka kuvaavat, miksi tuote on jaettu tietyllä tavalla ja millä logiikalla moduulirajat ja rajapinnat on valittu. Lehtonen (2024) kuvaa PSP:t nimenomaan syiksi, miksi moduulijako on suunnitelman mukainen, ja samalla korostetaan periaatteiden linkittämistä niihin geneerisiin elementteihin tai moduuleihin, joihin ne eniten vaikuttavat. (Lehtonen, 2024) Juuti et al. (2019) tarkastelevat empiirisesti modulaaristen ratkaisujen vaikutuksia ja osoittavat, että modulaarisuus ei automaattisesti johda parempaan suorituskykyyn. Valitut PSP:t ja niiden toteutustapa vaikuttavat ratkaisevasti siihen, syntyykö liiketoimintahyötyjä vai uusia ongelmia. Tämä havainto on erityisen relevantti Brownfield-ympäristössä, jossa olemassa oleva rakenne, toimitusketju ja valmistusratkaisut rajoittavat mahdollisia muutoksia (Pakkanen et al., 2016). PSP:t toimivat tällöin eräänlaisina arviointikriteereinä. Niiden avulla voidaan tarkastaa, onko valittu moduulijako linjassa esimerkiksi konfiguroitavuuden, toimitettavuuden tai ylläpidettävyyden tavoitteiden kanssa (Juuti et al., 2019).

Pakkanen et al. (2021a) tuovat PSP:t esiin moduloinnin keskeisenä osana erityisesti jakologiikan näkökulmasta. Moduloinnissa ei riitä, että tuote jaetaan moduuleihin, vaan jaon täytyy perustua liiketoimintaympäristön reunaehtoihin ja strategiaan tavoitteisiin. Lehtonen (2024) on tehnyt 12 PSP:n tarkistuslistan, joka konkretisoi tätä ajattelua. Listassa esiintyy esimerkiksi rakenteen jakaminen toimituskonseptin mukaan, pääkomponenttien vaihdettavuus, vakioidut sijainnit ja liitännät, tilavaraukset varianttikomponenteille sekä muutoksenpysäytysvyöhyke-periaate varianttien rajaamiseksi (Lehtonen, 2024). Nämä ovat juuri sellaisia arkkitehtuuritason ratkaisuja,

jotka Brownfield-prosessissa täytyy joka tapauksessa tehdä, mutta PSP-muodossa ne tulevat systemaattisiksi ja perusteltaviksi.

Brownfield ohjaa tekemään jakotapaan ja variaation hallintaan liittyvät päätökset, mutta se ei aina pakota nimeämään ja dokumentoimaan niitä yleisiksi periaatteiksi. Tällöin osa suunnittelulogiikasta voi jäädä hiljaiseksi tiedoksi, mikä heikentää toistettavuutta ja johdonmukaisuutta pitkällä aikavälillä (Pakkanen et al., 2016). Brownfield ei tarjoa valmista PSP-katalogia tai tarkistuslistaa. Tämän vuoksi PSP voidaan nähdä hyödyllisenä täydennyksenä Brownfieldiin. Se tuo mukaan systemaattisen tavan tarkastella ja dokumentoida arkkitehtuuripäätösten perustelut.

PSP:n teoriapohja on osittain vahva ja osittain käytäntölähtöinen. Juuti et al. (2019) nojaavat kirjallisuuteen ja tapausnäyttöön, mutta yksittäiset periaatteet ovat luonteeltaan heuristisia. Ne ovat suunnittelun ohjesääntöjä, eivät yleispäteviä sääntöjä. Myös kurssimateriaalin 12 PSP näyttää pitkälti tulevan teollisista käytännöistä. Tästä huolimatta PSP:t ovat hyödyllisiä, jos ne sidotaan selkeästi yrityksen tavoitteisiin ja arviointikriteereihin. Tällöin ne toimivat linkkinä teorian ja käytännön välillä eivätkä pelkästään kokemuspäisinä hyvinä käytäntöinä.

3.4.2 Hybridimodulaarisuus

ETO-strategiaa noudattavissa yrityksissä toimitetaan asiakaskohtaisesti suunniteltuja tuotteita, tyypillisesti yksilöllisiä HVLV-kokoonpanoja, kuten tehdaslaitteistoja tai suuria investointihyödykkeitä. Yksittäisen ETO-tuotteen suunnittelu ja toimitus saattaa kestää useita kuukausia tai jopa vuosia, ja tarjousvaiheessa vaaditaan jo huomattavia suunnitteluresursseja ilman, että aiempia ratkaisuja voidaan suoraan hyödyntää. Kilpailupaineet pakottavat ETO-yritykset lyhentämään toimitusaikoja ja laskemaan kustannuksia. Tarjouskilpailussa menestyäkseen on pystyttävä tarjoamaan räätälöity ratkaisu nopeammin ja edullisemmin kuin kilpailijat. Nykytilanteessa merkittävä osa asiantuntijatyöstä tehdään ennakkoon riskillä. Jos tarjouskilpailu hävitään, asiakkaan vaatimuksiin pohjautuva esisuunnittelutyö menee hukkaan. (Karhunen et al., 2024)

Ratkaisuksi ETO-ympäristön haasteisiin on ehdotettu modulaarisuuden ja tuotealustojen hyödyntämistä, jotta jokainen tuoteprojekti ei olisi täysin uusi suunnittelutehtävä, vaan aiemmin kehitettyjä osaratkaisuja voitaisiin käyttää uudelleen. Configure-to-Order (CTO) -strategiassa tuoteperhe määritellään jo etukäteen ja asiakastilaukset toteutetaan valmiita moduuleja yhdistelemällä, mikä mahdollistaa suunnittelutiedon tehokkaan uudelleenkäytön ja lyhentää läpimenoaikaa. (Karhunen et al., 2024) Tutkimuksissa onkin havaittu, että modulaarisella tuotearkkitehtuurilla voidaan lyhentää ETO-suunnitteluun kuluvaa aikaa (Pakkanen et al., 2022) ja siirtyä projektikohtaisesta suunnittelusta

ratkaisuarkkitehtuuriin, jossa hyödynnetään vakioituja moduuleja (Gepp et al., 2016). Toisaalta kirjallisuudessa on tuotu esiin, että ETO-yrityksiltä puuttuu selkeät menetelmät, joilla vakiointi, modulaarisuus ja platform-ajattelu voitaisiin jalkauttaa niiden toimintaympäristöön. André et al. (2017) huomauttavat, että perinteiset tuotealustakonseptit eivät riitä erittäin räätälöityjen järjestelmien suunnittelussa, vaan tarvitaan laajennettu design platform -ajattelu, joka kattaa eri suunnitteluressit.

Alan viimeaikaisessa tutkimuksessa on tunnistettu tarve yhdistää kaksi lähestymistapaa: moduulisysteemit ja Design Reasoning Patterns (DRP), jotta ETO-tuotteiden suunnittelussa voidaan saavuttaa sekä uudelleenkäytettävyyttä että joustavuutta (Karhunen et al., 2024). Tässä yhteydessä puhutaan hybridimodulaarisuudesta, jolla tarkoitetaan modulaaristen vakiokomponenttien ja asiakaskohtaisen suunnittelun yhdistämistä saman tuoteprojektin puitteissa. Karhunen et al. (2024) tekemä systemaattinen kirjallisuuskatsaus kartoitti, löytyykö kirjallisuudesta menetelmiä hybridimodulaarisuuden toteuttamiseksi, eli suunnittelun uudelleenkäyttöä tukevia menetelmiä, joissa ETO-tuotteita kehitetään hyödyntäen yhtäaikaaisesti moduulisysteemejä ja suunnittelun päättelymalleja. Katsauksen johtopäätöksenä oli, ettei täysin kattavaa menetelmää vielä ole, mutta on kehitetty useita osaratkaisuja, malleja ja työkaluja, jotka voivat yhdessä muodostaa perustan hybridimodulaariselle suunnittelulle. (Karhunen et al., 2024)

Modulaarisen arkkitehtuurin hyödyntäminen ETO-tuotteissa tarkoittaa, että osa tuotteesta suunnitellaan etukäteen uudelleenkäytettäviksi moduuleiksi, kun taas tietyt osat voidaan edelleen räätälöidä tilauskohtaisesti (Pakkanen et al., 2021a; Karhunen et al., 2024). Tärkeää on jakotapa, sillä siihen tallentuu tietoa modulaarisen rakenteen suunnitteluperusteista, ja se tukee modulaarisen tuoteperheen hallintaa sen elinkaaren aikana. Jakologiikan avulla yritys kykenee jälkikäteen ymmärtämään, miksi moduulijako on tehty tietyllä tavalla ja miten tulevat muutokset voidaan toteuttaa modulaarisuutta vaarantamatta. Karhunen et al. (2024) toteavat, että nykykirjallisuudessa ei ole juurikaan käsitelty sitä, miten ETO-tuoteprojekti tulisi pilkkoa moduulisysteemeihin ja toimituskohtaiseen suunnitteluun, eli miten jakotapaa sovelletaan hybridimalliin. Käytännössä yksi ETO-toimitus saattaa koostua useista ennalta määritellyistä moduulisysteemeistä sekä tietyistä täysin asiakaskohtaisista osista. Tällaisen kokonaisuuden jakotapa ja siihen liittyvien DRP-mallien kirjaaminen voisivat merkittävästi helpottaa muutosten hallintaa ja suunnittelun toistettavuutta jatkossa. (Karhunen et al., 2024) Nämä näkökulmat viittaavat siihen, että modulaarisen arkkitehtuurin hyödyntäminen ETO-ympäristössä ei ole pelkästään tekninen

tuoterakennekysymys, vaan se edellyttää myös suunnitteluprosessin ja tietohallinnan kehittymistä.

Hybridimodulaarisuuden tavoitteena on tehdä ETO-tuotteista osittain konfiguroitavia. Tämä tarkoittaa sitä, että tuotteella on ennalta suunniteltu modulaarinen perusrakenne, jota voidaan konfiguroida asiakkaan tarpeiden mukaisesti valitsemalla ja yhdistelemällä moduuleja, mutta tarvittaessa rakenteeseen voidaan integroida myös uusia, projektikohtaisia osia. (Pakkanen et al., 2021a) Osittain konfiguroitavat tuotteet yhdistävät modulaarisia ja integroitua osakokonaisuuksia, jolloin yrityksen on löydettävä hallittu tasapaino vakioitujen ratkaisujen ja tapauskohtaisen suunnittelun välillä. ETO-yritys ei siis voi tukeutua pelkästään vakioituihin katalogikomponentteihin, mutta toisaalta kaikkia ratkaisuja ei tarvitse suunnitella puhtaalta pöydältä. Osa voidaan konfiguroida modulaarisesti. (Juuti et al., 2023) Tutkimusten mukaan tällaisen geneerisen tuoterakennemallin puuttuminen vaikeuttaa tehokasta uudelleenkäyttöä ETO-ympäristössä ja voi johtaa myös ongelmiin mm. kustannuslaskennassa ja hinnoittelussa, koska jokainen tuote on erilainen. Toimitusprojektin lopulliset kustannukset ja vaatimukset saattavat muuttua matkan varrella, ellei alustavaa tuotevarianttia ole mahdollista mallintaa ja arvioida riittävällä tarkkuudella ennen yksityiskohtaista suunnittelua. Siksi tuotteistaminen sekä tuote- ja ratkaisumallien kehittäminen on noussut tärkeäksi keinoksi ETO-yrityksissä. (Karhunen et al., 2024) Myös sekä kaupallisten että teknisten tuoterakennemallien käyttö voi parantaa ETO-liiketoiminnan tarjousprosessia. Organisaatio saa yhtenäisemmän käsityksen tarjottavasta ratkaisusta, muutosten hallinta selkeytyy vakioitujen tuotemallin ansiosta, ja myös hinta- sekä aika-arvioiden tarkkuus paranee. (Mustonen & Härkönen, 2022) Tämä tuo esille modulaarisen tuoteperheen mallintamisen hyötyjä asiakasrajapinnassa. Jo tarjousvaiheessa voidaan hyödyntää olemassa olevia tuoterakenteita, mikä tekee tarjouksista luotettavampia ja nopeuttaa niiden laatimista. (Mustonen & Härkönen, 2022)

Toinen tärkeä konfiguroitavuuden keino on konfiguraattorien hyödyntäminen myös ETO-tuotteissa. Massaräätälöinnin puolella konfiguraattorit ovat monesti jo käytössä, mutta myös ETO-yritykset voivat käyttää konfigurointityökaluja ainakin osittain vakioitujen alijärjestelmien käsittelyyn. Kristjansdottir et al. (2017) kertovat, että vaikka koko tuotetta ei pystyttäisi konfiguroimaan, tietyt toistuvat suunnitteluvaiheet tai komponenttialueet voidaan automatisoida konfiguraattorilla. Aiemmassa tutkimuksessaan Kristjansdottir et al. (2015) raportoivat, että tuotekonfiguraattoreiden käyttö ETO-projektien kriittisimmässä osakokonaisuuksissa voi vähentää konfiguroinnin virheherkkyyttä ja myös keventää kokonaissuunnittelun monimutkaisuutta jakamalla ongelman hallittaviin osiin. Esimerkiksi pääsuunnittelun puitteissa voidaan ensin konfiguroida modulaarinen

perusratkaisu ja sen jälkeen erilliset suunnittelutyökalut huolehtivat yksityiskohtien laskennasta asiakaskohtaisesti. Konfigurointijärjestelmän käyttöönotto edellyttää, että modulaarinen tuoterakenne on riittävän selkeästi määritelty ja koodattu sääntöjen muotoon. Tämä liittyy takaisin suunnittelutiedon hallintaan. Yrityksen on määriteltävä modulaarisen tuoteperheensä säännöt ja rajat, jotta niitä voidaan ohjelmallisesti hyödyntää. (Kristjansdottir et al., 2015)

Vakiointi on myös tärkeää, koska modulaarisuus rakentuu paljolti vakioitujen rajapintojen ja yhteisten rakennuspalikoiden varaan. Vakioinnin myötä moduulikirjaston ylläpito helpottuu ja varianttien hallinta tehostuu, kun yhteiset nimikkeet ja ratkaisut on dokumentoitu. Vakiointi kytkeytyy myös tiedonhallintaan. Kun moduulit, säännöt ja suunnittelukaaviot on vakioitu, ne voidaan tallentaa yrityksen tietojärjestelmiin ja löytää helposti uusiokäyttöön. Kaiken kaikkiaan konfiguroitavuuden lisääminen ETO-tuotteisiin vaatii koko tuotearkkitehtuurin uudelleenarviointia. On päätettävä strategisesti, mitkä osuudet tuotteesta tehdään konfiguroitaviksi ja mitkä jätetään tapauskohtaisesti suunniteltaviksi, ja varmistettava näiden osien yhteensopivuus sekä teknisesti että prosessin kannalta. (Karhunen et al., 2024)

3.4.3 DRP

Design Reasoning Patterns eli DRP-mallit ovat tapa jäsentää ja kuvata suunnittelun etenemistä siten, että näkyviin tulevat paitsi lopulliset ratkaisut myös niiden taustalla oleva päättely, riippuvuudet ja ratkaisujen muodostumisjärjestys (Juuti et al., 2014; Lehtonen et al., 2016). Juuti et al. (2014) kytkevät DRP:n erityisesti suunnittelun päättelyrakenteiden näkyväksi tekemiseen, kun taas Lehtonen et al. (2016) tarkastelevat DRP-malleja suunnittelutiedon tallentamisen, hallinnan ja uudelleenkäytön välineenä. Tästä näkökulmasta DRP ei kuvaa ainoastaan tuotetta vaan myös sitä suunnittelulogiikkaa, jonka varassa tuotetta koskevat ratkaisut syntyvät (Juuti et al., 2014; Lehtonen et al., 2016). DRP-tutkimuslinjaan liittyy läheisesti dispositio-käsite, suunnittelupäätösjärjestysten mallinnus ja informaatiovirtojen formalisoiminen (Halonen et al., 2014; Adlin, 2021).

DRP:n teoreettista taustaa voidaan tarkastella disposition-ajattelun kautta. Halonen et al. (2014) esittävät Product Life Cycle Disposition Modelin, jonka tarkoituksena on kuvata tuotteen ominaisuuksien ja elinkaaren aikaisten ominaisuuksien välisiä dispositionaalisia suhteita. Tällöin suunnitteluratkaisua ei tarkastella vain rakenteellisena valintana vaan valintana, joka vaikuttaa valmistukseen, kokoonpanoon, käyttöön, huoltoon ja muihin elinkaaren vaiheisiin (Halonen et al., 2014). Tämä tausta on olennainen myös DRP:lle,

koska DRP pyrkii tekemään näkyväksi juuri niitä riippuvuuksia, joiden varassa myöhemmät suunnittelupäätökset syntyvät ja etenevät (Juuti et al., 2014).

Lehtonen et al. (2016) kuvaavat DRP-malleja välineenä suunnittelutiedon tallentamiseen ja hallintaan, mutta tuovat samalla esiin myös niihin liittyviä käytännön haasteita. Heidän mukaansa DRP-mallit ovat usein vahvasti tuote- ja yrityskohtaisia, minkä vuoksi niiden suora yleistettävyyks on rajallinen (Lehtonen et al., 2016). Samassa yhteydessä he korostavat, että mallien laatu riippuu olennaisesti mallintajien osaamisesta, koska kyse ei ole systemaattisesta mallista vaan asiantuntijoiden tuottamasta suunnittelutiedosta (Lehtonen et al., 2016). Lisäksi Lehtonen et al. (2016) nostavat esiin tulkinnanvaraisuuden, mahdolliset ristiriidat, loogiset silmukat ja laajojen kokonaisuuksien hallinnan keskeisinä haasteina DRP-mallien käytössä.

Lehtonen et al. (2016) esittävät myös keinoja vastata näihin haasteisiin. Heidän mukaansa mallien validiteettia voidaan parantaa osallistamalla kokeneita asiantuntijoita mallinnukseen ja käsittelemällä epävarmuuksia osana oppimis- ja kehitysprosessia eikä pelkästään virhelähteinä (Lehtonen et al., 2016). Samoin ristiriitoja ja loogisia kehiä voidaan tarkastella erillisillä analyysimenetelmillä, ja laajoja kokonaisuuksia voidaan hallita jakamalla tuote pienempiin geneerisiin osakokonaisuuksiin, joille laaditaan omat mallit (Lehtonen et al., 2016).

Adlin (2021) väitöskirja jatkaa samaa tutkimuslinjaa informaatiovirtojen mallinnuksen näkökulmasta. Adlinin (2021) mukaan mallinnuksessa voidaan erottaa toisaalta tuotteen yleistettävissä oleva design reasoning ja toisaalta geneerisen elementin eli moduulin prosessimalli. Tämä erottelu tuo DRP-ajattelun lähelle modulaarista tuotehallintaa, koska suunnittelun päättelylogiikka ja toimituskohtainen eteneminen eivät ole sama asia, vaikka ne liittyvät toisiinsa (Adlin, 2021). Adlin et al. (2022) kertovat, että informaatiovirtojen formalisoiminen liitetään jatkuvaan kehittämiseen ja mallinnus voi kohdistua myös yksittäisen komponentin design reasoning patterniin. Näin DRP laajenee yksittäisen suunnitteluketjun kuvauksesta laajempaan kehitys- ja koordinoitikehykseen (Adlin, 2021; Adlin et al., 2022).

Janne Mämmelän tutkimuksissa DRP saa selvästi soveltavan roolin. Mämmelä et al. (2019) käyttävät DRP:tä Technology Value Mapping -menetelmän keskeisenä mallinnusvälineenä. Näissä tutkimuksissa DRP:n avulla kuvataan, miten tuotteen ominaisuudet liittyvät haluttuihin käyttäytymisiin, arvonmuodostukseen ja kustannusvaikutuksiin (Mämmelä, 2019; Mämmelä et al., 2019). Samalla DRP toimii keinona kerätä kokeneiden suunnittelijoiden hiljaista tietoa ja siirtää sitä organisaation

yhteiseksi tiedoksi, mikä kytkee DRP:n paitsi suunnittelun myös tiedonhallinnan ja teknologiapäätösten tueksi (Mämmelä, 2019; Mämmelä et al., 2019).

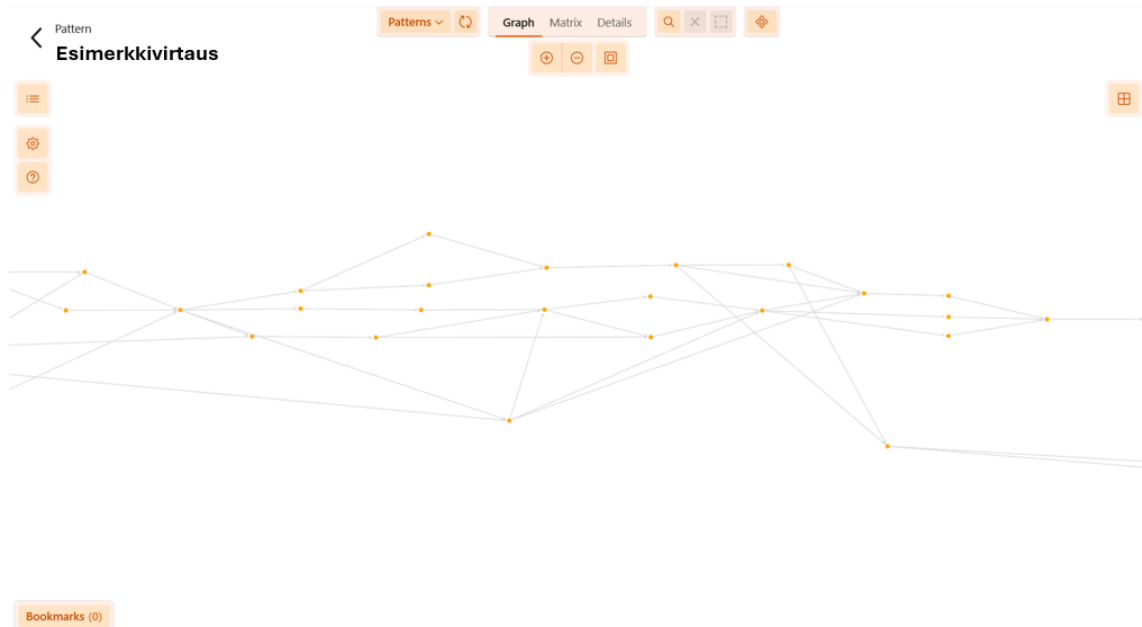
ETO- ja hybridimodulaarisessa kontekstissa DRP:n merkitys korostuu erityisesti silloin, kun kaikkia asiakastarpeita ei voida ratkaista valmiilla moduuleilla. Pakkanen et al. (2021b) esittävät, että osittain konfiguroitavien modulaaristen järjestelmien hallinta edellyttää moduulien rinnalla myös ei-moduulien huomioimista sekä suunnittelupäätösjärjestyksen kuvaamista. Tämän perusteella pelkkä moduulijärjestelmän rakenne ei riitä tilanteissa, joissa osa ratkaisusta syntyy edelleen toimituskohtaisessa suunnittelussa, vaan rinnalle tarvitaan suunnittelun etenemistä kuvaavia malleja (Pakkanen et al., 2021b). Karhunen et al. (2024) kokoavat saman ajatuksen systemaattisessa kirjallisuuskatsauksessaan ja toteavat, että moduulisysteemit ja DRP:t voivat yhdessä tukea suunnittelun uudelleenkäyttöä ETO-kontekstissa. Heidän mukaansa moduulisysteemi tarjoaa uudelleenkäytettäviä fyysisiä ratkaisuja, kun taas DRP tarjoaa uudelleenkäytettäviä suunnittelun päättelymalleja niille tuotteen osille, joita ei voida täysin standardoida (Karhunen et al., 2024).

Edellä esitetyn perusteella DRP on enemmän kuin yksittäinen mallinnustekniikka. Juuti et al. (2014) ja Lehtonen et al. (2016) jäsentävät DRP:n perusidean suunnittelun päättelyrakenteiden kuvaajana ja suunnittelutiedon hallinnan välineenä. Halonen et al. (2014) sekä Adlin (2021) syventävät tätä näkökulmaa dispositio-ajattelun, suunnittelupäätösjärjestysten ja informaatiovirtojen kautta, kun taas Mämmelä et al. (2019) osoittavat DRP:n sovellettavuuden myös teknologian arvottamisen ja tiedonhallinnan yhteydessä. Lisäksi Pakkanen et al. (2021b) ja Karhunen et al. (2024) liittävät DRP:n osaksi hybridimodulaaristen ja ETO-ratkaisujen hallintaa. Näin DRP voidaan lähteiden perusteella nähdä välineenä hiljaisen suunnittelutiedon eksplisointiin, suunnittelun uudelleenkäyttöön ja sellaisten ratkaisujen hallintaan, joissa vakioitujen moduulien rinnalla tarvitaan edelleen toimituskohtaista suunnittelua (Juuti et al., 2014; Lehtonen et al., 2016; Pakkanen et al., 2021b; Karhunen et al., 2024).

3.4.4 Suunnittelu- ja toimitusvirtaukset

Suunnittelu- ja toimitusvirtauksien tarkastelulla pyritään kuvaamaan, miten tuote etenee tiedon, päätösten ja toiminnan näkökulmasta ideasta ja määrittelystä kohti toimitettua ja käytössä olevaa ratkaisua. Suunnitteluvirtaus painottaa sitä, miten vaatimukset, arkkitehtuuri, komponenttiratkaisut ja tuotetieto kehittyvät ja siirtyvät eri toimijoille. Toimitusvirtaus taas painottaa sitä, miten valitut ratkaisut mahdollistavat tehokkaan tilaus-toimitusprosessin, eli kuinka paljon työtä joudutaan tekemään jokaista toimitusta kohti ja missä vaiheessa (Juuti & Lehtonen, 2006; Pakkanen et al., 2012). Juuti (2008)

korostaa, että jokaiselle tuoterakennetyypille tarvitaan sille sopiva suunnitteluprosessi sekä selkeä sovitus projektinhallinnan prosessiin, jotta kehitystyö pysyy hallittavana ja tehokkaana. Kuvassa 10 näytetään esimerkki, miltä NE käyttämä virtausmallinnusohjelma Design Explorer (DEx) näyttää.



Kuva 10. Esimerkkikuva DEx-työkalussa piirretystä virtauksesta.

Pakkanen et al. (2012) korostavat, että tuoteprosessia kannattaa kuvata virtauksina, koska pelkkä vaiheistus tai dokumenttista ei kerro, milloin tieto on riittävän valmista seuraavaa päätöstä varten. Käytännössä suunnittelu etenee usein rinnakkain, esimerkiksi arkkitehtuuria tarkennetaan samaan aikaan, kun yksityiskohtia joudutaan jo lukitsemaan hankintaa tai valmistusta varten. Tällöin ongelmaksi muodostuu tiedon valmiusaste. Osa tiedosta on alustavaa ja muuttuu vielä, mutta silti se virtaa organisaation läpi ja vaikuttaa valintoihin. (Pakkanen et al., 2012)

Virtausajattelun hyöty on siinä, että se tekee näkyväksi suunnittelun keskeiset riippuvuudet ja tyypilliset katkokset. Jos esimerkiksi komponenttimäärittely tarvitsee arkkitehtuurilta tietyn tarkkuustason, mutta arkkitehtuuri elää vielä, syntyy helposti iterointikierre. Pakkanen et al. (2012) näkevät tämän nimenomaan prosessin ja tiedon yhteensovittamisen ongelmana, eli on ymmärrettävä, mitä tietoa missäkin vaiheessa tarvitaan ja mikä on riittävä taso päätöksenteolle. Suunnitteluvirran mallintaminen auttaa myös näkemään sen, mitkä tiedot ovat aidosti kriittisiä läpimenoajalle ja mitkä ovat enemmän täydentävää dokumentointia (Pakkanen et al., 2012).

Toimitusvirtausten näkökulmaa konkretisoi Juutin ja Lehtosen (2006) esittämä ajatus siitä, että tilaus-toimitusprosessi muuttuu merkittävästi sen mukaan, kuinka paljon

toimituskohtaisesti joudutaan tekemään suunnittelua. He erottavat eri toimitus- ja tuotetyyppejä sen perusteella, missä määrin toimitus on vakio, konfiguroitava tai yksilöllinen. Olennainen havainto on, että konfiguroitavissa toimituksissa asiakastarpeet käsitellään pääosin vaihtoehtojen valintoina, kun taas uniikeissa toimituksissa asiakastarpeet ovat suora syöte suunnitteluun ja aiheuttavat uutta suunnittelutyötä toimitusprojektin aikana (Juuti ja Lehtonen, 2006). Juuti ja Lehtonen (2006) esittävät myös toimitussisällön luokittelun, jossa tuotteen sisällä voi samaan aikaan olla vakio-osia, konfiguroitavia osia, uniikkeja osia sekä näiden yhdistelmiä. Eli yhden tuotteen toimitus ei välttämättä ole kokonaan vakio tai kokonaan projektikohtainen, vaan sama toimitus voi sisältää sekä täysin uudelleenkäytettäviä elementtejä että kertaluonteisia ratkaisuja (Juuti & Lehtonen, 2006). Kun toimitussisältö vaihtelee näin, myös toimivin toimintatapa vaihtelee. Tämän vuoksi he ehdottavat, että toimitusprosessia kannattaa tarkastella prosessimoduuleina, joita yhdistellään tilanteen mukaan. Tavoitteena on sovittaa yhteen se, mitä toimitetaan ja millä toimitusprosessin logiikalla toimitus toteutetaan, jotta työmäärä per toimitus pienenee (Juuti & Lehtonen, 2006).

Juuti ja Lehtonen (2006) kuvaavat, että toimitusverkosto ja alihankkijoiden kyvykkyydet voivat vaihdella toimituksesta toiseen. Tällöin yhden jäykän tuoterakenteen ja yhden toimitusmallin käyttäminen ei ole aina tehokasta. Heidän johtopäätöksensä on, että useiden modulaaristen rakenteiden ja niitä vastaavien toimintatapojen tunnistaminen voi parantaa toimitustehokkuutta kompleksisissa tuotteissa (Juuti & Lehtonen, 2006). Wang et al. (2014) lähestyvät virtausajattelua modulaarisen suunnittelun näkökulmasta ja esittävät suunnittelun etenemistavan, jonka tavoitteena on tukea purkamista ja uudelleenvalmistusta. Vaikka artikkelin konteksti on koneistus ja työstökoneet, siinä korostuu yleinen periaate, eli jos modulaarisuutta halutaan hyödyntää elinkaaren myöhemmissä vaiheissa, se täytyy huomioida jo suunnitteluvaiheessa, ei vasta toimituksen jälkeen (Wang et al., 2014). Tämä linkittää suunnittelu- ja toimitusvirtaukset yhteen, koska suunnitteluratkaisut (esim. moduulirajat, kiinnitykset ja testattavuus) määrittävät pitkälle sen, kuinka sujuvaa toimitus, huolto ja elinkaaren loppupään toiminnot ovat (Wang et al., 2014).

Kirjallisuuden perusteella suunnittelu- ja toimitusvirtauksien tarkastelu on hyödyllinen tapa yhdistää tuotekehityksen tiedonhallinta ja toimituskyvykkyys. Pakkanen et al. (2012) painottavat suunnitteluvirran näkökulmasta tiedon valmiutta ja riippuvuuksia, koska ongelmat syntyvät usein siitä, että tieto liikkuu väärässä muodossa tai väärään aikaan. Juuti ja Lehtonen (2006) taas kertovat toimitusvirtauksien näkökulmasta, että toimituskohtaisen työn määrä riippuu siitä, kuinka suuri osa tuotteesta on vakioitua, konfiguroitavaa tai uniikkia, ja että tehokkuutta voidaan parantaa sovittamalla

toimitussisältö ja toimintatapa yhteen. Wang et al. (2014) täydentävät tätä tuomalla mukaan elinkaarinäkökulman. Modulaarisuuden hyödyt toimitus- ja elinkaarivaiheessa edellyttävät systemaattista suunnittelun etenemistä ja periaatteita, jotka ohjaavat modulaarisia ratkaisuja jo varhaisessa vaiheessa (Wang et al., 2014).

3.4.5 Siirtyminen modulaariseen toimintatapaan

Modulaarisuus lupaa usein parempaa variaation hallintaa, suunnittelun uudelleenkäyttöä ja tehokkaampaa asiakaskohtaista konfigurointia. Näiden hyötyjen realisoituminen riippuu kuitenkin siitä, miten hyvin tuoterakenne, prosessit ja organisaation työnjako ovat linjassa. Tuotearkkitehtuurin valinnat vaikuttavat esimerkiksi muutosten kohdistumiseen, komponenttien vakiointiin ja tuotekehityksen hallintaan. Tämä kytkentä on keskeinen perustelu sille, miksi modulaarisuus tulee nähdä myös johtamis- ja organisointikysymyksenä (Ulrich, 1995). Vastaavasti vakioidut rajapinnat voivat tuoda koordinaatiota tuotteeseen, mutta käytännössä tämä edellyttää sitä, että organisaatiolla on kyky tuottaa ja ylläpitää rajapintatietoa sekä siihen liittyviä päätöksiä ja sääntöjä (Sanchez & Mahoney, 1996).

Empiirinen tutkimus tukee ajatusta, että tuoterakenteen ja organisaatorakenteen epäsuhte vaikeuttaa uuden arkkitehtuurin käyttöönottoa. Jos tekniset riippuvuudet eivät vastaa tiimien välistä yhteistyötä, syntyy aukkoja juuri niihin kohtiin, joissa rajapintapäätökset ovat kriittisiä (Sosa et al., 2004). Tätä ilmiötä kuvataan myös "mirroring"-ajattelun kautta, eli organisaation vuorovaikutussuhteet ja tekniset riippuvuudet liittyvät usein vahvasti toisiinsa, mutta poikkeuksia on. Poikkeuksien hallinta vaatii tietoista johtamista ja sopivia rakenteita (Colfer & Baldwin, 2016). Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että modulaarisuuteen siirtyminen vaatii rinnakkaista kehitystä sekä teknisessä arkkitehtuurissa että työnjaossa, päätöksenteossa ja tiedonhallinnassa.

Muutoksen kannalta hyödyllinen näkökulma on ristiriitojen analyysi. Organisaatiomuutoksessa jännitteet näkyvät usein puheessa, perusteluissa ja vastaväitteissä. Näiden ilmentymien systemaattinen tarkastelu auttaa tunnistamaan sen, missä kohtaa uusi modulaarinen toimintatapa törmää vakiintuneisiin toimintalogiikoihin, esimerkiksi projektikohtaiseen optimointiin tai epäselvään omistajuuteen rajapinnoissa (Engeström & Sannino, 2011). Lisäksi kirjallisuus korostaa ideaa, että muutos ei ole ulkoa annettu ratkaisu, vaan osallistujat rakentavat muutosta itse. Tällöin keskeistä on se, että ihmiset alkavat sekä kyseenalaistaa nykykäytäntöjä että tehdä aloitteita uuden mallin toteuttamiseksi (Sannino et al., 2016). Modulaarisuuteen siirtymisessä tämä näkyy esimerkiksi siinä, että ihmiset ottavat aktiivisesti kantaa moduulijakoon ja rajapintoihin, sopivat yhteisistä pelisäännöistä ja huolehtivat siitä, että uudet käytännöt

eivät jää vain yhdeksi projektiksi vaan vakiintuvat pysyviksi toimintatavoiksi (Virkkunen & Schaupp, 2011).

Modulaarisuuteen siirtymisessä on tärkeää, että esimerkiksi jakotapa ja rajapinnat täytyy tehdä näkyviksi ja yhteisesti ymmärrettäviksi. Tässä arkkitehtuurimallit, rajapintakuvaukset ja konfigurointisäännöt toimivat hyvinä malleina, sillä ne ovat riittävän konkreettisia ohjaamaan työtä, mutta samalla keskeneräisiä ja kehittyviä, jolloin ne mahdollistavat eri funktioiden välisen neuvottelun ja oppimisen (Miettinen & Virkkunen, 2005). Tällainen malliajattelu sopii hyvin yhteen BfP:n kanssa, koska BfP tuottaa nimenomaan dokumentoitavaa suunnitteluinformaatiota, jota voidaan käyttää yhteisen työn koordinaatioon (Pakkanen, 2015; Pakkanen et al., 2016).

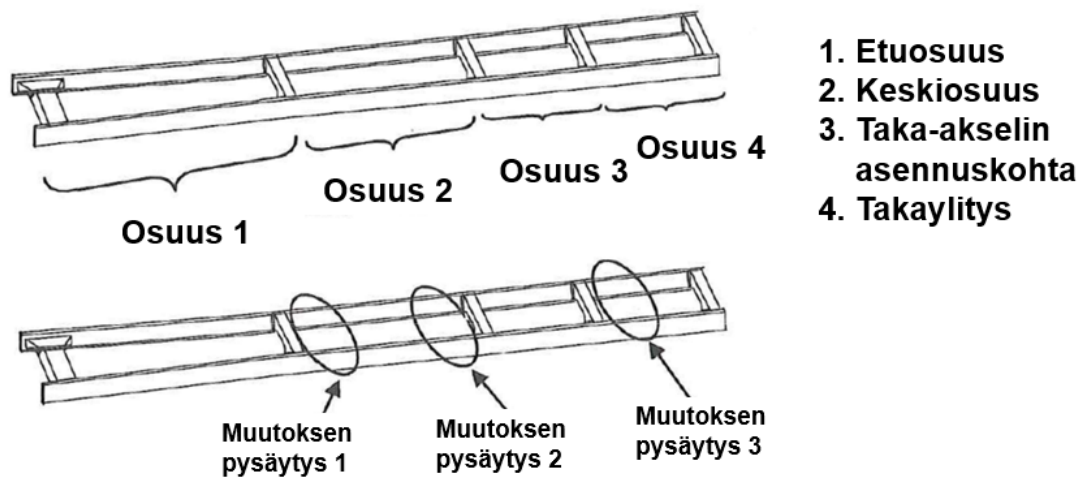
Kun modulaarinen arkkitehtuuri alkaa muodostua, muuttuu myös se, mitä hyvin johdettu tuotekehitys tarkoittaa. Juutin ja Lehtosen (2010) Design management -malli korostaa tuotekehitysorganisaation kokonaisvaltaista johtamista, jossa roolit, päätöksentekorakenteet ja suunnittelua ohjaavat käytännöt muodostavat yhtenäisen kokonaisuuden (Juuti & Lehtonen, 2010). Modulaarisuudessa tämä on erityisen relevanttia, koska arkkitehtuuria koskevat päätökset ovat pitkävaikutteisia. Siksi yrityksellä tulee olla selkeä omistajuus ja päätöksentekopolku esimerkiksi moduulijaon muutoksille, rajapintapoikkeamille ja konfigurointisääntöjen päivityksille. Ilman tällaista johtamisrakennetta modulaarisuus jää helposti projektien sisäiseksi ratkaisuksi, eikä siitä synny koko tuoteperhettä ja toimitusketjua ohjaavaa toimintatapaa. (Juuti & Lehtonen, 2010). RACI-matriisi on yksi tapa kuvata sitä, kenen vastuulla mikäkin modulaarisuuden osa-alue on (Lee et al., 2021).

Kirjallisuus tuo esiin, että organisaatiot kohtaavat modulaarisuudessa usein jännitteitä tuotekehityksen joustavuuden ja tuotannon tehokkuuden välillä. Tällaiset jännitteet voivat toimia myös oppimisen käynnistäjinä, jos niitä käsitellään systemaattisesti ja ne kytketään tavoitetilan hakemiseen (Jalonen et al., 2016). BfP:n näkökulmasta tämä tarkoittaa sitä, että jakotapa ja konfigurointitieto eivät voi olla pelkästään teknisiä päätöksiä. Niiden tulee heijastaa myös liiketoiminnan ja tuotannon tavoitteita, jotta moduulirakenne tukee sekä asiakasvariaatiota että toteutettavuutta (Pakkanen, 2015). Organisatoriset ja kulttuuriset haasteet ovat myös yleisiä modulaarisuutta käyttöön otettaessa. Perinteisessä ETO-projektitoimintaympäristössä saattaa esiintyä muutosvastarintaa, kun siirrytään modulaariseen tuotealustaan. Projektipohjainen suunnittelukulttuuri voi olla ristiriidassa modulaarisen tuotehallinnan kanssa (Pakkanen et al., 2019). Pakkanen et al. (2019) raportoivat tapaustutkimuksissa, että eriytyneet projektitiimit ja yksilölliset asiakasratkaisut voivat törmätä modulaarisuuden vaatimaan vakiointiin, mikä vaatii johdolta aktiivista muutoksenhallintaa.

Yhteenvedona siirtyminen modulaariseen toimintatapaan voidaan nähdä hallittuna muutosprosessina, jossa modulaarinen tuoteperhe ja konfigurointiperiaatteet jäsennetään vaiheittain (Pakkanen et al., 2016). Siinä myös organisaatio rakentaa yhteisen ymmärryksen ja uudet työvälineet oppimisen kautta (Engeström & Sannino, 2010; Miettinen & Virkkunen, 2005). Johtamis- ja päätöksentekorakenteet varmistavat, että arkkitehtuuria ylläpidetään ja kehitetään myös arjessa (Juuti & Lehtonen, 2010). Tällöin modulaarisuus ei jää yksittäiseksi suunnitteluratkaisuksi, vaan siitä tulee yrityksen tapa hallita variaatiota, toteuttaa muutoksia ja kehittää tuoteperheitä pitkäjänteisesti.

3.4.6 Muutoksenpysäytysvyöhykkeet

Muutoksenpysäytysvyöhykkeillä (*change stop zones*) tarkoitetaan Holmqvistin (2004) mukaan tuoterakenteeseen tarkoituksella suunniteltuja rajattuja alueita, joiden tehtävä on estää muutosten hallitsematon leviäminen tuotteen muihin osiin. Ajatus liittyy vahvasti tuotearkkitehtuuriin ja erityisesti siihen, miten riippuvuudet ja liittynät määritellään. Kun muutokset kohdistuvat tyypillisesti vain osaan tuotetta (esim. asiakasmuuntelun tai teknologiapäivitysten takia), muutoksenpysäytysvyöhykkeiden avulla pyritään rajaamaan muutosvaikutukset ennalta määritellyn alueeseen. Tällöin muu rakenne voi pysyä vakaampana, mikä helpottaa sekä suunnittelun hallintaa että olemassa olevan ratkaisun uudelleenkäyttöä. (Holmqvist, 2004) Kuvassa 11 näytetään Holmqvist (2004) esimerkki muutoksenpysäytysvyöhykkeistä. Siinä ideana on, että kunkin osuuden moduulit voivat muuntua niiden muutoksenpysäytysvyöhykkeillä, mutta muuntelun täytyy jäädä niihin. Eli muuntelu ei voi levitä muutoksenpysäytysvyöhykkeiden ulkopuolelle. (Holmqvist, 2004)



Kuva 11. Esimerkkikuva ajoneuvon rungon muutoksenpysäytysvyöhykkeistä.
Muokattu lähteestä (Holmqvist, 2004).

Käytännön tasolla muutoksenpysäytysvyöhykkeet voidaan ymmärtää arkkitehtuuripäätöksiksi, joissa muutosherrat komponentit tai alijärjestelmät erotetaan muusta tuotteesta niin, että niiden väliset rajapinnat ovat selkeitä ja mahdollisimman vakioituja (Holmqvist, 2004). Tavoitteena ei ole poistaa muutoksia vaan tehdä niistä ennakoitavia ja paikallisia. Tämän voi nähdä myös tuotevariaation hallinnan näkökulmasta. Jos muuntelu ja päivitystarpeet saadaan ohjattua tietyille alueille, tuoteperheen muut osat voivat muodostaa vakaamman ytimen, jonka päälle variaatio rakennetaan hallitusti (Holmqvist, 2004). Näin muutoksenpysäytysvyöhykkeet tukevat sekä teknistä modulaarisuutta että tuotevalikoiman ylläpidettävyyttä pitkällä aikavälillä.

3.4.7 Yhteenveto Brownfield 2.0

Brownfield 2.0 voidaan nähdä alkuperäistä Brownfield-prosessia laajempaan lähestymistapana, jossa huomio kohdistuu moduulijärjestelmän lisäksi myös sen taustalla oleviin jäsentämisperiaatteisiin, toimintamalliin ja muutoksen hallintaan. Tuoterakenneperiaatteet eli PSP:t tukevat päätöstä siitä, miten tuote kannattaa jakaa moduuleihin ja millä perusteilla eri osat erotetaan toisistaan (Pakkanen et al., 2021a). Samalla siirtyminen modulaariseen toimintatapaan ei ole vain rakenteellinen muutos, vaan se edellyttää muutoksia myös tuotekehityksen johtamiseen, organisoitumiseen ja käytännön toimintatapoihin. Juuti ja Lehtonen (2010) korostavat, että tehtävänä on sovittaa yhteen tuoterakenne, suunnitteluprosessi, tavoitteet ja organisaatio. Tämä tukee Brownfield 2.0:n ajatusta siitä, että modulaarisuus ei ole vain tuotteen rakenneratkaisu vaan koko yrityksen toimintaa ohjaava periaate. Lisäksi suunnittelu- ja toimitusvirtaukset auttavat tunnistamaan, missä tuotteen osissa voidaan hyödyntää valmiita ratkaisuja ja missä tarvitaan edelleen toimituskohtaista suunnittelua (Pakkanen et al., 2012).

Brownfield 2.0:n keskeinen lisäarvo liittyy siihen, että modulaarisuutta ei oleteta täysin yhtenäiseksi koko tuotteessa. Hybridimodulaarisuuden näkökulmasta osa tuotteesta voidaan vakioda ja konfiguroida moduuleina, kun taas osa jää projektikohtaisen suunnittelun alueelle (Karhunen et al., 2024). Tällöin DRP:t tukevat suunnittelutiedon uudelleenkäyttöä tekemällä näkyväksi sen, miten ratkaisut, riippuvuudet ja perustelut etenevät toimituskohtaisessa suunnittelussa (Lehtonen et al., 2016). Tämä on erityisen tärkeää ETO-ympäristössä, jossa kaikkea tietoa ei voida siirtää valmiiksi moduuleiksi, vaan osa tiedosta on hallittava suunnittelun päättelyketjuina ja toistuvina ratkaisumalleina (Karhunen et al., 2024; Lehtonen et al., 2016). Muutoksenpysäytysvyöhykkeet täydentävät kokonaisuutta rajaamalla muutosten leviämistä tuotteen muihin osiin. Holmqvistin (2004) mukaan tällaiset rakenteelliset rajaukset ovat keskeisiä tuotevariaation hallinnassa, koska ne auttavat säilyttämään muutokset hallituissa tuotteen osissa. Näin Brownfield 2.0 yhdistää moduulijärjestelmät, toimituskohtaisen suunnittelun hallinnan ja muutoksen rakenteellisen rajaamisen aiempaa yhtenäisemmäksi kokonaisuudeksi.

4. AINEISTON ESITTELY JA ANALYYSI

Aineisto liittyy Nordic Element Oy:n nykypäivän toimintaan. Käsikirja on kevyt kuvaus siitä, mistä Nordic Elementin toiminta koostuu ja miten keskeisiä käytäntöjä sovelletaan käytännön projekteissa. Käsikirjassa kuvataan kokonaisuuksia ja olennaisia toimintatapoja, mutta yksittäisiin menetelmiin tai työkaluihin ei syvennytä niin yksityiskohtaisesti, että niitä voisi pelkän käsikirjan perusteella täysin oppia tai soveltaa ilman lisäohjausta.

Tutkimuksen kontekstina on Nordic Element Oy, joka toimii modulaarisen tuotekehityksen konsulttiyrityksenä. Yritys toteuttaa kehitysprojekteja pääosin High Value Low Volume -tuotteita kehittävässä organisaatioissa. Tämä toimintaympäristö vaikuttaa siihen, millaisia haasteita ja tavoitteita modulaarisuudelle asetetaan sekä millä tavoin Brownfield-tyyppistä kehittämistä käytännössä sovelletaan. Analyysillä pyrittiin tunnistamaan, millainen Brownfield-prosessi on nykyään. Prosessi on julkaistu vuonna 2015, mutta se on sittemmin päivittyneenä ja näyttäytyy käytännössä osittain eri tavalla kuin mitä teoria kuvaa. Tämän työn analyysin lopputuotoksena muodostettiin kaksi kokonaisuutta: kirjallisuuskatsaus Brownfield 2.0 teoriasta sekä käsikirja Nordic Element Oy:n käytännön toiminnasta.

Alkuperäisen Brownfield-prosessin ja Brownfield 2.0:n vertailu taulukossa 1 osoittaa, että jo Pakkanen (2015) kuvasi varsin laajan ja jäsentyneen lähestymistavan modulaarisuuden kehittämiseen. Vertailutaulukon perusteella voidaan todeta, että alkuperäinen prosessi sisälsi jo huomattavan määrän sellaisia osa-alueita, jotka ovat edelleen Brownfield-ajattelun ytimessä. Tämän vuoksi Brownfield 2.0:aa ei tarkastella täysin uutena mallina, vaan alkuperäisen prosessin jatkokehityksenä. Analyysin perusteella kehitys on tapahtunut ennen kaikkea siten, että aiemmin esitettyä perustaa on täydennetty, tarkennettu ja laajennettu käytännön tarpeiden pohjalta.

Taulukko 1. Alkuperäisen Brownfield-prosessin (Pakkanen, 2015) ja Brownfield 2.0 erot.

X = huomioitu prosessissa o = osittain huomioitu – = ei huomioitu	Brownfield-prosessi (2015)	Brownfield 2.0
<i>Rajapinnat</i>	X	X
<i>Moduulit</i>	X	X
<i>Konfigurointitieto</i>	X	X
<i>Arkkitehtuuri</i>	X	X

<i>Tilavaraukset</i>	X	X
<i>Muutoksenpysäytysvyöhykkeet</i>	o	X
<i>Projektin tavoitteen asettaminen</i>	X	X
<i>CSL</i>	X	X
<i>BIA</i>	X	X
<i>Gripen</i>	X	X
<i>Muuntelutarpeet</i>	X	X
<i>Moduulijärjestelmä</i>	X	X
<i>PSP</i>	–	X
<i>Tuotteen jakotavat</i>	–	X
<i>Hybridimodulaarisuus</i>	–	X
<i>Hiljaisen tiedon kerääminen & mallinnus</i>	o	X
<i>DRP</i>	–	X
<i>Suunnittelu- ja toimitusvirtaukset</i>	–	X
<i>GEMS/Dynamo</i>	–	X
<i>Muutoksen läpivienti</i>	–	X

Vertailu toi kuitenkin esiin myös selkeitä uusia sisältöjä, joita ei alkuperäisessä Brownfield-prosessissa ollut mukana samalla tavalla. Nämä esitellään tuloksissa. Analyysissä havaittiin myös, että osa teemoista oli tunnistettavissa jo alkuperäisessä Brownfield-prosessissa, mutta Brownfield 2.0:ssa niitä on kehitetty aiempaa pidemmälle. Tällaisia teemoja olivat muutoksenpysäytysvyöhykkeet sekä hiljaisen tiedon kerääminen ja mallintaminen. Näiden osalta kyse ei siis ollut täysin uusista elementeistä vaan olemassa olleiden näkökulmien vahvistamisesta ja käytännöllisemmästä soveltamisesta. Tämän perusteella aineiston analyysi viittaa siihen, että Brownfield 2.0:n keskeinen kehityssuunta on ollut alkuperäisen prosessin täydentäminen sellaisilla osa-alueilla, jotka tukevat paremmin yritysten arjen monimutkaisia ja vaihtelevia tilanteita.

Työkalujen suhteen kehitystä on tapahtunut mallinnuksen puolella. GEMS- ja Dynamo-työkalut on kehitetty modulaarisen tuoterakenteen mallinnukseen. Siinä voidaan yhdistää muuntelutarpeet ja PSPt tuoterakenteeseen. Myös rajapintojen mallinnusta voidaan tehdä GEMS- ja Dynamo-työkaluilla. Työkaluissa on monia muitakin ominaisuuksia, jotka avataan tarkemmin käsikirjassa. Pakkanen et al. (2020a) artikkelissa esitellään GEMS-työkalun metamalli, josta saa tarvittaessa vielä paremman käsityksen siitä, millaisesta työkalusta on kyse.

Brownfield 2.0 uudet sisällöt tulivat ilmi suurimmaksi osaksi haastatteluiden kautta. Taulukossa 2 on esitelty ne haastattelut, joissa Brownfield 2.0 uusia osa-alueita on käsitelty. Taulukosta on nähtävissä, että jokaisesta uudesta osa-alueesta kerätty tietoa vähintään kaksi kertaa. Näissä haastatteluissa on käsitelty muitakin Brownfield-prosessin ja Brownfield 2.0:n asioita, mutta tähän taulukkoon on kerätty vain uudet asiat.

Taulukko 2. Brownfield 2.0 uusien osa-alueiden tiedonkeruu haastatteluista.

	PSP	Tuotteen jakotavat	Hybridi-modulaarisuus	DRP	Suunnittelu- ja toimitusvirtaukset	GEMS/Dynamo	Muutoksen läpivienti
H1	x						
H2			x			x	x
H3	x	x				x	
H4		x			x	x	x
H5			x	x			
H6					x		
H7				x			
H8				x			

Taulukko 2 osoittaa, että Brownfield 2.0:n uusista osa-alueista kerätty tieto ei perustu vain yhden haastateltavan näkemyksiin, vaan samoja teemoja nousi esiin useilta eri asiantuntijoilta. Tämä parantaa aineiston luotettavuutta, koska havaintoja voitiin vertailla ja koota yhteen eri näkökulmista. Näin muodostunut kokonaiskuva antaa perustellumman kuvan siitä, millaisia uusia sisältöjä Brownfield 2.0:aan nykyisessä toiminnassa liittyy.

5. TULOKSET

Tässä luvussa esitetään tutkimuksen keskeiset tulokset. Ensin kuvataan, mitä Brownfield 2.0 kokonaisuutena sisältää. Tämän jälkeen tarkastellaan modulaarisuuden mahdollisia hyötyjä ja haasteita tutkimuskysymysten 1 ja 2 näkökulmasta. Lopuksi esitetään, miten Brownfield-prosessi on kehittynyt Brownfield 2.0:ksi sekä kuinka vahvasti eri osa-alueet perustuvat teoriaan.

Tulosten perusteella Brownfield 2.0 muodostuu laajasta kokonaisuudesta, joka ei näyttäyty vain yksittäisenä menetelmänä vaan aiempaa laajempaa toimintamallina, jossa yhdistyvät tuoterakenteen kehittäminen, tiedon mallinnus, päätöksenteon tuki ja käytännön muutoksen johtaminen. Erityisesti hybridimodulaarisuus näyttäytyy merkittävänä lisäyksenä alkuperäiseen Brownfield-prosessiin verrattuna. Taulukossa 3 on listattu, mistä Brownfield 2.0 kokonaisuus koostuu.

Taulukko 3. Brownfield 2.0 osa-alueet.

Brownfield 2.0 sisältö
Rajapinnat
Moduulit
Konfigurointitieto
Arkkitehtuuri
Tilavaraukset
Muutoksenpysäytysvyöhykkeet
Projektin tavoitteen asettaminen
CSL
BIA
Gripen
Muuntelutarpeet
Moduulijärjestelmä
PSP
Tuotteen jakotavat
Hybridimodulaarisuus
Hiljaisen tiedon kerääminen & mallinnus

DRP
Suunnittelu- ja toimitusvirtaukset
GEMS/Dynamo
Muutoksen läpivienti

Taulukossa 4 on tuotu näkyville muutamia työssä mainittuja moduloinnin hyötyjä ja haasteita. Tutkimuskysymysten 1 ja 2 tulokset osoittavat, että moduloinnilla voidaan saavuttaa useita hyötyjä, mutta samalla siihen liittyy myös haasteita. Näistä voidaan todeta, että modulaarisuus ei tuota hyötyjä automaattisesti. Hyötyjen saavuttaminen edellyttää muun muassa onnistunutta jakotapaa, selkeää omistajuutta ja organisaation kykyä ottaa uusi toimintamalli käyttöön.

Taulukko 4. TK1 & TK2 tuloksia.

Moduloinnin hyödyt	Moduloinnin haasteet
Muuntelun hallinta	Alkuinvestointi
Tuotteistetumpi tarjonta	Väärä jakotapa tuo ongelmia
Uudelleenkäyttö	Ratkaisujen omistajuus ja ylläpito
Konfiguroitavuus	Organisaation muuttuminen
Huollettavuus	Muutoksen läpivienti
Päivitettävyys	Modulaarisuuden ymmärtäminen
Suunnittelumäärän vähentyminen tai sen järkevämpi kohdistus	
Virheiden vähentyminen	
Myynnin helpottuminen	
Tuotekehityksen sujuvoituminen	

Keskeisiksi hyödyiksi tunnistettiin muuntelun hallinta, tuotteistetumpi tarjonta, uudelleenkäyttö, konfiguroitavuus, huollettavuus, päivitettävyys, suunnittelumäärän vähentyminen tai sen tarkoituksenmukaisempi kohdistaminen, virheiden vähentyminen, myynnin helpottuminen sekä tuotekehityksen sujuvoituminen. Keskeisiksi haasteiksi puolestaan tunnistettiin alkuinvestointi, väärän jakotavan aiheuttamat ongelmat, ratkaisujen omistajuus ja ylläpito, organisaation muuttuminen, muutoksen läpivienti sekä modulaarisuuden ymmärtäminen. Tämä toimii hyvänä yleiskuvana siitä, millaisia vaikutuksia modulaarisuudella voi olla.

Tutkimuskysymyksen 3 osalta tulokset osoittavat, että alkuperäinen Brownfield-prosessi sisälsi jo huomattavan määrän modulaarisuuden kannalta keskeisiä elementtejä. Brownfield 2.0 kuitenkin laajentaa tätä kokonaisuutta useilla uusilla osa-alueilla. Tällaisiksi osa-alueiksi tunnistettiin erityisesti PSP, tuotteen jakotavat, hybridimodulaarisuus, DRP:t, suunnittelu- ja toimitusvirtaukset sekä GEMS- ja Dynamo-työkalut. Lisäksi muutoksen läpivienti nousi Brownfield 2.0:ssa selkeämmin näkyväksi kokonaisuudeksi kuin alkuperäisessä prosessissa. Taulukossa 5 on esitelty, mitä uutta Brownfield 2.0 sisältyy.

Taulukko 5. Brownfield 2.0 uudet osa-alueet.

	Brownfield-prosessi (2015)	Brownfield 2.0
o = osittain huomioitu – = ei huomioitu		
<i>PSP</i>	–	X
<i>Tuotteen jakotavat</i>	–	X
<i>Hybridimodulaarisuus</i>	–	X
<i>DRP</i>	–	X
<i>Suunnittelu- ja toimitusvirtaukset</i>	–	X
<i>GEMS/Dynamo</i>	–	X
<i>Muutoksen läpivienti</i>	–	X

Näiden lisäysten perusteella voidaan tulkita, että Brownfield 2.0 ei keskity pelkästään tuotteen modulaariseen jäsentämiseen vaan laajentaa tarkastelua myös käytännön kehitystyöhön, tiedonhallintaan, työkaluihin ja organisaation toimintatapojen muuttamiseen.

Taulukossa 6 näkyvät tulokset osoittavat, että Brownfield 2.0 perustuu monilta osin teoriaan, vaikka käytännön työskentely voi näyttäytyä vahvasti kokemusperäisenä ja yritysکوhtaisena. Tämän perusteella Brownfield 2.0 voidaan nähdä alkuperäistä Brownfield-prosessia laajempänä ja käytännönläheisempänä kokonaisuutena. Se säilyttää alkuperäisen prosessin teoreettisen perustan, mutta tuo sen lisäksi uusia menetelmiä, työkaluja ja näkökulmia, joiden avulla modulaarisuutta voidaan soveltaa paremmin yritysten todellisiin toimintaympäristöihin.

Taulukko 6. Brownfield 2.0 perustuminen teoriaan.

3 = perustuu suuresti teoriaan	Teoriaan perustumisen taso
2 = perustuu osittain teoriaan	
1 = perustuu vähän teoriaan	

Rajapinnat	3
Moduulit	3
Konfigurointitieto	3
Arkkitehtuuri	3
Tilavaraukset	3
Muutoksenpysäytysvyöhykkeet	2
Projektin tavoitteen asettaminen	2
CSL	1
BIA	1
Gripen	1
Muuntelutarpeet	1
Moduulijärjestelmä	3
PSP	2
Tuotteen jakotavat	2
Hybridimodulaarisuus	2
Hiljaisen tiedon kerääminen & mallinnus	1
DRP	3
Suunnittelu- ja toimitusvirtaukset	2
GEMS/Dynamo	2
Muutoksen läpivienti	2

Taulukossa 6 teoriaan perustumisen luokittelussa taso 3 tarkoittaa, että osa-alueella on selkeä teoreettinen perusta ja että Brownfield 2.0:n käyttö vastaa melko suoraan tätä perustaa. Taso 2 tarkoittaa, että osa-alueella on tunnistettava teoreettinen tausta, mutta nykyinen sovellus sisältää myös käytännössä kehitettyä tulkintaa, yhdistelyä tai yrityskohtaista soveltamista. Myös tähän tasoon sisältyvät ne osa-alueet, joista ei vielä löydy laajaa teoriaa, mutta olemassa oleva teoria on vahvasti käytössä. Taso 1 tarkoittaa, että osa-alue nojaa vain rajallisesti aiempaan teoriaan tai sen teoreettinen perusta on vielä hajanaista, jolloin käytännön toteutus perustuu enemmän kokemukseen, työkaluihin tai yrityksessä kehitettyihin toimintatapoihin.

6. POHDINTA

Modulointiin kannattaa lähteä liikkeelle tavoitteista ja rajauksesta, kuten miksi modulaarisuutta tehdään ja mihin se ensisijaisesti vaikuttaa. Seuraavaksi tulee varmistaa jakologiikan järkevyyden ja rajapintojen hallinta, koska nämä ratkaisut ohjaavat kaikkea myöhempää kehitystä. Samalla tuotetiedon omistajuus ja ylläpito pitää sopia niin, että konfigurointi ja dokumentaatio pysyvät ajan tasalla. ETO-toiminnassa suositeltavaa on määritellä selkeät rajat toimitusprojektiin, mitkä osat saa tehdä ETO:na ja kuinka paljon sitä saa niissä osissa olla. On myös hyödyllistä mallintaa ETO-osuuksien suunnittelun logiikka ja järjestys esimerkiksi DRP-malleilla, jotta toimituskohtaiset osat ovat myös hallittuja ja rajattuja. Tärkeää on käytäntö, jolla toistuvat muutokset tuodaan osaksi tuoteperhettä. Lisäksi on syytä panostaa osaamisen dokumentointiin, koska päätösten perustelut, rajapintojen logiikka ja konfigurointisäännöt on tehtävä ymmärrettäviksi myös uusille tekijöille. Näin modulaarisuus ei jää yhden henkilön varaan vaan muuttuu organisaation yhteiseksi kyvykkyydeksi.

- TK1: Mitkä ovat moduloinnin mahdolliset hyödyt?

Moduloinnin keskeinen hyöty on muuntelun hallinta. Kun muuntelu keskitetään suunniteltuihin moduuleihin, koko tuote ei muutu jokaisen projektin mukana. Tarkoituksena tämän myötä on siirtyä projektitoimituksista tuotteistetumpaan tarjontaan. Tämä näkyy käytännössä parempana ennustettavuutena: eli esimerkiksi suunnittelu, myynti, hankinta ja valmistus pystyvät tukeutumaan samoihin perusratkaisuihin, ja muutokset voidaan rajata niihin kohtiin, joissa niillä on eniten asiakasarvoa. Tuotekehityksen näkökulmasta modulaarisuus lisää uudelleenkäyttöä. Kun moduulit ovat määriteltyjä ja niiden rajapinnat ovat selkeitä, aiemmin tehtyjä ratkaisuja voidaan hyödyntää uusissa varianteissa ilman, että koko kokonaisuus suunnitellaan uudelleen. Tämä voi lyhentää läpimenoaikaa, vähentää virheriskiä ja parantaa laatua, koska samoja ratkaisuja voidaan testata ja kehittää iteratiivisesti.

Toinen käytännön hyöty liittyy konfiguroitavuuteen ja tilaus-toimitusketjun sujuvuuteen. Kun tuotteen vaihtoehdot ja niiden yhdistelmäsäännöt on määritelty, asiakastarpeet voidaan muuntaa nopeammin tuotemäärittelyiksi ja dokumentaatioiksi. Tämä voi parantaa tarjosten laatua, vähentää tulkintaeroja ja tehdä toimituksista tasalaatuisempia. Hyöty realisoituu kuitenkin vasta, kun tuotetieto on riittävän yhtenäistä ja sitä ylläpidetään kurinalaisesti. Myynnin suhteen modulaarisuus, erityisesti Brownfield-

prosessi, tuottaa arvokkaat pääasiakaskysymykset, joiden avulla voidaan konfiguroida tuote ennustettavasti ja kustannustietoisesti.

Elinkaaren aikana modulaarisuus voi tukea huollettavuutta ja päivitettävyyttä. Kun kriittiset osat ovat vaihdettavia ja rajapinnat on suunniteltu järkevästi, huoltotyö voidaan kohdistaa oikeaan kohtaan, ja esimerkiksi teknologiapäivitys voidaan toteuttaa vaihtamalla vain osa kokonaisuudesta. Tämä on erityisen arvokasta ympäristöissä, joissa tuotteita käytetään pitkään ja muutostarpeita syntyy käytön aikana. Tässä työssä mainittiin vain pieni osa modulaarisuuden hyödyistä, mutta niitä löytyy vielä runsas määrä lisää. Esimerkiksi lähteistä (Pakkanen et al., 2022) ja (Pakkanen et al., 2018) löytyy lisää tietoa moduloinnin hyödyistä. Moduloinnin hyödyt ovat myös aina projektikohtaisia, joka tilanteessa ne ovat eri suuruisia ja näyttäytyvät eri organisaatioissa eri tavalla.

- TK2: Mitkä ovat moduloinnin mahdolliset haasteet?

Modulointiin liittyy myös haasteita, jotka korostuvat erityisesti silloin, kun tuotteella on laaja varianttikirjo ja paljon projektikohtaista suunnittelua. Ensimmäinen riski on väärä tai liian hienojakoinen moduulijako. Jos moduuleja syntyy liikaa tai rajapintoja määritellään runsaasti, kokonaisuuden koordinoitavuus kasvaa ja suunnittelun työ siirtyy rajapintojen sovittamiseen. Tällöin modulaarisuus ei vähennä kompleksisuutta vaan saattaa jopa lisätä sitä. Toinen haaste on alkuinvestointi. Moduulijärjestelmän rakentaminen vaatii aikaa ja resursseja, koska muun muassa jakotavan suunnittelu, rajapintojen ja arkkitehtuurin määrittely, konfigurointisäännöt sekä muutoksen läpivienti on tehtävä ennen kuin hyötyjä voidaan odottaa. Jos investointia ei sidota selkeisiin tavoitteisiin ja prioriteetteihin, modulointi voi jäädä kesken tai tuottaa osaratkaisuja, joiden ylläpito kuormittaa organisaatiota.

Kolmas haaste liittyy organisaatioon ja toimintamalliin. Modulaarinen rakenne vaatii omistajia. Jonkun täytyy päättää rajapinnoista, hallita niitä ja huolehtia, että tieto pysyy ajan tasalla. Jos vastuut ja päätöksenteko jäävät epäselviksi, syntyy helposti rinnakkaisia ratkaisuja ja projektikohtaista säätämistä. Tämä näkyy muutosvastarintana, mutta taustalla on usein myös epäselvyys siitä, mitä modulaarisuus muuttaa arjen työssä. Neljäs haaste on tiedonhallinta ja järjestelmät. Modulaarisuus tarvitsee yhteisen kielen ja yhtenäisen tuotetiedon. Käytännössä tieto jakautuu usein useaan järjestelmään, kuten CAD-, PLM- ja ERP-ympäristöihin. Jos tuotetieto ei ole yhdenmukaista tai konfigurointilogiikkaa ei saada kytkettyä arjen prosesseihin, modulaarisuus jää vähäiseksi. ETO-ympäristössä erityinen haaste on projektikohtainen suunnittelu. Projektin aikataulu voi ohjata tekemään nopeita ratkaisuja, jotka rikkovat

moduulirakennetta tai luovat uusia variantteja ilman hallintaa. Siksi tarvitaan selkeät pelisäännöt siitä, mitä saa muuttaa toimitusprojektissa, miten muutokset dokumentoidaan ja miten se palautetaan osaksi tuoteperhettä, jos se toistuu useissa toimituksissa.

- TK3: Miten Brownfield-prosessin soveltaminen käytännössä eroaa siitä, miten se on kuvattu kirjallisuudessa?

Brownfield-prosessin lähtökohta on käytännönläheinen. Yrityksellä on jo olemassa olevia tuotteita, ja tavoitteena on rakentaa niistä hallittava tuoteperhe. Alkuperäinen Brownfield-prosessi tarjoaa selkeän vaiheistuksen, jonka avulla nykytila voidaan jäsentää ja muuntaa modulaariseksi kokonaisuudeksi. Käytännön sovelluksissa prosessi on kuitenkin laajentunut, jotta se vastaisi paremmin yritysten arkea, toimitusmalleja ja jatkuvasti muuttuvia asiakastarpeita.

Yksi keskeinen kehityssuunta on hybridimodulaarisuuden huomioiminen. Aiemmin Brownfield-prosessi painottui tilanteisiin, joissa tavoiteltiin täysin konfiguroitavia tuotteita. Nykyisin tarkasteluun otetaan myös osittain konfiguroitavat tuoteperheet, joissa osa kokonaisuudesta pysyy vakiona ja osa toteutetaan projektikohtaisesti. Tämä tuo lisää haasteita rajapintojen, varianttien ja toimitustyyppien hallintaan. Samalla se avaa mahdollisuuksia, koska monien yritysten kilpailuetu perustuu juuri toimituskohtaiseen asiakasräätelöintiin. Lisäksi joissain tilanteissa muuntelun määrä voi olla niin suuri, että täysin konfiguroitava ratkaisu olisi käytännössä liian raskas ylläpitää.

Toinen selvästi korostunut muutos on muutoksen läpiviennin vahvempi kytkentä prosessiin. Pelkkä modulaarisen rakenteen suunnittelu ei riitä, jos toimintatavat eivät muutu organisaatiossa. Siksi huomio on siirtynyt yhä enemmän siihen, miten ratkaisut saadaan käyttöön arjen suunnittelussa, myynnissä, konfiguroinnissa ja toimituksissa. Tavoitteena on se, että kehitysprojekti ei jää modulointiharjoitukseksi, vaan se tuottaa pysyviä käytäntöjä ja selkeitä rooleja modulaarisen tuoteperheen ylläpitoon.

Kolmas kehityssuunta liittyy hiljaisen tiedon keräämiseen ja hyödyntämiseen. Hiljaista tietoa kertyy jatkuvasti asiakaskeskusteluissa ja yhteisessä ongelmanratkaisussa, joskus myös tiedostamatta. Sen merkitys korostuu erityisesti yrityksen kontekstin ymmärtämisessä, muuntelutarpeiden tulkinnessa sekä PSP- ja DRP-tietojen muodostamisessa. Hiljaista tietoa on pidetty tärkeänä myös alkuperäisessä prosessissa, mutta Brownfield 2.0 -ajattelussa se nostetaan aiempaa näkyvämpään rooliin ja sitä pyritään tekemään eksplisiittiseksi, jotta se olisi paremmin jaettavissa ja uudelleenkäytettävissä.

Prosessin kehittymistä kuvaa myös se, että modulaarisuutta jäsennetään aiempaa systemaattisemmin erilaisten ohjaavien periaatteiden ja rakenteellisten ratkaisujen avulla. Käytännössä tämä näkyy esimerkiksi seuraavissa teemoissa:

- Product Structuring Principles: tuoterakenteen ja jäsenysperiaatteiden sitominen yhteen, hyvien käytäntöjen sitominen tuotteeseen ja muuntelun rajoittaminen sekä hallinta.
- Muutoksenpysäytysvyöhykkeet: rajapintojen suunnittelu siten, että moduulin ei tarvitse tietää, mitä rajapinnan toisella puolella tapahtuu. Tällöin yksittäinen moduuli voi muuttua (esim. muoto ja koko) ilman, että muiden moduulien tarvitsee muuttua tai vaihtaa paikkaa.

Kehitystä on tapahtunut myös mallinnuksen ja päätöksenteon tukemisessa. GEMS- ja Dynamo-mallinnustyökalut mahdollistavat muunteluarkkitehtuurin kuvaamisen siten, että tuotteen jakotapa voidaan yhdistää muuntelutarpeisiin sekä PSP-periaatteisiin. Lisäksi rajapintoja voidaan mallintaa työkaluissa. Jokaiselle moduulille voidaan määrittää variantit ja toimitustyyppit, ja eri jakotapoja voidaan vertailla nopeasti. Tämä tekee vaihtoehtojen arvioinnista konkreettisempää ja nopeampaa.

Yksi merkittävä lisäys on Design Reasoning Patterns. Pelkkä lopullinen rakenne ei riitä, jos ei ymmärretä, miksi ratkaisu on muodostettu tietyllä tavalla. Kun suunnittelun logiikka ja päätösten järjestys kuvataan, ratkaisujen uudelleenkäyttö paranee ja riippuvuus yksittäisten asiantuntijoiden hiljaisesta tiedosta vähenee. Tämä on erityisen tärkeää tuoteperheissä, jotka elävät jatkuvasti ja joissa muutoksiin on reagoitava nopeasti. Lisäksi modulaarisuus on kytketty aiempaa tiukemmin suunnittelu- ja toimitusvirtauksiin. Modulaarisuus ei ole vain tuoterakenteessa vaan myös siinä, miten se suunnitellaan, myydään, konfiguroidaan ja toimitetaan. Kun suunnittelu- ja toimitusvaiheiden tiedon valmius tehdään näkyväksi, voidaan hallita paremmin sitä, milloin muutokset ovat vielä mahdollisia ja milloin ei. Tämä tukee erityisesti ETO-toimituksia, joissa osa ratkaisusta syntyy väistämättä projektin aikana.

Brownfield 2.0 on selvästi teoriapainotteista, koska se perustuu vakiintuneisiin käsitteisiin, kuten arkkitehtuuriin, rajapintoihin, jakotapoihin, moduuleihin ja konfigurointitietoon. Myös ajatus siitä, että tekninen rakenne ja organisaation toimintatapa kytkeytyvät toisiinsa, näkyy selvästi prosessin vaatimuksissa. Samaan aikaan Brownfield 2.0 sisältää paljon käytännön toimimista. Työkalut, työpajamaiset etenemistavat, mallipohjat ja päätösheuristiikat ovat luonteeltaan sellaisia, että ne toimivat vain, jos niitä sovelletaan oikein ja yrityksen konteksti huomioiden. Tässä

mielessä menetelmä ei ole valmis käyttöohje, vaan sen onnistuminen riippuu osaamisesta, datan laadusta ja organisaation sitoutumisesta.

Teorian ja käytännön suhde näkyy erityisesti siinä, miten rajatapa tehdään ja miten rajapintoja hallitaan. Periaatteet ovat yleispäteviä, mutta niiden tuominen konkreettisiksi moduuleiksi vaatii paljon tuotetuntemusta ja neuvottelua sidosryhmien välillä. Lisäksi tiedon mallinnus voi helposti kasvaa liian raskaaksi, jos ylläpidettävyys ei ohjaa tekemistä, ja se karsii silloin modulaarisuuden tuomia hyötyjä. Tämän vuoksi Brownfield 2.0:n perusta on vahvasti teoriassa, mutta käytännön toteutus on pitkälti asiantuntijatyötä ja organisaation muutoksen johtamista. Jos tavoitteena on vähentää riippuvuutta yksittäisestä asiantuntijasta, menetelmän rinnalle tarvitaan selkeä standardityö, koulutus ja hallintamalli. Näin samat periaatteet voidaan toistaa myös silloin, kun tiimi ja tuotteet muuttuvat.

Yhteenvedon voidaan todeta, että modulaarisuuden hyödyt ja haasteet liittyvät vahvasti toisiinsa. Samat ratkaisut, jotka parhaimmillaan vähentävät kompleksisuutta, nopeuttavat toimituksia ja lisäävät uudelleenkäyttöä, voivat heikosti toteutettuina lisätä rajapintoja, kasvattaa koordinoitutarvetta ja kuormittaa organisaatiota. Siksi modulaarisuutta ei kannata tarkastella vain teknisenä tuoterakenteen kysymyksenä vaan myös toimintamallina, joka vaikuttaa suunnitteluun, myyntiin, tiedonhallintaan ja toimitusprosessiin. Brownfield 2.0 laajentaa alkuperäistä Brownfield-prosessia erityisesti niissä käytännön tilanteissa, joissa modulointi ei ole vain valmiiden vaihtoehtojen konfigurointia vaan vaatii myös suunnittelua, tiedon jäsentämistä ja toimintatapojen kehittämistä. Mukaan on tullut vahvempi ymmärrys hybridimodulaarisuudesta, hiljaisen tiedon näkyväksi tekemisestä, muutoksen läpiviennistä sekä mallinnustyökaluista, joilla päätöksentekoa voidaan tukea konkreettisesti. Lisäksi suunnittelu- ja toimitusvirtausten huomioiminen tuo prosessiin uuden käytännöllisen näkökulman, koska se auttaa määrittämään, missä vaiheessa tieto täytyy olla valmis ja missä kohtaa muuntelua voidaan vielä hallitusti sallia.

Pohdinnan kannalta keskeinen havainto on myös se, että Brownfield 2.0:n teoriaperusta vaikuttaa vahvalta, mutta menetelmän todellinen arvo syntyy vasta soveltamisessa. Yrityskohtainen tuoteportfolio, toimitusmalli, järjestelmät ja osaaminen vaikuttavat siihen, millainen modulaarinen ratkaisu on järkevä. Tämän vuoksi onnistunut soveltaminen edellyttää selkeitä tavoitteita, sovittuja vastuita, tuotetiedon ylläpitomallia sekä käytäntöä, jolla projektitoimituksissa syntyvät toistuvat ratkaisut voidaan palauttaa osaksi hallittua tuoteperhettä. Juuri tässä näkyy myös ero teorian ja käytännön välillä. Periaatteet pysyvät samoina, mutta niiden toteutus vaatii harkintaa, priorisointia ja organisaation oppimista. Kokonaisuutena tarkasteltuna Brownfield 2.0 ei siis korvaa

alkuperäistä Brownfield-prosessia vaan täydentää ja syventää sitä. Se tuo prosessiin uusia näkökulmia ja käytännön tukirakenteita, joiden avulla modulaarisuutta voidaan soveltaa laajemmin myös vaativissa ETO- ja hybriditapauksissa. Samalla se korostaa, että modulaarisuus ei ole kertaluonteinen kehityshanke vaan jatkuvasti ylläpidettävä, ja sen toimivuus riippuu sekä rakenteellisista ratkaisuista että organisaation tavasta käyttää niitä arjessa.

Jatkossa hybridimodulaarisuuteen liittyviä teemoja olisi hyvä tarkastella tarkemmin, kuten DRP-ajattelua ja hiljaisen tiedon keräämistä, koska nämä kytkeytyvät suoraan siihen, miten modulaarisuus saadaan toimimaan osittain konfiguroitavissa tapauksissa. Tuotteistaminen on myös yksi jatkokehityksen kohde, joka olisi hyvä tuoda käsikirjaan myöhemmin. Tuotteistamisen osalta olisi hyödyllistä erotella sisäinen ja ulkoinen tuotteistaminen, koska niiden tavoitteet ja menetelmät voivat olla selvästi erilaisia.

LÄHTEET

- Adlin, N. (2021) *Formalisation of Information Flows to Support Lean Manufacturing Development in High-Variety, Low-Volume Manufacturing*. Väitöskirja. Tampere: Tampere University.
- Adlin, N., Juuti, T. and Lehtonen, T. (2022) Coordinated Property Driven Development. *Proceedings of NordDesign 2022*. doi:10.35199/norddesign2022.28.
- André, S., Elgh, F., Johansson, J. and Stolt, R. (2017) 'The design platform – a coherent platform description of heterogeneous design assets for suppliers of highly customised systems', *Journal of Engineering Design*, 28(10–12), pp. 599–626. doi:10.1080/09544828.2017.1376244.
- Alizon, F., Shooter, S.B. & Simpson, T.W. (2009) 'Assessing and improving commonality and diversity within a product family', *Research in Engineering Design*, 20(3), pp. 241–253. <https://doi.org/10.1007/s00163-009-0066-5>.
- Baldwin, C. Y. & Clark, K. B. (2000) *Design Rules: The Power of Modularity*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Bongulielmi, L., Henseler, P., Puls, C. and Meier, M. (2002) 'The K- & V-Matrix-Method in Comparison with Matrix-Based Methods Supporting Modular Product Family Architectures', in *Proceedings of NordDesign 2002*. Trondheim, Norway, 14–16 August.
- Bonvoisin, J., Halstenberg, F., Buchert, T. and Stark, R. (2016) 'A systematic literature review on modular product design', *Journal of Engineering Design*, 27(7), pp. 488–514. doi:10.1080/09544828.2016.1166482.
- Bowman, C. & Ambrosini, V. (2000) 'Value creation versus value capture: Towards a coherent definition of value in strategy', *British Journal of Management*, 11(1), pp. 1–15. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00147>.
- Colfer, L.J. & Baldwin, C.Y. 2016, 'The mirroring hypothesis: theory, evidence, and exceptions', *Industrial and Corporate Change*, vol. 25, no. 5, pp. 709–738, <https://doi.org/10.1093/icc/dtw027>.
- Dahmus, J.B., Gonzalez-Zugasti, J.P. & Otto, K.N. (2001) 'Modular product architecture', *Design Studies*, 22(5), pp. 409–424. [https://doi.org/10.1016/S0142-694X\(01\)00004-7](https://doi.org/10.1016/S0142-694X(01)00004-7).
- Danese, P. & Filippini, R. (2013) Direct and Mediated Effects of Product Modularity on Development Time and Product Performance. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 60(2), 260–271. <https://doi.org/10.1109/TEM.2012.2208268>
- Duffy, A.H.B. and Ferns, A.F. (1998) 'An analysis of design reuse benefits', in Lindemann, U., Birkhofer, H., Meerkamm, H. and Vajna, S. (eds.) *Proceedings of the 12th International Conference on Engineering Design (ICED '99)*. Design Society, pp. 799–804. ISBN 392297953X
- Engeström, Y. & Sannino, A. 2010, 'Studies of expansive learning: Foundations, findings and future challenges', *Educational Research Review*, vol. 5, no. 1, pp. 1–24, <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2009.12.002>.
- Engeström, Y. & Sannino, A. 2011, 'Discursive manifestations of contradictions in organizational change efforts: A methodological framework', *Journal of Organizational Change Management*, vol. 24, no. 3, pp. 368–387, <https://doi.org/10.1108/09534811111132758>.
- Erixon, G. (1998) *Modular Function Deployment: A Method for Product Modularisation*. Stockholm: The Royal Institute of Technology.
- Eskola, J. & Suoranta, J. (1998) *Johdatus laadulliseen tutkimukseen*. Tampere: Vastapaino.

- Fixson, S.K. (2006) 'A roadmap for product architecture costing', in Simpson, T.W., Siddique, Z. and Jiao, J. (eds.) *Product Platform and Product Family Design: Methods and Applications*. New York: Springer Science+Business Media, pp. 305–334. DOI: 10.1007/0-387-29197-0_13.
- Forza, C. & Salvador, F. (2002) 'Product configuration and systems: A review', *Industrial Marketing Management*, 31(2), pp. 163–175. [https://doi.org/10.1016/S0019-8501\(01\)00186-8](https://doi.org/10.1016/S0019-8501(01)00186-8).
- Förg, A., Stocker, J., Kreimeyer, M. and Lienkamp, M. (2014) 'Enabling modularization potentials by standardized vehicle layouts'
- Gershenson, J.K., Prasad, G.J. & Zhang, Y. (2003) Product modularity: Definitions and benefits. *Journal of Engineering Design*, 14(3), 295–313. <https://doi.org/10.1080/0954482031000091068>
- Gepp, M., Foehr, M. and Vollmar, J. (2016) 'Standardization, modularization and platform approaches in the engineer-to-order business — Review and outlook', in 2016 Annual IEEE Systems Conference (SysCon). IEEE, pp. 1–6. doi:10.1109/SYSCON.2016.7490549.
- Guo, F. and Gershenson, J.K. (2007) 'Discovering relationships between modularity and cost', *Journal of Intelligent Manufacturing*, 18(1), pp. 143–157. doi:10.1007/s10845-007-0007-y.
- Grönroos, C. (2011) 'Value co-creation in service logic: A critical analysis', *Marketing Theory*, 11(3), pp. 279–301. <https://doi.org/10.1177/1470593111408177>.
- Hackl, J., Krause, D., Otto, K.N., Windheim, M., Moon, S.K., Bursac, N. & Lachmayer, R. (2020) 'Impact of Modularity Decisions on a Firm's Economic Objectives', *Journal of Mechanical Design*, 142(4), 041403. <https://doi.org/10.1115/1.4044914>.
- Halonen, N., Lehtonen, T., Pakkanen, J., Juuti, T., Ellman, A. and Riitahuhta, A. (2014) Product Life Cycle Disposition Model. DS 77: Proceedings of the DESIGN 2014 13th International Design Conference.
- Haug, A., Shafiee, S. & Hvam, L. (2019) "The costs and benefits of product configuration projects in engineer-to-order companies", *Computers in Industry*, 105, pp. 133–142. DOI: 10.1016/j.compind.2018.11.005.
- Hirsjärvi, S. & Hurme, H. 2001. Tutkimushaastattelu: Teemahaastattelun teoria ja käytäntö. Helsinki: Helsinki University Press.
- Holmqvist, T. (2004) *Managing Product Variety through Product Architecture*. Väitöskirja. Göteborg: Chalmers University of Technology.
- Holttä, K. M. M. & Salonen, M. P. (2003) "Comparing three different modularity methods", Proceedings of ASME 2003 International Conference on Engineering Design (ICED), American Society of Mechanical Engineers, pp. 533–542.
- Jalonen, M., Ristimäki, P., Toiviainen, H., Pulkkis, A. & Lohtander, M. 2016, 'Between product development and mass production: Tensions as triggers for concept-level learning', *Journal of Workplace Learning*, vol. 28, no. 1, pp. 33–48, <https://doi.org/10.1108/JWL-04-2014-0027>.
- Jiao, J., Simpson, T.W. & Siddique, Z. (2007) 'Product family design and platform-based product development: A review', *Journal of Intelligent Manufacturing*, 18(1), pp. 5–29. <https://doi.org/10.1007/s10845-007-0003-2>.
- Juuti, T. et al. (2019) 'Empirical Study of Good, Bad and Ugly Modular Engineering Solutions in Machinery Manufacturing Industry', in Proceedings of the International Design Society. [Online]. 2019 Cambridge: Cambridge University Press. pp. 2981–2990.

Juuti, T., Lehtonen, T., Rättyä, K., Halonen, N., Vanhatalo, M. and Kujansuu, P. (2014) Design Reasoning Patterns in NPD Education Design. DS 78: Proceedings of the 16th International Conference on Engineering and Product Design Education, pp. 682-687.

Juuti, T. & Lehtonen, T. 2010, 'Design management in product development organisation - the elaboration of comprehensive design management model', teoksessa A. Dagman & R. Söderberg (toim.), Proceedings of NordDesign 2010 Conference, Göteborg, Sweden, 25–27 August 2010, pp. 65–74.

Juuti, T. (2008) Design Management of Products with Variability and Commonality. Doctoral dissertation. Tampere University of Technology.

Juuti, T. ja Lehtonen, T. (2006) 'Using multiple modular structures in delivering complex products', NordDesign 2006 Conference Proceedings.

Karhunen, V., Juuti, T. and Järvenpää, E. (2024) 'Supporting Design Reuse in Engineer-to-Order Context: A Systematic Literature Review', in Malmqvist, J., Candi, M., Sæmundsson, R.J., Byström, F. and Isaksson, O. (eds.) Proceedings of the NordDesign 2024 Conference (DS 130), Reykjavik, Iceland, 12–14 August 2024. The Design Society, pp. 521–529. doi:10.35199/NORDDESIGN2024.56.

Kirk, J. & Miller, M. L. 1986. Reliability and Validity in Qualitative Research. Beverly Hills: SAGE.

Kristensson, P., Gustafsson, A., Witell, L., 2011. Collaboration with Customers - Understanding the Effect of Customer-Company Interaction in New Product Development, in: 2011 44th Hawaii International Conference on System Sciences. Presented at the 2011 44th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS 2011), IEEE, Kauai, HI, pp. 1–9. https://doi.org/10.1109/HICSS.2011.110

Kristjansdottir, K., Shafiee, S. and Hvam, L. (2017) 'How to Identify Possible Applications of Product Configuration Systems in Engineer-to-Order Companies', International Journal of Industrial Engineering and Management, 8(3), pp. 157–165. doi:10.24867/IJIEEM-2017-3-116.

Kristjansdottir, K., Shafiee, S. and Hvam, L. (2015) 'Utilizing product configuration systems for supporting the critical parts of the engineering processes', in Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). IEEE, pp. 1777–1781. doi:10.1109/IEEM.2015.7385953.

Lau, A. K. W., Yam, R. C. M. & Tang, E. (2007) "The impacts of product modularity on competitive capabilities and performance: An empirical study", International Journal of Production Economics, 105(1), pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.ijpe.2006.02.002.

Lee, H. L. & Tang, C. S. (1997) "Modelling the costs and benefits of delayed product differentiation", Management Science, 43(1), pp. 40–53. DOI: 10.1287/mnsc.43.1.40.

Lee, W.-y., Lee, S.-h., Jin, C. ja Hyun, C.-t. (2021) 'Development of the RACI Model for Processes of the Closure Phase in Construction Programs', Sustainability, 13(4), 1806. https://doi.org/10.3390/su13041806

Lehtonen, T., Halonen, N., Pakkanen, J., Juuti, T., Huhtala, P., 2016. Challenges and Opportunities in Capturing Design Knowledge, in: Proceedings of the 10th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2015), Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer International Publishing AG, Switzerland, pp. 389–395. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27064-7_37

Lehtonen, T. & Tampereen teknillinen yliopisto. (2007) Designing modular product architecture in the new product development. Tampere: Tampere University of Technology. [online]. Available from: <http://URN.fi/URN:NBN:fi:ty-200810021062>.

Lehtonen, T. 2024. Modulaaristen tuotteiden suunnittelu. Luentokalvot. Tampereen yliopisto

- Lorenzi, S. & Di Lello, A. (2001) Product modularity theory and practice: The benefits and difficulties in implementation within a company. *International Journal of Automotive Technology and Management*, 1(4), 425–448. <https://doi.org/10.1504/IJATM.2001.000050>
- Miettinen, R. & Virkkunen, J. 2005, 'Epistemic objects, artefacts and organizational change', *Organization*, vol. 12, no. 3, pp. 437–456, <https://doi.org/10.1177/1350508405051279>.
- Mustonen, E. and Härkönen, J. (2022) 'Commercial and technical productization for design reuse in engineer-to-order business', *IEEE Transactions on Engineering Management*. Advance online publication (24 March). doi:10.1109/TEM.2022.3155791.
- Mämmelä, J. (2019) *Technology Value Mapping (TVM): Method for Designing Technology Value Capture by Visually Modelling Product Properties and Behaviours*. Väitöskirja. Tampere: Tampere University.
- Mämmelä, J., Juuti, T. and Julkunen, P. (2019) Technology Valuation Method for Supporting Knowledge Management in Technology Decisions to Gain Sustainability. *Sustainability*, 11(12), 3410. doi:10.3390/su11123410.
- O'Connor, J. T., O'Brien, W. J. & Choi, J. O. (2014) "Critical success factors and enablers for optimum and maximum industrial modularization", *Journal of Construction Engineering and Management*, 140(6), pp. 1–11. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000842.
- Pakkanen, J. 2015, *Brownfield Process: A Method for the Rationalisation of Existing Product Variety towards a Modular Product Family*, väitöskirja, Tampere University of Technology, Tampere.
- Pakkanen, J., Becker, I., Lehtonen, T. ja Juuti, T. (2012) 'Capturing the flows of the product process', teoksessa *Proceedings of the 12th International Design Conference, DESIGN 2012*, Dubrovnik, Croatia, 21–24 May 2012. Zagreb: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, s. 1557–1566.
- Pakkanen, J. et al. (2016) Achieving Benefits with Design Reuse in Manufacturing Industry. *Procedia CIRP*. [Online] 508–13.
- Pakkanen, J., Juuti, T. & Lehtonen, T. (2019) "Identifying and addressing challenges in the engineering design of modular systems – case studies in the manufacturing industry", *Journal of Engineering Design*, 30(2), pp. 32–61. DOI: 10.1080/09544828.2018.1552779.
- Pakkanen, J., Juuti, T., Lehtonen, T. & Mämmelä, J. (2022) "Why to design modular products?", *Procedia CIRP*, 109, pp. 31–36. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.210.
- Pakkanen, J., Juuti, T., Lehtonen, T., Peltonen, J., Laine, R., 2020. Conceptual model of modularisation, in: *Balancing Innovation and Operation*. Presented at the Proceedings of NordDesign 2020, The Design Society. <https://doi.org/10.35199/NORDDESIGN2020.12>
- Pakkanen, J. et al. (2020) PARTITIONING TYPES IN PRODUCT MODULARISATION. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*. [Online] 12325–2334.
- Pakkanen, J. et al. (2021a) Observations on modular product structures based on teaching product modularisation. *Procedia CIRP*. [Online] 100476–481.
- Pakkanen, J., Heikkinen, T., Adlin, N., Lehtonen, T., Mämmelä, J. and Juuti, T. (2021b) Support for Managing Partly Configurable Modular Systems. *Proceedings of the Design Society*, 1, pp. 2791-2800. doi:10.1017/pds.2021.540.
- Pakkanen, J.T., Juuti, T.S. ja Lehtonen, T.A. (2018) 'Value Creation Mechanisms in Product Variety Development', *Proceedings of the International Design Conference – DESIGN 2018*, 623–632.

- Parslov, J.F. & Mortensen, N.H. (2015) 'Interface definitions in literature: A reality check', *Concurrent Engineering*, 23(3), pp. 183–198. <https://doi.org/10.1177/1063293X15580136>.
- Parslov, J.F., 2016. *Defining Interactions and Interfaces in Engineering Design*, DCAMM Special Report. Technical University of Denmark.
- Petticrew, M. & Roberts, H. (2006) *Systematic reviews in the social sciences : a practical guide*. Malden (Mass.): Blackwell.
- Sanchez, R., Mahoney, J.T., 1996. Modularity, flexibility, and knowledge management in product and organization design. *Strateg. Manag. J.* 17, 63–76. <https://doi.org/10.1002/smj.4250171107>
- Sannino, A., Engeström, Y. & Lemos, M. 2016b, 'Formative interventions for expansive learning and transformative agency', *Journal of the Learning Sciences*, vol. 25, no. 4, pp. 599–633, <https://doi.org/10.1080/10508406.2016.1204547>.
- Sosa, M.E., Eppinger, S.D. & Rowles, C.M. (2007) 'A network approach to define modularity of product architectures', *Journal of Mechanical Design*, 129(11), pp. 1118–1129. <https://doi.org/10.1115/1.2771182>.
- Sosa, M.E., Eppinger, S.D. & Rowles, C.M. 2004, 'The misalignment of product architecture and organizational structure in complex product development', *Management Science*, vol. 50, no. 12, pp. 1674–1689, <https://doi.org/10.1287/mnsc.1040.0289>.
- Stone, R.B., Wood, K.L. & Crawford, R.H. (2000) 'A heuristic method for identifying modules for product architectures', *Design Studies*, 21(1), pp. 5–31. [https://doi.org/10.1016/S0142-694X\(99\)00003-4](https://doi.org/10.1016/S0142-694X(99)00003-4).
- Ulrich, K.T. 1995, 'The role of product architecture in the manufacturing firm', *Research Policy*, vol. 24, no. 3, pp. 419–440, [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(94\)00775-3](https://doi.org/10.1016/0048-7333(94)00775-3).
- Umeda, Y., Nonomura, A. & Tomiyama, T. (2000) "Study on life-cycle design for the post mass production paradigm", *AI EDAM*, 14(2), pp. 149–161. DOI: 10.1017/S0890060400142040
- Virkkunen, J. & Schaupp, M. 2011, 'From change to development: Expanding the concept of intervention', *Theory & Psychology*, vol. 21, no. 5, pp. 629–655, <https://doi.org/10.1177/0959354311417486>.
- Wang, P., Liu, Y., Ong, S.K. ja Nee, A.Y.C. (2014) 'Modular Design of Machine Tools to Facilitate Design for Disassembly and Remanufacturing', *Procedia CIRP*, 15, 443–448. DOI: 10.1016/j.procir.2014.06.085.

7. LIITTEET

7.1 Liite A: Käsikirjan executive summary

Käsikirjassa kuvataan, miten yritys voi kehittää tuotteitaan ja toimintatapojaan modulaarisemmiksi erityisesti silloin, kun ei lähdetä puhtaalta pöydältä eli Greenfield-tilanteesta, vaan tuotteet ovat jo olemassa eli Brownfield-tilanteesta. Käsitellään siis Jarkko Pakkasen Brownfield-prosessin nykytilaa ja sitä, miten se on kehittynyt vuosien aikana. Yleensä lähtötilanteessa yrityksen tuotteessa muuntelua on paljon, ja toimintatavat ovat muodostuneet vuosien aikana käytännön tarpeista. Käsikirjan vahvuus on siinä, että se ei käsittele modulaarisuutta vain teknisenä tuoterakennekysymyksenä vaan laajana liiketoiminnan, suunnittelun, toimituksen ja muutoksen johtamisen kokonaisuutena. Se tekee näkyväksi sen, että modulaarisuuden hyötyjä ei synny pelkästään nimeämällä tuotteesta moduuleita vaan rakentamalla järjestelmällinen tapa tunnistaa muuntelutarpeet, rajata muuntelu hallittuihin kohtiin, määrittää yhteensopivuuden ehdot ja viedä nämä käytännöt osaksi organisaation arkea. Samalla korostetaan käytännön todellisuutta, sillä kaikki yritykset eivät ole valmiita samaan tahtiin etenevään muutokseen, joten kehitystyön pitää vastata yrityksen kontekstia, kypsyystasoa ja resursseja.

Käsikirjan ensimmäisessä pääkappaleessa painotetaan liiketoimintalähtöisyyttä sekä sitä, että modulaarisuutta ei pidä tehdä itseisarvona. Tähän liittyy tärkeä ajatus "modular madness" välttämisestä. Jos modulaarisuutta tehdään ilman selkeää tavoitetta ja hyötyjä ei olla tunnistettu, lopputuloksena voi olla enemmän monimutkaisuutta kuin hallittavuutta. Samassa yhteydessä käsitellään myös asiakasyrityksen kokonaiskuvan ymmärtämistä ja modulaarisuuden kypsyystasoa eli sitä, kuinka valmis organisaatio on omaksumaan uudenlaista ajattelua ja toimintatapaa. Tässä tehdään erottelu yritystason ja yksilötason kyvykkyyden välillä. Vaikka periaatteet olisi johdossa ymmärretty, käytännön onnistuminen riippuu paljon siitä, keitä kehityshankkeessa on mukana, millaista päätösvaltaa heillä on ja miten hyvin he pystyvät ajattelemaan tuotetta geneerisellä tasolla yksittäisten toimitusten sijaan.

Toinen pääkappale, arvontuoton tunnistaminen ja pyydystäminen, kuvaa selkeästi, että modulaarisuuden hyödyt eivät synny automaattisesti vaan vasta, kun tuoterakenteeseen liittyvä tieto ja päätökset kytkeytyvät käytännön prosesseihin. Käsikirjassa avataan ero arvontuoton (potentiaalinen luominen) ja arvon pyydystämisen (hyötyjen realisoiminen) välillä: Yritys voi tehdä paljon hyvää rakenteellista kehitystä, mutta jos myynti,

suunnittelu, hankinta, tuotanto tai huolto eivät muuta toimintaansa, suuri osa hyödyistä jää paperille. Tässä luvussa esitellään myös Projektin tavoitteen asettaminen, CSL (Company Strategic Landscape) ja BIA (Business Impact Analysis) -ajattelu, joilla kehityshankkeen suunta sidotaan alusta asti liiketoiminnan tavoitteisiin. CSL on tärkeä erityisesti siksi, että se auttaa hahmottamaan yrityksen strategisen kokonaiskuvan: Mihin markkinaan ja asiakaslupaukseen pyritään, mitä kyvykkyyksiä halutaan vahvistaa ja missä kohtaa modulaarisuus voi aidosti tukea kilpailukykyä. Se toimii käytännössä yhteisenä keskustelukehityksenä johdon, myynnin ja teknisten asiantuntijoiden välillä, jolloin kehityshankkeessa ei optimoida vain yksittäistä tuotetta vaan koko toimintaa eri funktioiden välillä. BIA puolestaan on keskeinen työkalu siksi, että se pakottaa arvioimaan vaikutuksia konkreettisesti: Missä prosessin vaiheissa hyötyjä voidaan saavuttaa, kuinka suuria ne voivat olla, mitä muutoksia niiden realisoituminen edellyttää ja mitkä vaikutukset ovat nopeita verrattuna pidemmän aikavälin kehitykseen. Yhdessä CSL ja BIA auttavat tekemään näkyväksi sen, miksi modulaarisuutta tehdään, mitä sillä tavoitellaan ja miten kehitystyö kannattaa rajata niin, että se tuottaa sekä strategista että operatiivista arvoa.

Kappale Muuntelutarpeet siirtää fokuksen kysymykseen, mistä vaihtelu tuotteessa oikeasti syntyy. Muuntelutarpeiden peruskysymys on yksinkertainen ja helposti ymmärrettävä: miksi ei voida myydä vakiota? Tämän kautta lukija johdatetaan ajatukseen, että muuntelu ei ole sattumaa vaan seurausta asiakkaiden vaatimuksista, käyttöympäristöistä, säädöksistä, yrityksen omista tuotannollisista reunaehdoista sekä komponenttien yhteensopivuuksista. Luvussa muuntelutarpeet jäsennetään käytännöllisesti asiakaskysymyksiksi (Main Customer Questions, MCQ) ja valinnoiksi (Possible Customer Choices, PCC), jolloin ne voidaan myöhemmin kytkeä konfigurointiin ja tuoterakenteeseen. Gripen-työkalu tuo mukaan vahvan asiakasymmärryksen näkökulman. Tuotetta ei pitäisi kehittää vain sen perusteella, mitä yritys on tottunut tekemään vaan sen perusteella, miten asiakkaat oikeasti käyttävät tuotetta ja mistä heille syntyy arvoa. Tämä on olennaista käytännön kehityshankkeissa, joissa historiallinen rakenne ja sisäiset tottumukset helposti ohjaavat liikaa päätöksiä.

Moduloinnin teknistä puolta avataan luvuissa moduulijärjestelmä, Kapseleiden löytyminen, Product Structuring Principles, Rajapinnat, Arkkitehtuuri, Tuotteen jakotavat ja Konfigurointitieto. Näissä luvuissa tehdään selväksi, että modulaarisuus ei ole vain moduulien lista, vaan kokonainen järjestelmä, jossa muuntelu, yhteensopivuus ja uudelleenkäyttö on määritelty systemaattisesti. Moduulijärjestelmä-luvussa korostuu ajatus siitä, että yksittäinen moduuli ei ole vielä kovin hyödyllinen ilman sääntöjä ja logiikkaa, jotka tekevät moduuleista vaihdettavia ja yhteensopivia. Kapseleiden

löytyminen jatkaa tästä käytännönläheisesti. Muuntelua ei pidä päästää leviämään kaikkialle tuotteeseen vaan se on kapseloitava hallittuihin kokonaisuuksiin. Tässä näkyy yrityksen Brownfield-ajattelu, jossa tavoitteena ei ole keksiä kaikkea uudestaan vaan löytää olemassa olevasta tuotteesta tai tuoteperheestä sellaiset kapselit, joiden sisällä muuntelu voidaan pysäyttää ja hallita.

PSPt eli tuoterakenneperiaatteet ovat liiketoimintatavoitteista johdettuja sääntöjä, joilla muuntelua rajataan, vakiointia kohdistetaan oikein ja tuotteen kehitystä ohjataan yrityksen strategian suuntaan. Samalla Rajapinnat- ja Arkkitehtuuri-luvut laajentavat näkymää yksittäisistä osista koko järjestelmän toimintaan. Rajapinnoissa kyse ei ole vain mekaanisesta kiinnityksestä vaan myös suorituskyvystä, sijainnista, tilankäytöstä, tiedonsiirrosta ja muista yhteensopivuuden ehdoista. Arkkitehtuurissa taas korostuu tuotteen layout tai järjestys, jonka sisällä moduulit voivat vaihdella ilman, että koko järjestelmä hajoaa käsiin. Tuotteen jakotavat -luku tukee tätä tarjoamalla vaihtoehtoisia tapoja jäsentää tuote (esimerkiksi frame-tyyppiset, core-elementtiin perustuvat tai funktiopohjaiset jaot), mikä auttaa lukijaa ymmärtämään, ettei yhtä universaalia modulointitapaa ole olemassa. Konfigurointitieto sitoo nämä kaikki käytännön päätöksentekoon: asiakastarpeet, rajoitteet ja moduulivaihtoehdot on kuvattava niin, että ne voidaan muuttaa johdonmukaisiksi valinnoiksi myynnissä, suunnittelussa ja toimituksessa. Käsikirjassa näytetään, että konfigurointitieto on olennainen osa koko modulaarisen järjestelmän toimivuutta.

Luvuissa Hybridimodulaarisuus ja Suunnittelu- ja toimitusvirtaukset käsitellään projektitoimitusympäristöjen tarpeita. Hybridimodulaarisuuden idea on, että kaikkea ei ole pakko vakioida tai konfiguroida täysin. Sama tuote voi sisältää rinnakkain vakioituja moduuleja, konfiguroitavia osia ja aidosti toimituskohtaisesti suunniteltavia (ETO) ratkaisuja. Tämä on käytännössä erittäin realistinen ja käyttökelpoinen lähtökohta yrityksille, joiden tuotteet ovat monimutkaisia ja asiakaskohtaisia. Käsikirja painottaa, että tavoitteena ei ole poistaa kaikkea vaihtelua vaan tehdä näkyväksi se, mikä osa vaihtelusta kannattaa hallita tuoteperheen tasolla ja mikä osa on järkevää jättää projektikohtaiseksi. Suunnittelu- ja toimitusvirtaukset täydentävät tätä näkökulmaa siirtämällä huomion tuotteen rakenteesta suunnittelun ja toimituksen tietovirtoihin eli missä järjestyksessä päätöksiä tehdään, mitkä asiat riippuvat toisistaan ja miten virtausta voidaan ohjata niin, että toimitus etenee hallitusti eikä samoja asioita jouduta ratkaisemaan toistuvasti uudelleen.

Kappaleessa Modulaarisen tuotteen suunnittelutyökalut esitellään, mitä tietoteknisiä työkaluja yritykseltä löytyy moduloinnin mallinnukseen. Siinä esitellään käytännön mallinnus- ja jäsentämistyökaluja, kuten GEMS ja Dynamo, sekä GEMS-käsitelmä ja

sanasto. Luvun keskeinen viesti on, että yrityksissä on usein CAD-, PLM- ja ERP-järjestelmiä, mutta niiden välistä puuttuu juuri modulaarisen ajattelun kannalta kriittinen paikka, jossa muuntelutarpeet, geneeriset elementit, tuoterakenneperiaatteet, moduulit ja arkkitehtuurin logiikka voidaan kuvata yhtenäisesti. Tässä annetaan käsitteellinen ja käytännöllinen pohja sille, miten tietoa voidaan mallintaa niin, että sitä voidaan käyttää sekä suunnittelussa että myöhemmin päätöksenteossa ja kehityksen ohjauksessa.

Luku Siirtyminen modulaariseen toimintatapaan on yksi käsikirjan tärkeimmistä, koska siinä tunnistetaan suoraan se ongelma, johon monet kehityshankkeet kaatuvat. Tekninen ratkaisu voidaan saada valmiiksi, mutta organisaatio ei muuta toimintatapojaan. Käsikirja käsittelee modulaarisuutta tässä aidosti muutoshankkeena, joka vaatii johdon tukea, roolien selkiyttämistä, vastuuttamista, yhteisen vision rakentamista ja ihmisten osallistamista. Tämä liittyy suoraan aiemmin käsiteltyyn arvon pyydystämiseen: eli vasta kun myynti, suunnittelu, tuotanto ja muut toiminnot alkavat käyttää modulaarisen mallin mukaisia päätöksiä ja sääntöjä, syntyy mitattavia hyötyjä. Käsikirja huomioi myös yksilötason muutoksen eli sen, että ihmiset tarvitsevat aikaa, perusteluja ja käytännön tukea uuden ajattelun omaksumiseen. Tämä tekee luvusta uskottavan ja hyödyllisen erityisesti yrityksille, joilla on vahvat perinteiset toimintatavat ja paljon hiljaista tietoa.

Viimeinen pääkappale, Case esimerkit, antaa käsikirjalle konkretian ja uskottavuuden, koska se näyttää, miten aiemmin kuvatut periaatteet toimivat erilaisissa käytännön ympäristöissä. Profile ambulanssi -case havainnollistaa erittäin hyvin ympäristöä, jossa pakollista muuntelua on paljon ja jossa tuotteen rakenteeseen vaikuttavat sekä alustan valmistajan ratkaisut että asiakkaiden toimintatavat, säädökset ja käyttökohteet. Se tekee näkyväksi sen, miksi muuntelun hallinta on tällaisessa tuotteessa kriittistä ja miten modulaarinen ajattelu voi auttaa löytämään paremman tasapainon vakioinnin, asiakaskohtaisuuden ja tuotettavuuden välillä. Fastems Twin-Mill tuo mukaan toisenlaisen näkökulman kohti konfiguroitavampaa tuoteperhettä, ja Kamera-case syventää erityisesti rakennettavan, suunnittelun riippuvuuksien ja DRP-ajattelun (Design Reasoning Pattern) käyttöä. Kamera-casessa kerrotaan, että samoja periaatteita voidaan hyödyntää myös hiljaisen tiedon mallintamiseen, perehdytykseen, kehitysskenaarioiden vertailuun ja jopa kilpailijoiden toimintalogiikan analysointiin. Tämän takia case-luku toimii esimerkkinä siitä, että modulaarinen ajattelu on sovellettavissa erilaisiin tuotteisiin, kunhan se rakennetaan systemaattisesti ja sidotaan yrityksen todellisiin tavoitteisiin.

Kokonaisuutena käsikirja antaa lukijalle selkeän kuvan siitä, mitä modulaarinen kehittäminen tarkoittaa käytännössä Brownfield-ympäristössä. Ensin tunnistetaan

arvontuoton mahdollisuudet ja muuntelun lähteet, sitten rakennetaan moduulijärjestelmän logiikka (kapselit, periaatteet, rajapinnat, arkkitehtuuri, jakotapa ja konfigurointitieto). Tämän jälkeen tarvittaessa sovitetaan mukaan hybridimodulaarisuus sekä suunnittelu- ja toimitusvirtaukset, ja lopuksi varmistetaan työkalujen, fasilitoinnin ja muutosjohtamisen kautta, että ratkaisu myös juurtuu organisaatioon. Käsikirjan suurin etu on siinä, että se yhdistää teoreettiset käsitteet, käytännön menetelmät ja todelliset esimerkit tavalla, joka tekee aiheesta ymmärrettävän myös sellaiselle lukijalle, joka ei vielä tunne modulaarisuuden termistöä syvällisesti. Samalla se näyttää modulaarisuuden ennen kaikkea keinona parantaa yrityksen kykyä hallita kompleksisuutta, tehdä parempia päätöksiä ja rakentaa tuotteita, jotka palvelevat sekä asiakasta että omaa toimintaa paremmin.