

**MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU**

**MODULAARISUUS TAISTELUALUKSISSA – TAVOITTEET, HYÖDYT JA HAITAT**

Kandidaatintutkielma

Kadetti

Esa Temmes

82. merikadettikurssi

Laivastolinja

Maaliskuu 2015

## MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi <b>82. merikadettikurssi</b>	Linja <b>Laivastolinja</b>
Tekijä <b>Kadetti Esa Temmes</b>	
Tutkielman nimi <b>MODULAARISUUS TAISTELUALUKSISSA – TAVOITTEET, HYÖDYT JA HAITAT</b>	
Oppiaine johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka MPKK:n kurssikirjasto
Aika Maaliskuu 2015	Tekstisivuja 30
<b>TIIVISTELMÄ</b> <p>Sotatarvikkeiden hintojen kasvaessa ja määrärahojen pienentyessä asevoimat etsivät keinoja pitää suorituskykyään yllä vähemmillä yksiköillä ja pienemmillä resursseilla. Laivastoympäristössä eräs kiinnostusta herättänyt keino toisaalta hankehintojen kohtuullistamiseen ja toisaalta alusten suorituskyvyn monipuolistamiseen on modulaarisuuden hyödyntäminen. Taistelualusten modulaarisuus käsittää kuitenkin monenlaisia ratkaisuja, joiden tavoitteet ovat yhtä lailla moninaisia. Tässä tutkielmassa jäsennetään taistelualusten modulaarisuuden käsitteentä ja analysoidaan modulaarisuuden päätyyppien vaikutuksia sota-alusten elinkaaren eri vaiheissa niin oletettujen vaikutusten kuin toteutettujen hankkeiden kautta saatujen kokemusten valossa.</p> <p>Tutkielman tulosten perusteella modulaarisuudella on mahdollista saavuttaa kustannussäästöjä elinkaaren aikana, mutta suorituskyvyn osalta modulaarisuus ei vaikuta positiivisesti, sillä moduulilähtöinen suunnittelu rajoittaa tilankäytön ja rungon optimointia. Useiden vaikutusten osalta modulaarisuuden päätyypit poikkeavat toisistaan. Käyttövaiheen muunneltavuuteen tähtäävät laajamittaisesti modulaarisuutta hyödyntävät alusluokat eivät toistaiseksi ole onnistuneet lunastamaan niille asetettuja odotuksia, kun taas rakennus- ja konseptisuunnitteluvaiheen modulaariset ratkaisut ovat vakiinnuttaneet paikkansa osana taistelualusteollisuutta.</p>	
<b>AVAINSANAT</b> Sota-alukset, modulaarisuus, elinkaari	

# MODULAARISUUS TAISTELUALUKSISSA – TAVOITTEET, HYÖDYT JA HAITAT

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	1
2	MODULAARISUUS TEOREETTISENA KÄSITTEENÄ .....	4
2.1	Moduuli ja modulaarisuus .....	4
2.2	Modulaarisuuskäsitteet laivastoymäristössä.....	6
3	MODULAARISUUDEN VAIKUTUKSET ELINKAAREN ERI VAIHEISSA.....	12
3.1	Elinkaari tarkastelun viitekehäksenä.....	12
3.2	Rakennusmodulaarisuus .....	14
3.3	Konseptimodulaarisuus .....	16
3.4	Käyttömodulaarisuus .....	19
4	KOKEMUKSET MODULAARISISTA TAISTELUALUKSISTA .....	23
5	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	28
	LÄHTEET.....	31

## **MODULAARISUUS TAISTELUALUKSISSA – TAVOITTEET, HYÖDYT JA HAITAT**

### **KUVIOLUETTELO**

<b>Kuvio 1.</b> Systemin jakautuminen kahteen moduuliin ja niiden väliseen rajapintaan. ....	5
<b>Kuvio 2.</b> Modulaarisuuskäsitteen jaottelu taistelualuksia koskevassa kirjallisuudessa.....	9
<b>Kuvio 3.</b> Tutkielman elinkaarimalli.....	14

### **TAULUKKOLUETTELO**

<b>Taulukko 1.</b> Tutkielman määritelmien vastineita englanninkielisessä kirjallisuudessa. ....	11
<b>Taulukko 2.</b> Elinkaaren jaottelu eri kirjallisuuslähteiden elinkaarimalleissa. ....	13
<b>Taulukko 3.</b> Rakennusmodulaarisuuden tavoitteen, oletetut hyödyt ja haitat. ....	16
<b>Taulukko 4.</b> Konseptimodulaarisuuden tavoitteen, oletetut hyödyt ja haitat. ....	18
<b>Taulukko 5.</b> Käyttömodulaarisuuden tavoitteen, oletetut hyödyt ja haitat. ....	22
<b>Taulukko 6.</b> Modulaarisuuden vaikutukset elinkaaren aikana.....	28

## MODULAARISUUS TAISTELUALUKSISSA – TAVOITTEET, HYÖDYT JA HAITAT

### 1 JOHDANTO

Puolustustarvikkeiden hintojen yleinen kasvukehitys on viime vuosikymmeninä ollut merkittävää, viimeaikaisten arvioiden vaihdellessa 2–10 % vuotuisen nousun välillä [1, s. 117–118]. Laivastohankintojen osalta hintakehitys on ollut vastaavan kaltaista. Esimerkiksi Yhdysvaltojen laivastohankinnoista tehdyn tutkimuksen mukaan käyttötarkoitukseltaan vastaavien alusten hankintahinnat kasvoivat 50 % 1990-luvun alusta 2000-luvun alkupuolelle. 1960-luvulta reaalista kasvua havaittiin jopa 400 %. [2, s. 6–7].

Asejärjestelmien ja -lavettien hankintahintojen kasvulle on esitetty monenlaisia syitä. Eräs keskeinen havainto liittyy yleismaailmallisesti pieneneviin puolustusbudjetteihin. Määrärahojen ollessa vähäisiä joudutaan järjestelmien kokonaisuuttakaan pienentämään. Pienemmät tuotantomäärät taas vähentävät tuotannon skaalaetuja lisäten siten yksikkökustannuksia [3, s. 4]. Toisaalta valtiot haluavat säilyttää asevoimiensa suorituskyvyn suhteessa kilpaileviin asevoimiin, ja tämä yhdessä pienenevien yksikkömäärien kanssa tarkoittaa panostamista teknisesti mahdollisimman edistyneisiin järjestelmiin [1, s. 119–121]. Panostaminen pieneen määrään huipputekniikkaa edistää edelleen nousevaa hintakehitystä.

Eräänä ratkaisuna hintakehityksen aiheuttamiin haasteisiin on esitetty uusien asejärjestelmien ja -lavettien suunnittelua aiempaa laajempaan tehtäväkenttään soveltuviksi. Samalla teknologian nopea kehittyminen lisää tarvetta helpolle päivitettävyydelle. Sotatekninen arvio ja ennuste 2025 nostaakin muunneltavuuden keskeiseksi tulevaisuuden trendiksi puhuttaessa yhtä lailla asejärjestelmistä ja -laveteista yleensä [4, s. 215], kuin myös sota-aluksista [4, s. 330].

Eräs laajasti huomiota herättänyt keino pyrkimyksessä taistelualusten edullisuuteen ja monikäyttöisyyteen on modulaarisuus. Modularisointi eri muodoissaan on mukana uusien ja tulevien alustyyppien suunnitteluprosesseissa esimerkiksi Iso-Britanniassa (Type 45 -hävittäjä ja Type 26 -fregatti), Tanskassa (Absalon- ja Iver Huitfeldt -luokan fregatit), Yhdysvalloissa (Littoral Combat Ship ja DDG-1000), Kandassa (Single Class Surface Combatant -projekti), Australiassa (Offshore Combatant Vessel -projekti), sekä useissa valtioissa, jotka ovat

hankkineet Blohm+Voss-telakan modulaarisuutta hyödyntäviä MEKO-, tai Damen Schelde-telakan SIGMA-aluksia.

Modulaarisuus taistelualusympäristössä on kuitenkin huomattavan laaja-alainen ja monitulkintainen käsite. Laivastohankintojen tulevaisuutta käsittelevissä lähteissä mainitaan useasti alusten tehtäväkohtainen muunneltavuus, jolla tavoitellaan yksittäisen alusluokan muuntautuvuutta monenlaisiin tehtäviin ja siten mahdollisuutta täyttää tehtäväkenttä pienemmällä määrällä aluksia [2, s. 8–9; 4, s. 364; 5, s. 371]. Toisaalta kirjallisuudessa mainitaan modulaarisuuden tavoitteeksi aluksen elinkaaren aikaisten muutosten helpottaminen, sekä tehtäväkentän muutoksien aiheuttamien haasteiden vähentäminen ja siten tehokkaan käyttöön pidentäminen [6, s. 2; 2, s. 8]. Monissa yhteyksissä puhutaan lisäksi modulaarisesta rakennustavasta tai rakenteesta [7; 8]. Englanninkielisessä kirjallisuudessa käytetään yleisesti muun muassa termejä *modular construction*, *modular structure*, *modular design*, *modular capability*, *mission modularity*, *modular reconfigurable space* ja *modular open architecture* kuvaamaan taistelualusten eriasteista modularisointia.

Modularisoinnin hyödyntämisellä saavutettavat edut ovat kirjallisuuden perusteella yhtä moninaiset kuin käsite itse. Edellisessä kappaleessa mainittujen tavoitteiden rinnalla kirjallisuudessa mainitaan modulaarisuuden tuottavan kustannussäästöjä niin hankinta- ja rakennusvaiheessa [7], alusten huoltamisessa [9], kuin perusparannuksessa ja jopa hylkäysvaiheessa [8]. Eri kirjoittajien näkemykset modulaarisuuden eduista kuitenkin vaihtelevat melko voimakkaasti. Käsitteen laajuuden ja monitulkintaisuuden valossa on ymmärrettävää, että myös arvioidut vaikutukset ovat moninaisia, vaihtelevia ja jopa ristiriitaisia.

Taistelualusten modularisoinnin hyötyjen ja mahdollisten haittojen ymmärtäminen ja kartoittaminen edellyttää käsitteen ja sen ympärille syntyneen alakäsitteistön jäsentämistä. Lisäksi on selvítettävä ne perustavoitteet, joiden nojalla moduuliratkaisuja hyödyntävän taistelualuksen hankintaan päädytään. Kun tiedetään, mitä hankkeessa tehdään ja miksi näin tehdään, luodaan edellytykset myös hankkeen onnistumisen arvioinnille. Tässä tutkielmassa tavoitteena on luoda aikaisemman tutkimuksen pohjalta selväpiirteinen kehys erilaisten modulaaristen ratkaisuiden tarkasteluun taistelualushankkeissa ja tutkia sen pohjalta modulaarisuuden oletettuja ja toteutuneita hyötyjä sekä haittoja.

Kotimaisessa kirjallisuudessa taistelualusten modulaarisuutta on käsitelty melko niukasti. Saksinen on tutkinut modulaarisuuden käsitettä ja esitellyt tältä pohjalta keskeisiä modulaarisia taistelualuksia. Hän rajaa kuitenkin tarkastelunsa taistelunjohtojärjestelmän tai

taistelujärjestelmän modulaarisuuteen ja käytännössä lähinnä aluksen muunneltavuuteen tehtävän mukaan operatiivisen käyttövaiheen aikana. [10, s. 7–11]. Tämä rajaus on suorituskykykeskeinen, eikä täysin sovellu tämän tutkielman tarpeisiin, sillä näin rajataan merkittävä osa muussa lähdekirjallisuudessa käsitellyjä modulaarisuuden muotoja tarkastelun ulkopuolelle. Saksinen ei myöskään käsittele järjestelmällisesti modulaarisuuden tavoitteita ja vaikutuksia, vaan painottaa rajauksensa mukaisen modulaarisuuskäsitteen yleistä tarkastelua esimerkkien kautta. Saksisen lisäksi modulaarisuutta on sivunnut Harras [11], mutta vain taustatietona Yhdysvaltain LCS-alushankkeen tarkastelulle.

Tässä tutkielmassa tarkastellaan kirjallisuustutkimuksen ja tuotesuunnittelun teorioiden pohjalta modulaarisuuden eri osa-alueiden käyttöä ja käytettävyyttä taistelualuksilla. Tutkielman pääkysymyksenä on:

- Mitä mahdollisuuksia ja haasteita modulaarisuuden hyödyntämiseen liittyy taistelualuksissa?

Tutkielman pääkysymystä tukevat apukysymykset ovat:

- Mitä modulaarisuudella tarkoitetaan taistelualusympäristössä?
- Mitä etuja modulaarisuudella tavoitellaan taistelualuksen elinkaaren eri vaiheissa?
- Minkälaisia kokemuksia toteutetuista modulaarisuutta hyödyntävistä taistelualushankkeista on saatu?

Tutkielma rakentuu seuraavasti: Luvussa kaksi muodostetaan taistelualusten tarkasteluun soveltuva modulaarisuuden alakäsitteistö. Modulaarisuutta tarkastellaan ensin yleisellä tasolla tuotantoteorian näkökulmasta, jonka jälkeen analysoidaan taistelualuksia koskevan kirjallisuuden modulaarisuuskäsitteistöä teorian kautta. Kolmannessa luvussa esitellään modulaarisuus osana aluksen elinkaarta. Luvussa luodaan viitekehys modulaarisuuskäsitteistön ja elinkaaren vaiheiden tarkasteluun, ja tämän viitekehysten pohjalta esitellään alusten modularisoinnilla tavoiteltavia etuja ja odotettuja haittoja. Neljännessä luvussa käsitellään alushankkeista saatuja kokemuksia modulaaristen ratkaisujen toimivuuden ja kustannustehokkuuden kannalta, ja viidennessä luvussa esitetään tutkielman keskeiset johtopäätökset.

## 2 MODULAARISUUS TEOREETTISENA KÄSITTEENÄ

Tämän luvun tarkoitus on moduuli- ja modulaarisuuskäsitteiden avaaminen, sekä käsitteentän analysointi modularisuuden eri merkitysten kannalta. Koska modulaarisuuden käsitteistö on laaja ja monimuotoinen, muodostetaan tutkielmassa käytettävä modulaarisuuden jaottelu perusteellisesti yleiseltä tasolta aloittaen. Modulaarisuutta tarkastellaan ensin tuotantoteoreettiselta näkökulmalta, josta edetään asteittain kohti taistelualusympäristössä käytettyä käsitteistöä. Luvussa analysoidaan käytetyille ilmaisuille ja alakäsitteille annettuja merkityksiä ja niissä esiintyviä eroja, ja tämän analyysin pohjalta luodaan tutkielmaa varten taistelualusten modulaarisuutta jäsentävä käsitteistö.

### 2.1 Moduuli ja modulaarisuus

Moduulin määritelmät jopa yleisellä ja abstraktilla tasolla ovat kohtalaisen vaihtelevia, eikä tämän tutkielman puitteissa ole mielekästä esitellä niitä laajasti. Määritelmät eroavat merkittävästi riippuen tarkasteltavasta tieteenalasta, käsitteen ollessa osa niin kognitiivisten tieteiden, tietotekniikan kuin verkostoteorioidenkin ammattisanastoa. Vaikka erikoisalasta riippumatta modulaarisuuskäsitteet sisältävät tiettyjä yhtäläisyyksiä, on tarkoituksenmukaista rajata analysointi vain tutkielman kannalta oleellisiin määritelmiin. Tämän tekstin puitteissa keskiöön nousee tuotantoteoreettinen näkemys modulaarisuudesta, jolloin taistelualusta tarkastellaan laiva- ja puolustusteollisuuden lopputuotteena.

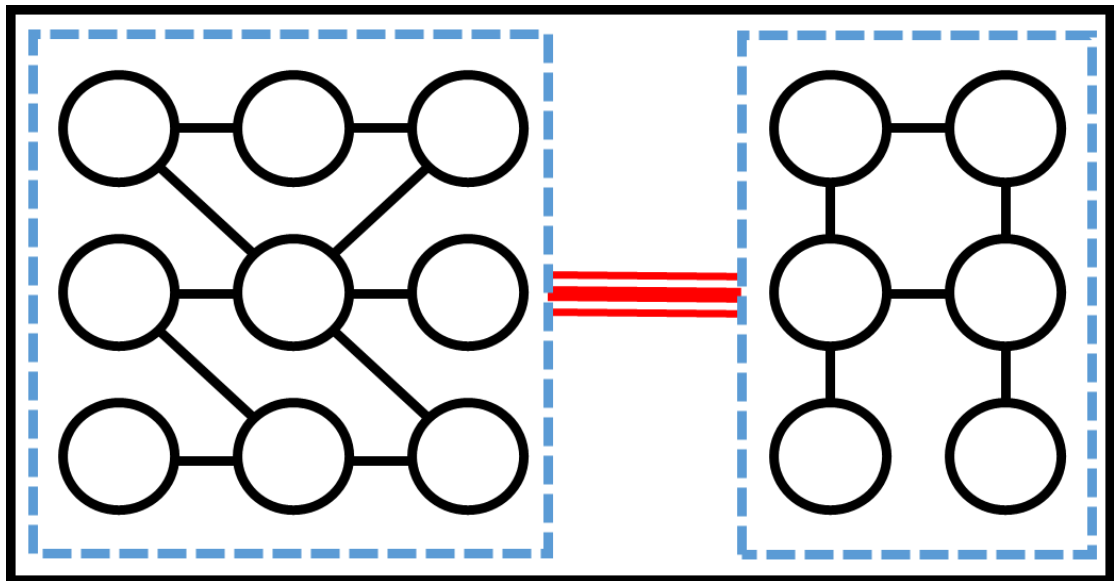
Jopa yksittäisen tieteenalan piirissä käsite saa monimuotoisia tulkintoja, joita esittelee melko kattavasti esimerkiksi Katja Hölttä-Otton väitöskirja [12, s. 26–31]. Tässä tutkielmassa lähtökohtana toimivat seuraavat rinnakkaiset määritelmät [13, s. 63–64]:

1. *Moduuli on yksikkö, jonka rakenneosat ovat vahvasti yhteydessä toisiinsa ja suhteellisen heikosti yhteydessä muiden yksiköiden elementteihin.*
2. *Kompleksinen systeemi voidaan jaotella pienempiin yksiköihin, joita voidaan tarkastella erikseen. Kompleksisuuden saavuttaessa tietyn raja-arvon voidaan kompleksisuus eristää määrittämällä sille abstraktio, jolla on yksinkertainen rajapinta, ja tämä abstraktio sisäistää elementin kompleksisuuden. Rajapinta taas määrittää elementin vuorovaikutuksen laajemman systeemin kanssa.*

Nämä teoreettiset määritelmät kuvaavat moduulia hyvin yleisellä ja abstraktilla tavalla, mutta sisältävät kolme keskeistä moduulin piirrettä. Ensinnäkin moduuli on suuremmasta kokonaisuudesta eristetty osakokonaisuus, johon yksinkertaistetaan tietyt komponentit. Toiseksi nämä komponentit ovat yhteydessä toisiinsa vahvemmin kuin muuhun systeemiin,



toisin sanoen ne muodostavat yhteyksien kokonaisuuden. Kolmanneksi moduulilla on yksinkertainen rajapinta, joka määrittää sen yhteyden laajempaan systeemiin. Määritelmän mukainen kuvaus systeemin jakautumisesta moduuleihin on esitetty kuviossa 1.



**Kuvio 1.** Systeemin jakautuminen kahteen moduuliin ja niiden väliseen rajapintaan.

Edellä esitetty moduulin määritelmä on vielä varsin abstrakti. Yleisesti tutkittaessa modulaarisuutta tuotantoteorian valossa halutaan myös korostaa moduulin tehtävää osana kokonaissysteemiä. Moduuli ei ole vain keskinäisten yhteyksien kimppu, vaan sen komponentit yhteyksineen luovat jonkin loogisen tai toiminnallisen kokonaisuuden. [14, s. 9]. Hölttä-Otto korostaa tämän lisäksi myös sitä, että osakokonaisuuden muodostavaa moduulia voidaan myös kehittää tai muokata itsenäisenä yksikkönä [12, s. 27]. Keskeistä tuotantoteoreettisessa moduulikuvauksessa on lisäksi mahdollisuus muokata kokonaissysteemiä yksittäisiä moduuleita vaihtamalla [15, s. 14]. Näillä lisämääritelmillä kuva moduulista tarkentuu yksiköksi, joka tuottaa itsenäisesti tietyn lopputuotteen tai toiminnon laajemmalle systeemille, ja jonka päivitys tai vaihtaminen toiseen moduuliin ovat mahdollisia kajoamatta systeemin toiminnallisuuteen muilta osin.

Modulaarinen systeemiarkkitehtuuri tarkoittaa yksinkertaisesti moduuleista koostuvaa systeemiä. Ideaalinen modulaarinen arkkitehtuuri koostuu ainoastaan loogisista osakokonaisuuksista, joiden komponentit eivät ole yhteydessä toisiinsa yli moduulirajojen [15, s. 14–15]. Modulaarisen systeemiarkkitehtuurin vastakohtana toimii integroitu arkkitehtuuri, jossa yksittäisten komponenttien väliset yhteydet ja riippuvuussuhteet ovat monimutkaisia. Todellisuudessa molemmat ääripäät ovat harvinaisia, ja useimmat systeemit ovat arkkitehtuuriltaan jossain täysin modulaarisen ja täysin integroidun välillä. [12, s. 28].

Huomionarvoista modulaarisuuden tuotantoteoreettisissa tulkinnoissa on se, että niissä ei yleensä oteta kantaa moduulien vaihdettavuuteen tuotteen kokoonpanon jälkeen. Tämä selittyy sillä, että tuotantoteorian kannalta keskeisin kiinnostuksen kohde rajoittuu tuotteen valmistajan näkökulmaan. Edellä mainittujen määritelmien perusteella voidaan kuitenkin käänteisesti todeta, että komponenttien vaihdettavuus tuotteen käyttövaiheessa edellyttää tietynasteista modulaarista rakennetta – osakokonaisuuden on oltava riittävän itsenäinen niin fyysisesti, toiminnallisesti, kuin rajapintansa puolesta, jotta vaihto toiseen samanlaiseen tai erilaiseen osakokonaisuuteen on mahdollista.

Modulaarisuuteen tuotekehityksessä liitetään kirjallisuudessa monia hyötyä. Keskeisenä etuna mainitaan mahdollisuus monipuoliseen tuotevalikoimaan tuotannon skaalaedut säilyttäen, sillä erilaistetuilla tuotteilla on yhteinen tuotealusta ja samaa moduulivalikoimaa voidaan hyödyntää useassa eri tuotteessa. Toisaalta modulaarinen arkkitehtuuri saattaa vaatia enemmän suunnittelua ja heikentää tuotteen tehokkuutta, moduulien harvoin ollessa räätälöityjä juuri kyseiselle tuotteelle [12, s. 29]. Edellä mainitun perusteella voidaankin yksinkertaistaen sanoa modulaarisen tuotteen olevan monipuolinen ja joustava, integroidun tuotteen ollessa tiettyyn tarkoitukseen mahdollisimman tehokas.

## 2.2 Modulaarisuuskäsitteet laivastoympäristössä

Edellä esitetyn modulaarisuuden yleisen teorian perusteella taistelualukset hyödyntävät nykyisellään laajasti modulaarista teknologiaa. Esimerkiksi nykyaikaiset merenkulkulaitteet muodostavat modulaarisen kokonaisuuden, jossa sensorimoduulit tuottavat tietoa NMEA-rajapintaan näyttö- ja hallintalaitteiden hyödynnettäväksi. Jokainen sensori- ja laitemoduuli muodostaa oman toiminnallisen yksikkönsä: mikään tutkan osakomponentti ei osallistu kaikuluotaimen tiedon tuottamiseen. Merenkulkulaitteistoon voi myös lisätä ja siitä voi poistaa yksiköitä, kuten näyttölaitteita tai sensoreita, ilman että järjestelmä menettää perusominaisuutensa. Samalla tavoin voidaan suurinta osaa aluksen järjestelmästä, aseista, sensoreista, sekä konehuoneen ja laitetilojen laitteistoista pitää modulaarisina osakokonaisuuksina. Tällainen modulaarisuus rajautuu kuitenkin tutkielman tarkastelun ulkopuolelle kahdesta syystä: Ensinnäkin kyseessä ovat yksittäiset laitteet, tutkielmassa keskityttäessä alustason tarkasteluun. Toiseksi useimpien tällaisten osakokonaisuuksien tapauksessa modulaarinen toteutus on ainoa vaihtoehto – järjestelmiä ei rakenneta aluksen mukana, vaan hankitaan asennusvalmiina. Siviilimerenkulun alalla on jonkin verran tarkasteltu erilaisten modulaaristen laitteistokokonaisuuksien hyödyntämistä [16; 17; 18], mutta tässä tutkielmassa keskitytään ennen muuta taistelualusympäristöön.

Taistelualuksia käsittelevässä kirjallisuudessa modulaarisuuden käsitteellä viitataan moniin erityyppisiin ratkaisuihin. Nämä kaikki voidaan yleisen teorian nojalla lukea modulaarisuudeksi, mutta niiden välillä on myös selkeitä eroja muun muassa siinä, mihin vaiheeseen aluksen elinkaarta modulaarisuus vaikuttaa. Tutkielman tavoitteiden kannalta on tärkeää jakaa modulaariset ratkaisut kategorioihin, jotta tavoitteiden, hyötyjen ja haittojen analysointi olisi mahdollisimman tehokasta. Tästä syystä tarkastellaan seuraavaksi sotaluusten modulaarisuutta käsitelleessä kirjallisuudessa esitettyjä modulaarisuuden alakäsitteitä, luodaan niiden perusteella yleiskuva modulaarisuuden kentästä taistelualusympäristössä ja rakennetaan viitekehys tutkielmassa tehtävää modularisoinnin analyysia varten. Käsitteistö kirjallisuudessa on monenkirjava, sisältäen eri nimityksiä enemmän tai vähemmän identtisiä käsitteistä. Luvun lopussa esitetään tutkielman käsitteistön vertautuvuus eri lähteissä esiintyviin termeihin.

MacKenzie ja Tuteja jaottelevat tekstissään taistelualusten modulaariset ratkaisut kahteen osaan:

- Modulaarinen rakennustapa (*modular construction*)
- Modulaarinen suorituskyky (*modular capability*)

Modulaarinen rakennustapa heidän kirjoituksessaan tarkoittaa rakennusprosessia, jossa alus jaetaan erillisinä rakennettaviin moduuleihin, jotka asennetaan yhteen vasta aivan rakennuksen loppuvaiheessa. Tähän käsitteeseen sisällytetään myös ajatus erilaistetun alusperheen muodostamisen osittain samojen runkomoduulien ympärille – esimerkiksi siten, että keula- ja perämoduulit ovat kaikissa aluksissa samoja erilaistettujen elementtien sijoituessa keskilaivamoduuleihin. Modulaarinen suorituskyky heidän määritelmässään taas tarkoittaa nopeasti vaihdettavia plug and play -tyyppisiä suorituskykymoduuleja, joilla aluksen toimintakykyä voidaan mukauttaa tehtävän vaatimuksiin sopivaksi. [8, s. 3]

Brekke käyttää tekstissään yksityiskohtaisempaa jaottelua:

- Modulaarinen rakennustapa (*modular construction*)
- Modulaarinen aluskonsepti (*modular design*)
- Modulaarinen suorituskyky (*modular operation*)
  - Plug and play -tyyppinen rajapinta, nopea moduulien vaihdettavuus
  - Plug and play -tyyppinen rajapinta, hidas moduulien vaihdettavuus
  - Modulaarinen monikäyttötila (esimerkiksi helikopteri- tai AUV-hangaari)

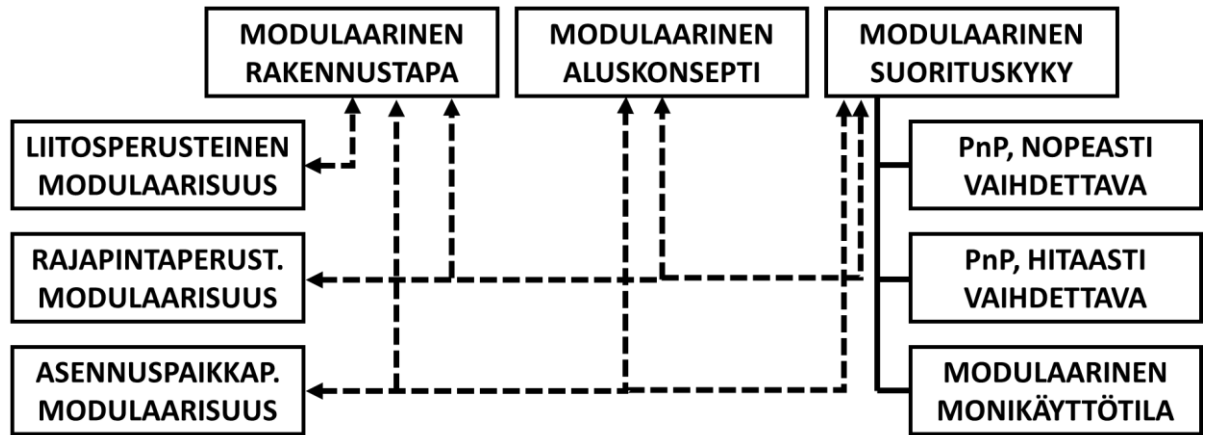
Brekke sisällyttää molemmat edellä mainitut (rakennustapa ja suorituskyky) omaan käsitteistöönsä, mutta lisää vielä yhden, modulaarisen aluskonseptin. Tällä tarkoitetaan käytännössä modulaarisesti muunneltavaa yhteen alusalustaan pohjautuvaa tuoteperhettä, jonka vaihtoehtoisista moduuliyhdistelmistä valiten tilaaja voi räätälöidä omiin tarpeisiinsa soveltuvan aluksen. Täten voidaan katsoa Brekken jakavan MacKenzien ja Tutejan määrittelemän modulaarisen rakennustavan kahteen osaan, toisen korostaessa rakennusprosessia ja toisen tuoteperheajattelua. Lisäksi artikkelissa tarkennetaan modulaarisen suorituskyvyn määritelmää alakäsitteillä. [19, s. 5–7]. Samaa alajakoa käyttää tekstissään myös Glanville [9, s. 2].

Edellisten määritelmien rinnalle on kirjallisuudessa esitetty myös alakäsitettä taisteluverkoston modulaarisuudesta. Sillä viitataan Yhdysvaltain verkostoituneen sodankäynnin ajatukseen taistelualuksesta ylemmän johtoportaan suorituskykymoduulina [20, s. 4; 2, s. 9]. Tämä määritelmä ei kuitenkaan sovellu erityisen hyvin tutkielman tarpeisiin, sillä päätavoitteena on taistelualustason modulaarisuuden tarkastelu. Erikstad [16, s. 42–48] mainitsee modulaarisen rakennustavan, aluskonseptin ja suorituskyvyn rinnalla myös aluksen laitteiston modulaarisuuden. Tällä viitataan lähinnä koneikko- ja laitteistoratkaisuihin. Ominaisuuksiltaan ja vaikutuksiltaan tällainen modulaarisuus on verrattavissa suorituskyvyn modulaarisuuteen: moduuliasenteinen laitteisto on samoilla periaatteilla suhteellisen helposti vaihdettavissa toiseen. Tästä syystä myös laitteiston modulaarisuus alakäsitteenä rajataan tutkielman viitekehysten ulkopuolelle.

Erikstad esittelee tekstissään myös toisen jaottelun modulaarisuudelle aluksissa:

- Asennuspaikkakohtainen modulaarisuus (*slot modularity*)
- Rajapintaperusteinen modulaarisuus (*bus modularity*)
- Liitosperusteinen modulaarisuus (*sectional modularity*)

Asennuspaikkakohtaisessa modulaarisuudessa moduulien suunnittelua ja käyttöä rajoittavat ensisijaisesti asennuspaikan fyysiset mitat. Rajapintaperusteinen modulaarisuus taas viittaa moduuleihin, joiden suunnittelua määrittää lähinnä standardisoitu liityntärajpinta alustan ja moduulin välillä. Liitosperusteinen modulaarisuus viittaa moduuleihin, jotka eivät ensisijaisesti kytkeydy alustaan, vaan suoraan toisiin moduuleihin. Tästä esimerkkeinä toimivat esimerkiksi putkisto- ja LVIS-infrastruktuurit. [16, s. 19–22].



**Kuvio 2.** Modulaarisuuskäsitteen jaottelu taistelualuksia koskevassa kirjallisuudessa.

Modulaarisuuskäsitteen koko kuva taistelualusympäristössä on esitetty kuviossa 2. Kirjallisuudessa useimmiten esiintyvä alajaottelu jakaa taistelualuksen modulaarisuuden kolmeen pääryhmään: modulaariseen rakennustapaan, aluskonseptiin ja suorituskykyyn. Osassa kirjallisista lähteistä modulaarinen suorituskyky on edelleen jaoteltu alakäsitteisiin. Alakäsitejaossa on huomioitu suorituskykymoduulien asennuksen ja vaihdon helppous sekä lisätty rinnalle modulaarinen monikäyttötila. Kirjallisuudessa ei kuitenkaan ole määritelty mihin nopean ja hitaan asennuksen raja vedetään, ja siitä syystä jako jää keinotekoiseksi. Monikäyttötiloja taas löytyy lähes jokaisesta aluksesta muodossa tai toisessa (esimerkiksi helikopteri- tai AUV-hangaarit) selkeän jaon modulaarisen ja ei-modulaarisen monikäyttötilan ollessa mahdotonta.

Rinnakkainen yläkäsitteen jaottelu on jako liitos-, rajapinta- ja asennuspaikkaperusteiseen modulaarisuuteen. On kuitenkin huomattava, että tämä jako perustuu lähinnä moduulin suunnittelun reunaehtoihin – muotoiluun tai liitäntöihin – kuin toiminta-ajatukseen ja -perusteisiin. Liitosperusteinen modulaarisuus on muodossa tai toisessa joka tapauksessa läsnä aluksen LVIS-infrastruktuurissa, joten sen tarkastelu ei tässä tutkielmassa ole mielekäästä. Rajapinta- ja asennuspaikkaperusteisen modulaarisuuden erojen tarkastelu taas on vaikeaa, sillä käytännössä jokaisen moduulityypin suunnittelua rajoittaa tavalla tai toisella sekä liitosrajapinta, että fyysinen asennuspaikka.

Modulaarinen suorituskyky on kirjallisuudessa melko yhtenevästi määritelty ja käytetty käsite, jolla tarkoitetaan nimenomaan käyttövaiheen muunneltavuutta vaihdettavien moduulein. Monissa lähteissä käsitellään vain tätä osa-aluetta, jolloin myös saatetaan yleistäen käyttää käyttövaiheen muunneltavuudesta modulaarisuuden yläkäsitettä. Modulaarisen rakennustavan ja aluskonseptin välillä on enemmän tulkintaeroja etenkin näiden kahden välisen rajan määrittämisessä. Useimmiten modulaarisella rakennustavalla viitataan aluksen rakentamiseen lohkoissa, mutta joissain lähteissä (esim. [6]) tähän lisätään myös räätälöityjen alusten

toteuttaminen osittain eriytetyillä runkolohkoilla. Kuitenkin tyypillisempää on määritellä yhteisten runko-osien ja osajärjestelmien sekä valinnaisten moduulien yhdisteleminen modulaariseksi aluskonseptiksi. Lisäksi kirjallisuudessa on havainnoitu, että modulaarisen aluskonseptin käsitteeseen voidaan sisällyttää myös samanlaisen moduulijärjestelmän hyödyntäminen eri alusluokissa [21, s. 2] – kysymyksessä on saman asian tarkastelu eri näkökulmasta.

Edellä mainituin perustein on tässä tutkielmassa päädytty jakamaan taistelualusten modulaarisuuskäsite kolmeen alakäsitteeseen: modulaariseen rakennustapaan, modulaariseen aluskonseptiin ja modulaariseen suorituskykyyn. Nämä määritellään seuraavalla tavalla:

### **Modulaarinen rakennustapa eli *rakennusmodulaarisuus***

*Taistelualuskokonaisuus rakennetaan moduuleittain. Tämä tarkoittaa aluksen jakamista useaan runkolohkoon tai tilamoduuliin, jotka rakennetaan mahdollisimman pitkälle erillisinä, eri tuotantolinjoilla ja jopa eri telakoilla. Modulaarinen rakennustapa edellyttää laitteiston, infrastruktuurin ja järjestelmien sijoittelussa moduulijaon huomiointia, mutta ei edellytä niiden osalta modulaarisuutta.*

### **Modulaarinen aluskonsepti, eli *konseptimodulaarisuus***

*Taistelualuksen perusrakenne on suunniteltu siten, että se mahdollistaa useiden alusvarianttien rakentamisen. Eriyttämisvaihtoehdot on toteutettu valinnaisilla moduuleilla, joihin on sijoitettu valittujen järjestelmien vaatimat komponentit. Vaikka alusperheen variointi toteutetaan vaihtoehtoisin moduulein, ei konseptimodulaarisuus edellytä moduulien yksinkertaista ja nopeaa vaihdettavuutta käyttövaiheen aikana. Käänteinen lähestymistapa konseptimodulaarisuuteen on saman moduuliarkkitehtuurin käyttö useissa eri alusluokissa.*

### **Modulaarinen suorituskyky, eli *käyttömodulaarisuus***

*Taistelualuksen suorituskyky on kokonaan tai osittain asennettu kokonsa ja rajapintansa puolesta yhtenäisiin yksiköihin. Näitä yksiköitä voidaan vaihtaa verraten helposti ja lyhyessä ajassa, ja tällä tavalla mukauttaa alusta käyttövaiheen aikana. Keskeistä on, että käyttäjä kykenee itse mukauttamaan aluksen suorituskykyä moduuleita vaihtamalla.*

Käsitteistö on luotu tätä tutkielmaa varten, mutta se perustuu vahvasti kirjallisuudessa käytettyihin alakäsitejakoihin ja on siksi varsin yleispätevä. Vertailtavuuden helpottamiseksi on taulukossa 1 esitetty tutkielman modulaarisuuskäsitteistön tyypillisimpiä vastinpareja englanninkielisessä kirjallisuudessa. Terminologian käyttö kirjallisuudessa ei ole kaikilta osin

yhteneväistä tai yksiselitteistä – sama käsite voi saada eri lähteissä eri merkityksiä, eikä käsitteitä useinkaan ole tarkkaan määritelty. Tästä syystä tutkielmassa keskeisessä osassa on myös lähteiden käsitteistön käytön tulkinta.

<b>Rakennusmodulaarisuus</b>	<b>Konseptimodulaarisuus</b>	<b>Käyttömodulaarisuus</b>
<i>Construction modularity Hull modularity Modular production</i>	<i>Concept modularity Design modularity Modular configuration Modular open systems appr. Hull modularity Modular production</i>	<i>Modular capability Modular operation Mission modularity Modular open systems appr.</i>

**Taulukko 1.** Tutkielman määritelmien vastineita englanninkielisessä kirjallisuudessa.

Modulaarisuuden jako edelleen rakennus-, konsepti- ja käyttömodulaarisuuteen pyrkii ilmentämään keskeisiä eroja, joita eri lähteissä esiintyvissä modulaarisuuden käsitteissä ilmenee. Jo nimiensä ja määritelmiensä perusteella voidaan havaita näiden alakäsitteiden päähuomion suuntautuvan aluksen eliniän eri vaiheisiin. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, etteikö tietyn alakäsitteen mukainen modulaarisuus vaikuttaisi kuin yhdessä kohtaa aluksen elinkaarta; vaikka esimerkiksi käyttömodulaarisuus viittaakin ennen muuta aluksen käyttövaiheen ominaisuuksiin, on selvää, että sillä on vaikutuksia myös esimerkiksi aluksen suunnitteluun ja rakentamiseen. Huomionarvoista on myös se, että edellä esitetyt alakäsitteet ovat toisistaan riippumattomia. Aluksessa voi esiintyä piirteitä kaikista modulaarisuuden tyypeistä yhdessä tai erikseen.

### 3 MODULAARISUUDEN VAIKUTUKSET ELINKAAREN ERI VAIHEISSA

Kuten aiemmin todettu, voidaan modulaarisuudella tarkoittaa monenlaisia suunnittelu- ja toteutusratkaisuja taistelualuksen kannalta. Modulaarisuuden tyyppin ja modularisoinnin asteen perusteella ratkaisut vaikuttavat eri tavoin aluksen ominaisuuksiin, toimintaan ja kustannuksiin käyttöön eri vaiheissa. Vaikutusten tarkastelua varten määritetään ensin tutkielmassa käytettävä elinkaaren jaottelu, jonka jälkeen yhdistetään kirjallisuudessa kuhunkin modulaarisuuden päätyyppiin liitetyt odotukset elinkaaren eri vaiheisiin.

#### 3.1 Elinkaari tarkastelun viitekehyksenä

Käsitteellä elinkaari tarkoitetaan systeemin, tuotteen, palvelun, projektin tai muun ihmisen tuottaman kokonaisuuden kehittymistä alusta loppuun [22, s. 3]. Puolustusvoimien kontekstissa käytetään samassa tarkoituksessa myös käsitettä elinjakso (esim. [23]). Tarkastelua varten on hyödyllistä jaotella elinkaari ennalta määrättyihin jaksoihin, ja tällaista jaksoteltua elinkaarta nimitetään elinkaarimalliksi [22, s. 3]. Kahden jakson raja edustaa päätöksenteon pistettä; siirtymä edellyttää tietyn kriteeristön täyttymistä ja päätöstä siirtymisestä elinkaaren seuraavaan vaiheeseen [22, s. 12]. Elinkaarimalli voidaan periaatteessa luoda mielivaltaisella jaottelulla – mallin käyttötarkoitus määrittää sen, mitkä päätöspisteet muodostavat merkittävän vaihemuutoksen elinkaaren kannalta.

Kirjallisuudessa esiintyvät elinkaarimallit poikkeavat yksityiskohdiltaan jonkin verran toisistaan riippuen esimerkiksi käyttötarkoituksesta ja -kohteesta. Kaikista tarkastelluista lähteistä löytyvät kuitenkin perusosina hanke-, tuotanto-, käyttö- ja poistovaiheet. Taulukossa 2 on esitetty neljän keskeisen lähteen elinkaarimallit. Kenttäohjesäännön [23, s. 61] mukainen elinkaari alkaa ideointivaiheesta ja hankevaiheesta, jotka yhdessä muodostavat suunnittelu- ja rakentamisvaiheen. Hankevaihe jakautuu edelleen esisuunnittelu-, suunnittelu- ja rakennusvaiheisiin. Toisen kokonaisuuden muodostaa käyttö- ja ylläpitovaihe, joka jakautuu edelleen operointi- ja purkuvaiheisiin. ISO-raportissa 24748 [22, s. 13] tuotekehitysvaihe katsotaan osin limittäiseksi ideointi- ja tuotantovaiheiden kanssa, ja lisäksi operoinnin rinnalle nostetaan ylläpito. Anteroinen [24, s. 21] käyttää suorituskyvyn elinkaaren arvioinnissa ISO-standardien pohjalta laadittua jakoa konseptisuunnitteluun, suorituskyvyn suunnitteluun, hankintaan, operointiin ja purkuun. Asiedu ja Gu [25, s. 886] yksinkertaistavat elinkaarimallin neljään pääosioon, tuotekehitykseen, tuotantoon, käyttöön ja kierrätys- tai hävitysvaiheeseen. Niin ISO kuin Asiedu ja Gu esittävät yksittäisten elinkaaren vaiheiden olevan itse asiassa omia prosessejaan, joilla on oma elinkaarensa – esimerkiksi tuotantoprosessi sisältää



periaatteessa samat elinkaaren vaiheet kuin kokonaissysteeminkin, aina kehitysvaiheesta käytöstä purkuun. Tästä syystä, vaikka elinkaarimallit esittävät jaksot peräkkäisinä ja selvärajaisina, esiintyy liukumaa ja päällekkäisyyttä käytännössä jonkin verran.

[23, s. 61]

Suunnittelu ja rakentaminen				Käyttö ja ylläpito	
Ideointi	Esisuunnittelu	Suunnittelu	Rakentaminen	Operointi	Purku
Hanke					

[22, s. 13]

	Tuotekehitys		Ylläpito	
Ideointi	Tuotanto		Käyttö	Purku

[24, s. 21]

Konsepti	Suunnittelu	Hankinta	Operointi	Purku
----------	-------------	----------	-----------	-------

[25, s. 886]

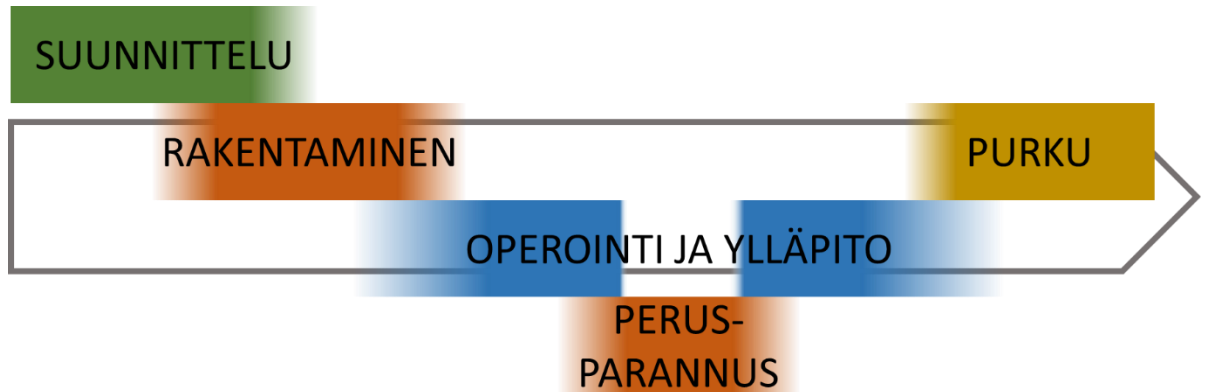
Tuotekehitys	Tuotanto	Käyttö	Kierrätys/hävitys
--------------	----------	--------	-------------------

**Taulukko 2.** Elinkaaren jaottelu eri kirjallisuuslähteiden elinkaarimalleissa.

Tarkemmin eri vaiheiden sisältöä on käsitelty lähinnä ISO:n raportissa 24748, joten tutkielman elinkaarimallin tarkentamista varten käytetään tämän raportin määritelmiä. Ideointivaiheen keskeisiä tarkoituksia ovat tarpeen määrittäminen, toteutusvaihtoehtojen kartoittaminen, ja alustavan toteuttamissuunnitelman laatiminen. Tämä vaihe ei siis anna lisäarvoa tutkielman kysymyksenasettelulle, sillä päätös modulaarisuuden hyödyntämisestä tapahtuu vasta ideoinnin tuloksena. Ideointivaihe toisin sanoen on sisällöltään vastaava riippumatta siitä, päädytäänkö lopulta modulaarisiin ratkaisuihin vai ei. Tuotekehitysvaiheessa luodaan tarkat tuotanto- ja toteutussuunnitelmat sekä tuotesarjan tapauksessa rakennetaan ja testataan prototyyppi. Tässä vaiheessa, samoin kuin varsinaisessa tuotantovaiheessa, voidaan modulaarisuuden olettaa aiheuttavan merkittäviä eroja vaiheiden sisältöön. Käyttö- tai operointivaihe on systeemin olemassaolon varsinainen tarkoitus. Ylläpito vaihe on osittain päällekkäinen käyttövaiheen kanssa – esimerkiksi taistelualuksen suorituskyvyn ylläpidosta suuri osa ei vaikuta operatiiviseen käyttöön, mutta esimerkiksi perusparannushankkeet ja muut telakoinnit katkaisevat käyttövaiheen. Myös systeemin käytöstä luopuminen vaatii omat toimensa ja päätöksensä: mitä systeemille tapahtuu käytön päättyessä. [22, s. 14–15]

Kenttäohjesäännön [23, s. 61] mukaan keskeiset modifiointipäätökset on nostettava omaksi päätöspisteekseen, joskaan modifiointia ei lueta erilliseksi elinkaaren vaiheeksi. Taistelualuksien tapauksessa perusparannuksella on kuitenkin varsin merkittävä rooli aluksen elinkaareissa, sillä se aiheuttaa pitkän katkoksen aluksen operatiiviseen käyttöön, tuottaa runsaasti kustannuksia ja monesti myös määrittää aluksen suorituskykyä uudelleen.

Edellä mainituin perustein noudatetaan tässä tutkielmassa ISO-raportin 24748 [22] mukaista elinkaarimallia kuitenkin siten, että ideointivaihe rajataan tarkastelun ulkopuolelle ja perusparannus nostetaan omaksi vaiheekseen muun ylläpidon sisältyessä operointivaiheeseen. Näin ollen malli muodostuu suunnittelu-, rakentamis-, operointi-, perusparannus-, sekä purkuvaiheista. Tutkielmassa käytettävä elinkaarimalli on esitetty kuviossa 3.



**Kuvio 3.** Tutkielman elinkaarimalli.

### 3.2 Rakennusmodulaarisuus

Modulaarisen rakennustavan juuret voidaan ulottaa toiseen maailmansotaan. Aluksen rakentaminen osissa, jolloin työtä voitiin jakaa pienemmille alihankkijoille ja hyödyntää yhtäaikaista rinnakkaista tuotantoa, mahdollisti sota-alusten massamaisen tuotannon toisen maailmansodan aikana niin liittoutuneiden kuin akselivaltojen tarpeisiin [21, s. 3]. Rakennusmodulaarisuutta on sittemmin hyödynnetty laajasti niin sota-alusten kuin kauppamerenkulun alustenkin tuotannossa. Modulaarisuutta käsittelevässä kirjallisuudessa edelleen painotetaan rakennusmodulaarisuuden tärkeimpänä hyötynä rinnakkaisen moduulituotannon tuomia aika- ja kustannussäästöjä [26, s. 2; 21, s. 3; 19, s. 6]. Tuotannon jakaminen usealle telakalle saattaa myös mahdollistaa tehokkaamman kilpailutuksen, sillä moduulien rakentamiseen voivat osallistua myös telakat, joiden kapasiteetti ei riittäisi kokonaisen aluksen rakentamiseen [21, s. 6]. Moduuleittain rakentaminen mahdollistaa myös kokoonpanon paremmissa olosuhteissa, esimerkiksi säältä suojatuissa tiloissa [27, s. 120].

Rakennusmodulaarisuuden hyödyntämistä voidaan perustella myös puolustuspoliittisin keinoin. Esimerkiksi USA:ssa [28, s. 64] ja Iso-Britanniassa [29, s. 12] laivateollisuuden elinvoimaisuus on lähes täysin riippuvainen laivastohankinnoista. Toimiva laivateollisuus nähdään puolustusvalmiuden kannalta merkittävänä tekijänä, mutta alusmäärien pienentyessä alushankkeita ei riitä kaikkien telakoiden toteutettavaksi. Modulaarinen rakennustapa mahdollistaa yhden aluksen tuotannon jakamisen usealle telakalle, jolloin vähemmällä aluksilla kyetään ylläpitämään teollisuusosaamista [27, s. 120].

RAND Corporation on Yhdysvaltojen laivastolle laatimassa tutkimuksessaan [7] tarkastellut sota-alusten rakennusmodulaarisuutta. Edellä esitellyn kirjallisuuden rinnalla tutkimus on huomattavasti perusteellisempi eritellen perusteluja modulaariseen rakennustapaan päättymiselle sekä rakennusmodulaarisuuteen liittyviä todennäköisiä kustannusvaikutuksia ja haasteita. Tutkimuksessa esitellään keskeisiksi rakennusmodulaarisuutta puoltaviksi päätöserusteiksi kotimaisen telakkateollisuuden ylläpitoa, eri telakoiden erikoisosaamisen hyödyntämistä, yksittäisen telakan kapasiteettirajoitteiden ylittämistä ja pyrkimystä kustannussäästöihin [7, s. 3–6].

Rakennusmodulaarisuuden odotetuista kustannusvaikutuksista keskeisimmät liittyvät toisaalta tuotantomahdollisuuksien monipuolistumiseen, toisaalta tuotantoprosessin monimutkaistumiseen. Modulaarisella rakennustavalla voidaan ylläpitää hyvää oppimiskäyrää useammalla telakalla, mikäli vaihtoehtona olisi teettää useammalla telakalla yksittäisiä kokonaisia aluksia. Erikoisosaamisen hyödyntäminen tuottaa parhaimmillaan sekä aika-, että kustannussäästöjä, sillä työ on tehokkaampaa erikoistuneilla telakoilla. Lisäksi mahdollisuus osallistaa pienempiäkin telakoita rakennusprosessiin laajentaa kilpailutus pohjaa. Negatiivisia kustannusvaikutuksia aiheuttavat moduulilogistiikan vaatimat resurssit, korkeammat laatustandardit, tarve tarkalle projektinhallinnalle, sekä useat päällekkäiset hallinnolliset toiminnot eri telakoilla. [7, s. 17–20, s. 30–31].

Erityisesti RAND Corporationin raportissa korostetaan, että rakennusmodulaarisuus vaatii merkittävää lisäpanostusta suunnitteluun ja projektinhallintaan. Moduulien rakenne ja etenkin rajapinnat on suunniteltava lähes täysin valmiiksi ennen kuin rakentaminen voidaan aloittaa, sillä kokoamisvaiheessa osien on sovittava yhteen. Modulaarisuuden tuomat aikasäästöt taas ovat riippuvaisia kokonaisprojektin hallinnoinnista – eri telakoiden organisaatiokulttuurien ja prosessien yhteensovittaminen siten, että laatuvaatimukset ja aikataulut toteutuvat, vaatii valvontaa sekä merkittävää panostusta tiedonvälitysinfrastruktuuriin projektiorganisaatiossa. [7, s. 15–20, s. 29–31].

Koonnos rakennusmodulaarisuutta käsittelevistä havainnoista on esitetty taulukossa 3. Lähdekirjallisuuden mukaan rakennusmodulaarisuuden odotetaan vaikuttavan taistelualuksen elinkaareissa valtaosin rakennusvaiheeseen. Huomionarvoista on kuitenkin kirjallisuudessa mainittu lisääntynyt rakentamista edeltävän suunnittelun tarve [7, s. 29; 18, s. 2–3]. Suunnittelutyön on oltava lähes valmis rakennusvaiheen alkaessa, sillä mahdollisuus myöhempään muutokseen rajoittuu käytännössä yksittäisten moduulien sisäisiin ominaisuuksiin. Lisäksi aluksen tilajako on suunniteltava siten, että se mahdollistaa moduulien rakentamisen toisista erillään, sillä tähän perustuu merkittävä osa

rakennusmodulaarisuuden oletetuista kustannussäästöistä. Yhden toimintokokonaisuuden – esimerkiksi konehuoneen – sijoittuminen kahden moduulin rajapinnan molemmin puolin ei tue modulaarisuudella tavoiteltavien hyötyjen toteutumista. Mahdollisuus suunnittelu- ja rakennusvaiheen limittäisyyteen on täten vähäinen. Toisaalta aluksen tilajaon modulaarinen suunnittelu saattaa yksinkertaistaa peruskorjauksen toteuttamista. Kun tietyt osakokonaisuudet on sijoitettu samaan runkomoduuliin, voidaan kyseisen moduulin rakentaminen päivitettyine ominaisuuksineen aloittaa aluksen vielä jatkaessa operatiivista toimintaa. Tällöin taas peruskorjaus- ja operointivaiheet voivat toteutua joustavasti ja osaksi limittäin, rajoittaen aluksen telakointiin tarvittavaa aikaa [18, s. 2–3; 6, s. 4].

### RAKENNUSMODULAARISUUS

SUUNNITTELU	- Tilajaon, rakenteen ja moduulirajapintojen suunnittelu vaatii lisäresursseja
RAKENTAMINEN	- Rinnakkaisten tuotantolinjojen hyödyntäminen lyhentää rakennusaikaa - Rakentaminen pienemmissä osissa mahdollistaa useampien tuottajien osallistumisen kilpailutukseen - Mahdollisuus hyödyntää tuottajien erikoisosaamista parantaa työn laatua ja tehokkuutta - Telakkateollisuuden laajempi tukeminen osallistamalla useita toimijoita - Oppimiskäyräetujen säilyminen verrattuna kokonaisten alusten rakentamiseen useilla telakoilla
	- Tiukemmat laatuvaatimukset - Lisääntynyt tarve kokonaisprojektinhallinnalle ja tiedonvälitykselle - Toimintatapa- ja kulttuurierot eri tuottajilla - Moduulilogistiikan lisäkustannukset - Päällekkäiset toiminnot eri tuottajilla
OPEROINTI JA YLLÄPITO	- Ei merkittäviä vaikutuksia
PERUSPARANNUS	- Saattaa tuottaa säästöjä, mikäli jokin moduuli voidaan rakentaa uusin ominaisuuksin aluksen jatkaessa operatiivisessa toiminnassa
PURKU	- Ei merkittäviä vaikutuksia

**Taulukko 3.** Rakennusmodulaarisuuden tavoitteet, oletetut hyödyt ja haitat.

### 3.3 Konseptimodulaarisuus

Konseptimodulaarisuus on taistelualusympäristön modulaarisuuden tyypeistä lähimpänä tuotantoteorioissa käsiteltyä modulaarisuutta, jossa keskeistä on varioidun tuoteperheen luominen yhteisestä tuotealustasta ja tuotekohtaisten ominaisuuksien määrittävistä moduuleista. Niinpä myös konseptimodulaarisuus on melko vahvasti tuottajakeskeinen käsite – useimmiten sen perustavoitteena on tarjota useille asiakkaille soveltuvia aluksia siten, että alukset valmistava telakka kykenee mahdollisimman hyvin hyödyntämään tuotannon

skaalaetuja [19, s. 5–6; 6, s. 4; 21, s. 6]. Näin tavoitellaan tuotantokustannuksiltaan kohtuullisia ja kuitenkin riittävällä tasolla asiakkaan tarpeeseen räätälöityjä aluksia.

Modulaarinen aluskonsepti mahdollistaa siis suuren asiakaskunnan saavuttamisen yhdellä taistelualuksen perusrakenteella. Yksittäisen aluksen suunnitteluprosessi voidaan tällä tavoin pitää joustavana ja nopeana [19, s. 5–6]. Toisaalta on huomioitava, että modulaarinen aluskonsepti itsessään, etenkin moduulistandardien ja rajapintojen osalta, vaatii mittavan suunnittelutyön, jotta kaikki mahdolliset moduuliyhdistelmät toimisivat aluksissa moitteettomasti [30, s. 25; 18, s. 2–3]. Konseptimodulaarisuus kuitenkin mahdollistaa alustavien suunnittelukulujen jakamisen alussarjan kesken, jolloin vaikutus kokonaissuunnittelukustannuksiin riippuu alussarjan pituudesta [21, s. 6].

Tuotantomäärä ja standardisoidut rajapinnat mahdollistavat säästöjen syntymisen asennus-, testaus- ja työvoimakustannuksissa, joskin modularisoinnin mukanaan tuoma kompleksisuus saattaa lisätä materiaalikustannuksia [21, s. 5–6]. Samoin oppimiskäyräedut voidaan hyödyntää tehokkaasti, kun vain osa järjestelmistä eroaa alusten kesken [26, s. 6]. Lisäksi konseptimodulaarisuus mahdollistaa rinnakkaisten tuotantolinjojen hyödyntämisen rakentamisessa, jolla voidaan tavoitella nopeampaa ja joustavampaa rakennusprosessia [8, s. 10; 31, s. 44].

Taistelualuksen loppukäyttäjän kannalta konseptimodulaarisuuden odotetut vaikutukset ovat kahtiajakoiset. Ensinnäkin, modulaarisuus mahdollistaa lopputuotteen räätälöinnin vain tiettyyn rajaan saakka: moduulistandardit ja perusrakenne rajoittavat aluskonseptin muuntautumiskykyä [19, s. 5–6]. Toiseksi, moduulien standardisoidut fyysiset mitat vähentävät mahdollisuuksia aluksen tilankäytön optimointiin. Tästä syystä modulaarisen aluskonseptin voidaan olettaa vaativat suuremman ja painavamman aluksen [16, s. 16–17; 18, s. 2–3]. On kuitenkin mahdollista, että joidenkin järjestelmien osalta modulaarinen aluskonsepti tarjoaa mahdollisuuden useampien markkinoilla olevien järjestelmien hyödyntämiseen, kun yhteensopivuus ja rajapinnat on suunniteltu telakan toimesta valmiiksi [31, s. 44]. Merkittävimpiä vaikutuksia kirjallisuudessa esitetään aluksen päivitys-, huolto- ja perusparannuskustannuksiin. Moduuli voidaan huoltaa tai päivittää aluksesta irrallaan, perusparannus- tai päivitystilanteessa taas uudistetut moduulit voidaan rakentaa aluksen vielä jatkaessa operatiivista toimintaa, ja tällä tavoin telakointiajan tarve saattaa vähentyä merkittävästi [20, s. 3; 8, s. 10; 6, s. 4; 18, s. 2–3; 31, s. 44; 21, s. 2–6; 27, s. 121; 26, s. 2]. Lisäksi modulaariset järjestelmät saattavat olla helpommin jatkohyödynnettävissä aluksen käyttöään päättymisen jälkeen [16, s. 16–17].

**KONSEPTIMODULAARISUUS**

SUUNNITTELU	- Aluskohtainen suunnittelu nopeaa, joustavaa ja edullista alusluokan suunnittelukustannusten jakautuessa useamman aluksen kesken
	- Aluskonseptin tilajaon, rakenteen ja moduulirajapintojen, sekä moduuliyhdistelmien yhteensopivuuden suunnittelu vaatii merkittävästi lisäresursseja
RAKENTAMINEN	- Tuotannon skaalaedut säilyvät erilaistettujen alusten yhteisistä osakokonaisuuksista ja järjestelmistä johtuen
	- Rinnakkaisten tuotantolinjojen hyödyntäminen lyhentää rakennusaikaa
OPEROINTI JA YLLÄPITO	- Työvoima- ja asennuskustannukset laskevat standardisoinnista johtuen
	- Materiaalikustannukset saattavat kasvaa
PERUSPARANNUS	- Moduulit voidaan mahdollisesti huoltaa aluksesta irrallaan, jolloin telakointitarve vähenee
	- Järjestelmiä voidaan päivittää ilman varsinaista perusparannusta moduulikohtaisesti
PURKU	- Rajallinen mahdollisuus aluksen ominaisuuksien pitkälle vietyyn räätälöintiin
	- Modulaarisuus vähentää mahdollisuutta tilankäytön optimointiin, jolloin aluksesta tulee suurempi ja painavampi

**Taulukko 4.** Konseptimodulaarisuuden tavoitteet, oletetut hyödyt ja haitat.

Konseptimodulaarisuuden osalta kirjallisuudessa esitetyt tavoitteet ja vaikutukset on esitetty taulukossa 4. Lähdekirjallisuuden perusteella konseptimodulaarisuuden oletetaan vaikuttavan taistelualuksen elinkaareen laajasti. Suunnitteluvaihe on keskeinen, sillä siihen kiteytyy konseptimodulaarisuuden perustavoite: modulaarisen taistelualuskonseptin suunnittelu on vaativa ja kallis prosessi, mutta suunnitelmien hyödynnettävyys useissa taistelualuksissa laskee suunnittelukustannuksia yksikkökohtaisesti laskettuna. Rakennusvaiheen vaikutusten oletetaan valtaosin olevan positiivisia johtuen mahdollisuudesta rinnakkaisten tuotantolinjojen hyödyntämiseen ja pitkän tuotantosarjan tuottamista mittakaavaeduista. Operointi- ja ylläpitovaiheessa konseptimodulaarisuus saattaa helpottaa järjestelmien huoltoa ja päivitettävyyttä, ja peruskorjausvaiheen osalta odotetaan merkittäviä aika- ja kustannussäästöjä. Konseptimodulaarisuudella voidaan siten tavoitella aluksen suorituskyvyn kustannustehokasta säilyttämistä käyttöään läpi. Toisaalta käyttöominaisuuksien osalta todennäköistä on, ettei konseptimodulaarinen alus ei pääse samalle tasolle tehtäväspesifissä suorituskyvyssä kuin integroidulla arkkitehtuurilla suunniteltu taistelualus. Modulaarisuuden oletetaan rajoittavan jonkin verran erikoistumista.

### 3.4 Käyttömodulaarisuus

Taistelualuksen suorituskyvyn muokkaus joustavasti operatiivisen käyttövaiheen aikana on modulaarisia taistelualuksia koskevassa keskustelussa selvästi kiinnostavin näkökulma. Siten käyttömodulaarisuus onkin tarkastelun keskiössä useimmissa tutkielman kirjallisuuslähteissä. Käyttömodulaarisuudella tavoitellaan huomattavia laivastotason etuja ja jopa muutosta aluskohtaisesta ajattelusta kohti suorituskykykohtaista ajattelua, jossa yleiskäyttöiset alusrungot voidaan varustaa tehtävän vaatimilla suorituskyvyillä. Käyttömodulaarisuuden perustavoite on täyttää tehtäväkentän asettamat vaatimukset vähäisemmällä määrällä aluksia, kun olettamuksena on, ettei kaikkiin tehtävähdistelmiin tarvitse vastata samanaikaisesti [5, s. 371; 10, s. 14; 20, s. 3; 8, s. 8; 19, s. 28; 32, s. 82].

Aluksen operatiivisen muunneltavuuden käytännön toteutus tuo mukanaan kuitenkin myös haasteita. Käytännössä reagointikyky muuttuviin tilanteisiin voi olla heikko, muunneltavuuden vaatiessa poistumista toiminta-alueelta tarvittavan infrastruktuuriin omaavaan satamaan [32, s. 81–82]. Moduulilogistiikan järjestäminen kaukaisten toiminta-alueiden, esimerkiksi ulkomaankohteiden, välittömään läheisyyteen lienee erityisen haastavaa [27, s. 139]. Toisaalta myös laivaston kotisatamien infrastruktuuriin vaadittane lisäpanostuksia, jotta moduulien vaihto voidaan toteuttaa sujuvasti [19, s. 19; 8, s. 8]. On myös huomioitava, että järjestelmämoduulit, jotka eivät ole kiinnitettynä aluksiin, vaativat varastointitilaa ja ylläpitävää huoltoa [10, s. 14; 32, s. 81–82].

Aluksen muuntautuminen moniin tehtäviin asettaa myös suuret vaatimukset henkilöstön koulutukselle [9, s. 5; 5, s. 371; 19, s. 28]. Toisaalta myös henkilöstö voidaan ajatella modulaariseksi, jolloin järjestelmämoduulien mukana alukselta toiselle siirtyisivät myös kyseisen erikoisalan osaajat. Tällaisen ratkaisun vaikutuksista kirjallisuudessa ollaan kahtiajakoista mieltä: joissain lähteissä arvellaan tehtäväkohtaisten miehistöjen tuottavan merkittäviä kustannussäästöjä [8, s. 6; 31, s. 44], toisissa epäillään suorituskykykohtaisten henkilöstöjen aiheuttavan kustannuksia, koska moduulien ollessa poissa operatiivisesta käytöstä on siihen liittyvä henkilöstö toisarvoisissa tehtävissä [10, s. 15; 32, s. 81–82]. Kuitenkin mikäli alusten kokonaismäärää voidaan käyttömodulaarisella lähestymistavalla vähentää, jäänee tarvittavan henkilöstön kokonaismäärä pienemmäksi [5, s. 371; 19, s. 28].

Käyttömodulaarisen aluksen tehtäväkohtainen tehokkuus riippuu vertailukohteesta. Modulaarisuus edellyttää kompromisseja järjestelmien, tilankäytön ja merenkulkuominaisuuksien osalta, jotta saavutettaisiin riittävä soveltuvuus useaan tehtävyyppiin, ja siksi yhteen tehtävään optimoitu alus on oletusarvoisesti

suorituskykyisempi kuin vastaava käyttömodulaarinen taistelualus [9, s. 5; 10, s. 15; 8, s. 8; 19, s. 28; 16, s. 16–17]. Toisaalta mikäli käyttömodulaarisen aluksen suorituskykyä verrataan yhtä laajaan tehtäväskalaan soveltuvaan monitoimialukseen, voidaan käyttömodulaarinen alus suunnitella huomattavasti kompaktimmaksi, sillä vain yhden tehtävätyypin vaatimat järjestelmät ovat aluksen mukana kerrallaan [5, s. 371; 10, s. 27; 19, s. 6; 16, s. 16–17; 32, s. 81–82].

Kokonaisuudessaan käyttömodulaarisuuden vaikutus suorituskykyyn on riippuvainen siitä, millainen oletettu tehtäväkenttä on. Toisaalta tehtävien vaihtelevuus suosii suorituskyvyltään muunneltavia aluksia, mutta toisaalta käyttömodulaarisen aluksen tehtäväkohtainen tehokkuus kärsii, mikäli alukselle suunnitellut roolit poikkeavat voimakkaasti toisistaan [9, s. 11]. Kirjallisuudessa arvellaan kuitenkin, että modulaariset järjestelmät tuottavat väistämättä jonkin verran hukkatilaa ja ylimääräistä painoa johtuen siitä, että standardisointi on tehtävien suurimmat fyysiset vaatimukset asettavien järjestelmien mukaan [9, s. 5; 10, s. 15; 19, s. 18].

Käyttömodulaarisuus vaatii merkittävää panostusta alusluokan suunnitteluun. Erityistä huomiota on kiinnitettävä moduulistandardeihin ja rajapintoihin, sekä järjestelmän kykyyn käyttää mahdollisia moduuliyhdistelmiä [10, s. 8, s. 27; 8, s. 8; 19, s. 28; 30, s. 25]. Taistelujärjestelmän tasolla aluksen on oltava valmis vastaanottamaan mikä tahansa mahdollisista moduuliyhdistelmistä, jolloin tekninen monimutkaisuus kasvaa [10, s. 8; 9, s. 5]. Lisäksi suunnitteluvaiheessa haasteita aiheuttaa aluksen soveltuvuus monenlaisiin tehtäviin erilaisilla moduulikokoonpanoilla: aluksen vakavuuden säilyttäminen erilaisilla moduulikuormilla sekä hukkatilan ja ylimääräisen painon minimointi ovat erittäin tärkeitä suunnittelutyön kohteita [10, s. 15; 8, s. 8]. Suorituskyvyn muokattavuuden kannalta on lisäksi suunniteltava moduulilogistiikka – niin aluksen, sataman, kuin varastoinnin ja huollon osalta – siten, että moduulien vaihto on tehokasta ja nopeaa [8, s. 8; 32, s. 81–82; 27, s. 139]. Toisin kuin tehtäväkohtaisesti räätälöidyissä aluksissa, suunnittelukulut jakautuvat kuitenkin koko alusluokan kesken, jolloin lavettikohtaiset suunnittelukulut riippuvat alusten määrästä [21, s. 6].

Tutkielmassa tarkastellun kirjallisuuden perusteella käyttömodulaarisuuden merkittäviin hyötyihin lukeutuvat telakointiaikojen vähentymisestä seuraavat säästöt ja operatiivisen käytettävyyden parantuminen [9, s. 5; 10, s. 14; 8, s. 8; 19, s. 28; 31, s. 44]. Tämä perustuu käytännössä siihen, että esimerkiksi huoltotoimenpiteitä vaativa järjestelmämoduuli voidaan irrottaa aluksesta ilman telakointia ja asentaa korvaava moduuli tilalle, jolloin alus pysyy operatiivisessa toiminnassa huollon tapahtuessa aluksesta irrallaan. Myös järjestelmien päivittäminen ja uusien järjestelmien hankinta onnistuu aluksen operatiivista käyttöä



katkaisematta – järjestelmämoduuli voidaan valmistaa ja testata erillään ja asentaa täysin toimintakuntoisena alukseen [10, s. 14; 20, s. 3; 19, s. 28; 16, s. 16–17; 32, s. 81–82; 26, s. 2; 21, s. 2].

Edellytys käyttömodulaarisen aluksen suorituskyvyn helpolle päivittämiselle on moduulistandardien ja -rajapintojen suunnittelu siten, että ne täyttävät järjestelmien vaatimukset myös tulevaisuudessa [10, s. 27]. Järjestelmien muutokset ovat mahdollisia vain moduuliarkkitehtuurin sallimissa rajoissa [19, s. 5–6; 18, s. 2–3]. Onnistunut moduuliarkkitehtuuri mahdollistaa myös sen, että vioittuneen tai käytöstä poistettavan aluksen järjestelmiä voidaan hyödyntää muissa aluksissa [10, s. 14; 8, s. 6; 16, s. 16–17].

Tehtäväkohtaisesti suunniteltuihin aluksiin verrattuna käyttömodulaarinen alusluokka voi tuottaa rakennusvaiheessa skaalaetuja, sillä samalla perusrakenteella tuotetaan useampia aluksia [9, s. 5]. Tällöin myös moduuliarkkitehtuurin suunnittelukustannukset jakautuvat usealle alukselle. Rakennusvaiheessa voidaan myös hyödyntää rinnakkaisia tuotantolinjoja, jolloin rakennusprosessi on nopeampi ja joustavampi [31, s. 44; 26, s. 2]. Standardisoidut ja yksinkertaiset liitännät tuottavat säästöjä asennus-, testaus- ja työvoimakustannuksissa, mutta modularisoinnin mukanaan tuoma kompleksisuus saattaa lisätä materiaalikustannuksia [21, s. 5–6].

Koonnos kirjallisuudessa mainituista käyttömodulaarisuuden vaikutuksista on esitetty taulukossa 5. Käyttömodulaarisuuden odotetaan vaikuttavan varsin kokonaisvaltaisesti aluksen elinkaareen. Suunnitteluvaihe vaatii erittäin merkittävää panostusta, sillä aluksen on sovelluttava monenlaisiin tehtäviin erilaisilla konfiguraatioilla ja painojakaumilla – myös käyttöiän aikana muutettavilla järjestelmillä. Rakennusvaiheessa arvellaan valtaosin syntyvän kustannussäästöjä rinnakkaisten tuotantolinjojen ja skaalaetujen hyödyntämisestä johtuen, joskin kirjallisuudessa esiintyy myös arvioita kasvavista kustannuskomponenteista. Dramaattisimmin käyttömodulaarisuus vaikuttaa aluksen operointi- ja ylläpitovaiheeseen. Merkittävimpänä tavoiteltuna etuna voidaan pitää alusten joustavaa soveltumista monenlaisiin tehtäviin, mutta tämä vähentää suorituskykyä yksittäisen tehtävän osalta, sillä aluksen suunnittelussa on jouduttu tinkimään tehtäväkohtaisesta optimoinnista monikäyttöisyyttä tavoitellessa. Toisaalta yksinkertaisesti vaihdettavat moduulit tuottavat huomattavia säästöjä huollon, päivitysten, sekä peruskorjauksen osalta. Moduulilogistiikkaan on panostettava, jotta alusten mukauttaminen onnistuu mahdollisimman nopeasti ja tehokkaasti.

Kaiken kaikkiaan arviot käyttömodulaarisuuden vaikutuksesta taistelualuksen elinkaarenaikaisiin kustannuksiin ja ominaisuuksiin ovat huomattavan kahtiajakoiset. On

kuitenkin tärkeää muistaa, että käyttömodulaarisuuden kustannustavoitteet liittyvät ennen muuta siihen, että riittävä suorituskyky voidaan saavuttaa vähäisemmällä määrällä aluksia. Lisäksi huomionarvoista on se, että käyttömodulaarisuuteen liittyy merkittäviä kertaluonteisia kustannuksia – esimerkiksi suunnittelun ja huollon infrastruktuurin osalta – joita ei synny alusluokan kasvaessa. Tämän viittaa siihen, että käyttömodulaarisuuden vaikutukset ovat suotuisimmat, mikäli samaa moduuliarkkitehtuuria hyödynnetään laajemmin, jopa useissa eri alusluokissa [10, s. 28–29].

### KÄYTTÖMODULAARISUUS

SUUNNITTELU	- Yksi alusluokka suorittaa monta tehtävää, jolloin aluskohtaiset suunnittelukustannukset laskevat
	- Moduulistandardien, rajapintojen, moduulilogistiikan, ja useaan eri rooliin ja moduulikuormaan soveltuvan aluksen suunnittelu vaatii huomattavasti resursseja
RAKENTAMINEN	- Alusten kokonaismäärää voidaan vähentää - Tuotannon skaalaedut säilyvät johtuen yhden alusmallin soveltumisesta useaan rooliin - Rinnakkaisten tuotantolinjojen hyödyntäminen lyhentää rakennusaikaa - Työvoima- ja asennuskustannukset laskevat standardisoinnista johtuen
	- Modulaarisen järjestelmän monimutkaisuus saattaa lisätä materiaalikustannuksia
OPEROINTI JA YLLÄPITO	- Muokattava suorituskyky mahdollistaa laajemman tehtäväkentän vähäisemmällä määrällä aluksia o Käyttö-, ylläpito- ja henkilöstökustannukset laskevat - Moduulien huolto ja päivitys sekä uusien järjestelmien käyttöönotto eivät vaadi telakointia
	- Tehtävän vaihto edellyttää moduulien vaihtoa – mukautuvuus muuttuviin tilanteisiin on riippuvainen logistisista mahdollisuuksista - Tehtäväkohtainen suorituskyky heikompi, sillä aluksen on suoriuduttava useista erilaisista tehtävistä - Modulaarisuus vähentää mahdollisuutta tilankäytön optimointiin, jolloin aluksesta tulee suurempi ja painavampi - Monimutkaisen järjestelmän alttius teknisille ongelmille
PERUSPARANNUS	- Mahdollisuus valmistaa uudistetut moduulit aluksen vielä ollessa operatiivisessa käytössä vähentää merkittävästi telakointiaikaa ja perusparannuksen kustannuksia
	- Järjestelmien uudistaminen on mahdollista vain moduuliarkkitehtuurin rajoissa
PURKU	- Modulaarisuus saattaa lisätä aluksen järjestelmien uudelleenkäytön mahdollisuuksia

**Taulukko 5.** Käyttömodulaarisuuden tavoitteet, oletetut hyödyt ja haitat.

## 4 KOKEMUKSET MODULAARISISTA TAISTELUALUKSISTA

Modulaarisuuden tavoitteiden ja odotettujen vaikutusten realisoitumista käytännön sovelluksissa ei ole helppo arvioida, sillä tarkkaa vertailukohtaa – täsmälleen samaan tarkoitukseen suunniteltua integroidun rakenteen taistelualusta – ei toteutetuille modulaarisille taistelualuksille ole. Lisäksi elinkaaren aikaisten kustannusten arviointi on hankalaa, sillä julkisesti saatavilla oleva kustannustieto on vaihtelevaa niin kattavuuden kuin laadunkin osalta. Kirjallisuudessa esiintyy kuitenkin jonkin verran havaintoja modulaarisuuden eri tyyppien hyödyntämisestä, ja näiden perusteella voidaan tietyllä tasolla arvioida edellisessä luvussa esiteltyjen otaksuttujen vaikutusten toteutumista käytännössä.

Käyttömodulaarisuuden ensimmäisenä laajamittaisena sovelluksena pidetään Tanskan kuninkaallisen laivaston Standard Flex (STANFLEX) -moduulijärjestelmää, joka realisoitui ensimmäisen kerran 1980-luvulla 14 Flyvefisker-luokan aluksen korvauksessa 22 eri rooleissa toimivaa pienehköä sota-alusta. Flyvefisker-luokassa paikkoja nopeasti vaihdettaville STANFLEX-moduuleille oli neljä, ja näillä kyettiin muokkaamaan alukset pinta-, sukellusveneen- ja miinantorjuntaan sekä miinoitukseen soveltuviksi. Moduuleja hankittiin vaiheittain yli 100, sisältäen myös rauhanajan tehtäviä tukevaa kalustoa, muun muassa merenmittauslaitteistoa. Alusten roolitus ei kuitenkaan saavuttanut alun perin suunniteltua nopeaa vaihdettavuutta: lopulta jokainen Flyvefisker-luokan alus toimi lähes vakioidulla konfiguraatiolla. [33, s. 3–4]. Syynä tähän oli muun muassa eri roolien aiheuttamat erikoisosaamisen vaatimukset henkilöstölle ja moduulikonttien painon haittavaikutusten minimointi [34, s. 4].

Vaikka nopea tavoite alusten nopeasta uudelleenkonfiguroinnista jäikin taka-alalle, ei Tanska luopunut STANFLEX-moduuleista; se on päinvastoin sisällyttänyt moduulipaikat uudempiin alusluokkiinsa, esimerkiksi Absalon- ja Iver Huitfeldt -luokan fregatteihin, tällä tavoin hyödyntäen modulaaristen järjestelmien uudelleenkäytettävyyttä [33, s. 4]. Tanskalaiset korostavatkin olemassa olevien moduuliarkkitehtuurin ja modulaaristen järjestelmien helpottaneen merkittävästi uusien alusluokkien suunnittelutyötä, jonka lisäksi erityisesti alusten huolto ja päivittäminen on helpottunut järjestelmien ollessa helposti irrotettavia ja vaihdettavia [34, s. 3–4].

Toinen käyttömodulaarisuutta laajasti hyödyntävä taistelualustyyppi on Yhdysvaltain kahdesta eri alusluokasta rakentuva Littoral Combat Ship -perhe. Tässä konseptissa tarkoitus on ollut tuottaa USA:n laivaston mittapuulla pienehkö ja edullinen alus, joka voidaan modulaarisilla tehtäväpaketeilla varustaa tarpeen mukaan suorittamaan jotain kolmesta

perustehtävästään: asymmetrisen pintauhkan torjunta, vedenalainen sodankäynti tai miinantorjunta. Projekti käynnistettiin 2001. Ensimmäiset alukset LCS-varianteista – Freedom ja Independence – valmistuivat 2008 ja 2010. [35, s. 1–3]. Tehtäväpakettien ja niiden moduulien suunnittelusta vastasi telakoista erillinen yhtiö, ja samoin laivaston puolelta moduuli- ja lavettihankkeita hallinnoivat eri yksiköt [33, s. 2–3]. Hankintaprosessia pyrittiin nopeuttamaan, muun muassa ottamalla ensimmäiset alukset testikäyttöön mahdollisimman aikaisessa vaiheessa [36, s. 23] ja toteuttamalla modularisoitu suorituskyky asteittain siten, että alustavat tehtäväpaketit saataisiin nopeasti operatiiviseen käyttöön edelleen kehitettyjen versioiden seurattessa myöhemmin (Increment I, II ja III) [33, s. 2–3].

Littoral Combat Ship -hanke on kohdannut huomattavia vastoinkäymisiä. Molemmat alustyytit ovat kohdanneet viivästyksiä, niiden kustannukset ovat kasvaneet merkittävästi ja etenkin sarjojen ensimmäisissä aluksissa on ollut lukuisia teknisiä ongelmia. Modulaarisuuden kannalta mielenkiintoisia esimerkkejä lavettien haasteista ovat LCS 1 Freedom:n kansirakenteiden murtumat ja LCS 2 Independence:n propulsiotilojen korroosio-ongelmat [36, s. 11–12], sillä nämä molemmat runko-osat oli rakennettu erillisinä moduuleina [37, s. 47–48]. Lisäksi LCS 1 on kärsinyt liiallisesta painosta, joka on heikentänyt kuormankantokykyä ja vakavuutta [36, s. 14] – tämän taas vaikeuttaessa käyttömodulaarisuuden hyödyntämistä. Pääosin vastoinkäymiset johtuvat kuitenkin modulaarisuuteen suoraan liittymättömistä seikoista – uuden teknologian suuresta osuudesta ja ennakkosuunnittelun ylimalkaisuudesta [38, s. 38]. Kokonaisuutena voidaan kuitenkin todeta, että alun perin tavoitellun noin 220–450 miljoonan dollarin kappalehinnan [35, s. 10] sijaan ensialusten hinnaksi muodostui noin 650–800 miljoonaa dollaria kappaleelta [35, s. 65], ja vuoden 2013 arvion mukaan koko alussarjan valmistuttua hinta-arvio olisi ollut noin 650 miljoonaa dollaria alusta kohden, sisältäen koko sarjalle jaetut suunnittelu- ja kehitystyökulut [35, s. 7]. Tämä hinta-arvio ei sisällä tehtäväpakettien hintaa – arvio yhden tehtäväpaketin tuotantokustannuksista on noin 70 miljoonaa dollaria [35, s. 8].

LCS-lavettien tuotannon ja käyttöönoton lisäksi myös tehtäväpakettien tuottaminen on kohdannut merkittäviä vaikeuksia. Kuvaavaa on, että kevääseen 2015 mennessä edes ensimmäisen kehitysportaan tehtäväpaketeilla ei ole vielä suoritettu operatiivista testausta molemmilla alustyypeillä – ainoastaan pintatorjuntapaketti on testattu ja sekin vain Freedom-variantilla [39, s. 1]. Tässä keskeisinä tekijöinä ovat olleet useat yksittäiset järjestelmät, jotka ovat osoittautuneet suorituskyvyltään merkittävästi odotuksia heikommiksi, tai eivät ole toimineet lainkaan. Tämä onkin johtanut pakettien sisällön karsimiseen. [36, s. 25–40]. Kuitenkin ongelmia on esiintynyt yhtä lailla niiden järjestelmien kohdalla, jotka ovat Yhdysvaltain laivastolle ennestään tuttuja – esimerkiksi pintatorjuntapakettien karsitussa

versiossa kaikki järjestelmät ovat testattuja ja toimiviksi havaittuja [40, s. 9]. Tämä viittaa siihen, että ainakin osa ongelmista on nimenomaan modularisoinnissa.

LCS:n kohtaamia haasteita voidaan tulkita siten, että niissä realisoituvat nopean hankintaprosessin riskit. Varianttien ensialukset rakennettiin ennen kuin niiden suunnitelmat olivat täydelliset. Mikäli lasketaan hankkeen kestoja aina alustavan suorituskyvyn (Increment I) operatiiviseen valmiuteen, on tämä kestänyt jo yli 13 vuotta – nopeutettu prosessi ei ollutkaan niin nopea. Kiirehtimällä on sen sijaan edistetty kustannusten kasvua ja ongelmien syntyä. [35, s. 50]. Kun lisäksi arvion mukaan tehtäväroolin vaihto toiseen komennuksen vaatimalla operaatioalueella vaatisi jopa kahdesta neljään viikon irrottautumisen tehtävästä [36, s. 43], voidaan kyseenalaistaa käyttömodulaarisuuden kahden merkittävimmän perustavoitteen – nopean vaihdettavuuden ja uuden teknologian helpon implementoinnin – toteutuminen LCS:ssä. Hanke onkin saanut osakseen kritiikkiä Yhdysvalloissa – alusmääriä on suunniteltu karsittavan ja hanketta jopa keskeytettävän. Alun perin tavoitteena oli rakentaa 55 alusta, mutta pian hanke typistettiin 52 alukseen. Vuonna 2014 projekti aiottiin ensin typistää 32 alukseen [41, s. 3], mutta lopulta päädyttiin tavoitteen pitämiseen 52 aluksessa kuitenkin siten, että modulaarisuuden hyödyntämistä vähennetään merkittävästi ja sen sijaan panostetaan kiinteisiin järjestelmiin ja monitoimialustyyppiseen konseptiajatteluun [42].

Konseptimodulaarisuuden saralla edelläkävijänä on toiminut saksalainen Blohm+Voss-telakka (nykyisin osa ThyssenKrupp Marine Systems -konsernia). Sen 1970-luvun lopulla kehittämä MEKO-aluskonsepti perustuu vakiorunkoon ja modulaarisesti suunniteltuihin järjestelmiin, joita yhdistelemällä tilaaja voi räätälöidä aluksen omaan tarpeensa mukaisesti. Suurimmat moduulit ovat mastoelementtejä sensoreineen. Näiden lisäksi käytetään lava- tai konttimuotoisesti pakattuja elektroniikka- ja laitekokonaisuuksia sekä ase- ja sensorimoduuleita [8, s. 15–16]. Hollantilainen telakka Damen Schelde on lähestynyt aluksen konseptimodulaarista räätälöitävyyttä eri näkökulmasta. SIGMA-aluskonseptissa muokattavuus perustuu pääsääntöisesti eriyettyihin runkomoduuleihin, jotka sisältävät valinnaisia tila-, laite- ja järjestelmäkokonaisuuksia [43, s. 2–4]. Runkomoduulit ovat vakiomuotoisia 7,2 m pitkiä keskilaivan lohkoja ja mahdollistavat järjestelmien, laitteiden ja tilajaon lisäksi aluksen pituuteen vaikuttamisen: telakan tutkimusten mukaan rungon perusmalli mahdollistaisi pituuden varioinnin 52 ja 105 metrin välillä hydrodynaamisten ominaisuuksien siitä merkittävästi kärsimättä [43, s. 5–6].

Konseptimodulaarisuuden tavoitteet liittyvät yhdenmukaistamisen tuomien säästöjen ja tehtäväkentän tarpeen muokatun konfiguraation yhdistämiseen. Tämä mahdollistaa aluskonseptin markkinoinnin laajalle asiakaskunnalle – tilaaja on kiinnostunut hankkimaan

tarvitsemansa suorituskyvyn kilpailukykyisellä hinnalla. MEKO-konseptin toimivuutta kuvaakin kenties parhaiten se, että 1980-luvulta alkaen konseptia hyödyntäviä aluksia on rakennettu yli 60 kappaletta 10 eri valtion käyttöön – tekeillä on lisäksi seitsemän alusta, jotka lisäävät MEKO-konseptia hyödyntävien valtioiden määrää vielä kahdella [44; 45]. SIGMA-alusperhe on uudempi konsepti, mutta sekin on osoittanut vetovoimansa kansainvälisillä markkinoilla: Damen Schelde on vuodesta 2008 alkaen luovuttanut yhteensä kahdeksan SIGMA-alusta Indonesian ja Marokon merivoimille [43, s. 14–16]. Lisäksi mainittakoon italialais-ranskalainen, myös modulaarisuutta aluksen konfiguraation muokattavuudessa hyödyntävä FREMM-fregatti, josta tuotetaan neljää eri versiota suunnittelijavaltioille, ja lisäksi tähdätään vientimarkkinoille – kirjoitushetkeen mennessä Marokko on tilannut yhden FREMM-fregatin [46].

Rakennusmodulaarisuutta hyödynnetään nykyisellään laajasti laivastoalusten tuotannossa. Se mahdollistaa työolosuhteiden pitemmälle viedyn optimoinnin, sillä alusta ei tarvitse rakentaa kokonaisena runkona kölistä ylöspäin. Rakentamisen moduuleittain on todettu tehostavan työtä ja parantavan sen laatua. Vastaava telakka voi myös ulkoistaa haluamiensa moduulien tuotannon muille valmistajille, ja tällä tavoin mahdollistaa joustavamman tuotantorakenteiden hyödyntämisen. Toisaalta moduulilogistiikka, sekä rakennustavan vaatima mittatarkkuus vaativat suunnittelutyötä ja lisäävät rakennusvaiheen kustannuksia. Eräs lähestymistapa on lisätä modulaarisuutta asteittain alussarjan edetessä, näin hyödyntäen rakennusvaiheen kokemukset ja vähentäen tarvetta rakennusprosessin etukäteissuunnitteluun. [37, s. 42–48]. Tästä esimerkkinä mainittakoon Littoral Combat Ship, jonka molemmat variantit suunniteltiin rakennettavaksi lisääntyvästi modulaarisuutta hyödyntäen. Tällä tavoin telakat tavoittelivat lähes 50 % vähennystä rakennusvaiheen työtunneissa sarjan edetessä [36, s. 15–16].

Huomionarvoista kuitenkin on, että rakennusmodulaarisuutta hyödyntävät monesti myös valtiot alusten tilaajina. Tällöin ensisijaisena tavoitteena eivät useimmiten ole kustannussäästöt, vaan kyky tukea useampia valtiollisten intressien kannalta merkittäviä telakoita. [7, s. 3–6]. Näin ollen myös kustannussäästöt saattavat jäädä vähäisemmiksi, sillä moduulilogistiikan kustannusten lisäksi telakoiden yhteistyön sujuvuuden varmistaminen jää tilaajan varmistettavaksi. Havaittu on esimerkiksi, että hankkeen hallinnoinnin ja tiedon jakamisen vaatimat IT-järjestelmät ovat huomattava kustannuserä tällaisissa projekteissa. [7, s. 21]. Jos kuitenkin telakoiden mahdollisimman laaja työllistäminen katsotaan tärkeäksi tavoitteeksi, voidaan rakennusmodulaarisuutta hyödyntämällä säilyttää tuotannon skaala- ja oppimiskäyräedut verrattuna kokonaisten alusten rakentamiseen eri telakoilla [7, s. 29–31].

Modulaarisuuden vaatimasta lisäpanostuksesta suunnitteluun, ja logistiikkaan ei olla kirjallisuudessa erimielisiä. Huomattavaa on kuitenkin se, että eri modulaarisuustyyppien vaatima suunnittelutyö on osin päällekkäistä – esimerkiksi vaihtoehtoisilla runkomoduuleilla eriytettävä konseptimodulaarinen alus lienee verraten yksinkertaista myös rakentaa samalla moduulijaolla eriytettynä. Samoin käyttömodulaariseksi suunniteltu arkkitehtuuri yksinkertaistaa konseptimodulaarista sovellusta, sillä moduulistandardit ovat jo valmiiksi suunniteltuja ja mahdollistavat aluksen varioinnin tai moduulien implementoinnin eri alusluokkaan. Monet modulaariset taistelualukset hyödyntävätkin useantyyppistä modulaarisuutta: esimerkiksi konseptimodulaariset MEKO- [30, s. 24], FREMM- [46, s. 7] ja SIGMA-alukset [43, s. 4] myös rakennetaan modulaarisesti. Tanska taas kykeni soveltamaan käyttömodulaarisuutta varten suunniteltuja STANFLEX-moduuleitaan myös konseptimodulaarisuuden periaatteilla muiden muilla aluslaveteilla [33, s. 4].

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Modulaarisuus on monitahoinen käsite. Taistelualusten modulaarisuutta ja siihen liitettäviä tavoitteita, hyötyjä ja haittoja ei ole mielekästä tarkastella yhtenä kokonaisuutena, sillä modulaarisuudella voidaan tarkoittaa monenlaisia ratkaisuja, jotka myös vaikuttavat kokonaisuuteen eri tavoilla. Tutkielmassa toteutettu modulaarisuuden jako rakennus-, konsepti- ja käyttömodulaarisuuteen noudattaa pitkälti kansainvälisessä kirjallisuudessa esiintyviä jaotteluita, ja soveltuu elinkaarenaikaisten vaikutusten vertailuun hyvin, sillä alakäsitteet toteuttavat modulaarisuuden perusmääritelmän olematta toisistaan riippuvaisia tai toisilleen alisteisia. Modulaarisuuden päätyyppien sovelluksien vaikutukset taistelualusten elinkaaren aikana poikkeavat toisistaan monilta osin, mutta myös tiettyjä yhteneväisyyksiä voidaan havaita. Koonnos tutkielman keskeisistä havainnoista on esitetty taulukossa 6.

	Rakennus- modulaarisuus	Konsepti- modulaarisuus	Käyttö- modulaarisuus
Suunnittelu	●	●●●	●●●
Rakennus	●●●	●	●
Operointi ja ylläpito	●	●●	●●●●
Perusparannus	●	●●	●●
Purku	●	●	●
Keskeistä	+ Rinnakkaiset tuotantolinjat - Suunnittelu - Projektinhallinta - Moduulilogistiikka	+ Eriyttäminen skaala- edut säilyttäen - Suunnittelu + Huollettavuus ja päivitettävyyys	+ Vähemmän aluksia suhteessa suoritus- kykyyn - Suunnittelu + Huollettavuus ja päivitettävyyys

● / ●●●: positiivinen / huomattava positiivinen vaikutus  
 ●● / ●●●: negatiivinen / huomattava negatiivinen vaikutus  
 ●: ei vaikutusta, vaikutukset vähäisiä tai epäselviä

**Taulukko 6.** Modulaarisuuden vaikutukset elinkaaren aikana.

Rakennusmodulaarisuus on vakiinnuttanut paikkansa osana taistelualusten – kuten siviilialustenkin – rakennusprosessien menetelmäkirjoa. Se mahdollistaa tuotannon eriyttämisen rinnakkaisille, samanaikaisille linjoille niin telakan sisällä kuin eri telakoiden välilläkin. Hyötynä tästä voi olla niin nopeampi rakennusaikataulu, erikoisosaamisen hyödyntäminen, tuotantokustannusten optimoiminen kuin telakkateollisuuden tehokas tukeminenkin. Toisaalta rakennusmodulaarisuus vaatii lisäpanostuksia suunnitteluun, projektinhallintaan, moduulilogistiikkaan ja edellyttää tarkempien laatuvaatimusten noudattamista. Kaikkien lisäkustannuskomponenttien vaikutusta voitaneen lieventää merkittävästi alussarjaa pidentämällä.



Konseptimodulaarisuus on muodostunut telakoille tehokkaaksi keinoksi pyrkiä kansainvälisille sota-alusmarkkinoille tarjoamalla mahdollisuuden asiakkaan tarpeiden mukaan räätälöityihin kokonaisratkaisuihin menettämättä pitkän alussarjan rakentamisesta saatavia skaalaetuja. Toisaalta modulaarinen aluskonsepti vaatii merkittävästi suunnitteluresursseja, joten yksittäisten alusten tuotannossa lähestymistapa tuskin kannattaa. Asiakkaan näkökulmasta konseptimodulaarisuus tarkoittaa parhaimmillaan kilpailukykyistä hintaa verrattuna alusta asti omista lähtökohdista rakennettuun alukseen. Modulaaristen järjestelmäelementtien huolto- ja päivityskustannuksissa voidaan myös saavuttaa merkittäviä säästöjä, telakointia vaativien toimenpiteiden vähentyessä. Yksittäisen valtion näkökulmasta konseptimodulaarisuuden käänteinen ilmenemismuoto voi olla yhtä lailla kiinnostava: kun suunnitellaan yksi moduuliarkkitehtuuri, jota voidaan hyödyntää useissa alusluokissa, voidaan säästää merkittävästi ylläpidon kustannuksista.

Käyttömodulaarisuus on selkeästi eniten kiinnostusta herättänyt modulaarisuuden päätyyppi. Sitä pidetään useissa lähteissä käänteentekeväenä ajattelutapana, jossa siirryttäessä aluskeskeisestä näkökulmasta kohti suorituskykykeskeisyyttä voidaan saavuttaa sama tai suurempi kokonaissuorituskyky vähemmillä alusyksiköillä. Kuitenkin lähdekirjallisuuden perusteella vaikuttaa selvältä, ettei käyttömodulaarisuus lisää suorituskykyä, vaan voi parhaimmillaankin saavuttaa vain lähes saman suorituskyvyn hieman pienemmällä alusten määrällä. Kun yhden alusrungon on sovelluttava useisiin toisistaan poikkeaviin tehtäviin, ei sitä voida optimoida tarkasti minkään tehtävätyypin suhteen. Toteutuneet käyttömodulaariset alushankkeet ovat kohdanneet merkittäviä haasteita niille asetettujen tavoitteiden suhteen, eikä tehtäväprofiilin nopeaa vaihdettavuutta ole vielä kyetty käytännössä saavuttamaan. Käyttömodulaarisuus tuonee kuitenkin säästöjä ylläpidon ja järjestelmäpäivitysten saralla, mahdollistaen järjestelmien huoltamisen aluksen jatkaessa operatiivisessa käytössä.

Oletettuja vaikutuksia on kirjallisuudessa esitelty laajasti ja monipuolisesti. Monet kirjoittajat kuuluvat ilmeisesti modulaarisuuden kannattajiin, sillä aiheen käsittely keskittyy useissa lähteissä oletettujen hyötyjen esittelyyn. Tämä huomioiden lähdekirjallisuus antaa kuitenkin verraten yhtenevän kuvan rakennus-, konsepti- ja käyttömodulaarisuuden ominaispiirteistä ja todennäköisistä vaikutuksista aluksen elinkaaren eri vaiheissa. Yleisesti ottaen kirjallisuudessa esiintyy verraten vähän tarkkaa ja varmennettua tietoa toteutuneiden modulaaristen alushankkeiden myötä saaduista kokemuksista. Tähän keskeisinä osasyinä ovat täsmällisten vertailukohtien puute sekä tarkkojen käyttäjäkokemusten kuuluminen salassa pidettävään tietoon. Siltä osin, kun kokemustietoa on julkisista lähteistä löydettävissä, tukee se suurimmaksi osaksi esitettyjä oletuksia modulaarisuuden vaikutuksista.

Tutkitun kirjallisuuden perusteella vaikuttaa vahvasti siltä, että tuotantoteoreettisen modulaarisuuskäsitteen perusoletukset pätevät myös taistelualusympäristössä: modulaarisuudella voidaan parhaimmillaan saavuttaa monipuolisuutta kohtuullisin kustannuksin, mutta hintana on tehtäväkohtaisen tehokkuuden kärsiminen, erityisesti lisääntyneen koon ja painon osalta. Toisaalta on syytä kyseenalaistaa aluksen pienen koon asettaminen kaikissa tapauksissa suunnittelun peruslähtökohdaksi, etenkin jos sallimalla koon kasvu voidaan saavuttaa kustannussäästöjä. Joka tapauksessa vaikuttaa siltä, että kustannussäästöjen syntyminen vaatii melko pitkän alussarjan tuotantoa, sillä modulaarisuus asettaa merkittäviä lisävaatimuksia suunnittelu- ja projektinhallintatyölle.

Tutkielman lopputulemana voidaan pitää sitä, että modulaarisuuden hyödyntäminen vaatii kompromissien tekoa. Mikään modulaarisuuden tyyppi ei lähdekirjallisuuden perusteella tuo mukanaan käännteentekeviä etuja perinteiseen alushankkeeseen nähden. Toisaalta rakennus- ja konseptimodulaarisuuden osalta tämä ei ole ensisijainen tavoitekaan, vaan niillä tavoitellaan ensisijaisesti hankevaiheen ja mahdollisesti ylläpidon ja järjestelmäpäivitysten kustannussäästöjä. Rakennus- ja konseptimodulaariset ratkaisut ovat osoittaneet näiden tavoitteiden olevan saavutettavissa. Käyttömodulaarisuudella taas tavoitellaan ajattelutavan muutosta aluskohtaisesta suorituskykykohtaiseen tarkasteluun, mutta toistaiseksi vaikuttaisi siltä, että käytännön toteutuksen ongelmat estävät aluksen tehtäväkentän joustavan vaihtamisen käyttövaiheen aikana.

Julkisesti saatavissa oleva lähdeaineisto osoittautui varsin laajaksi, joten tutkielman tuloksia voidaan pitää luotettavina, vaikkakin on syytä huomioida suuren osan kirjallisuudesta koostuvan tieteellisesti varmistamattomista lähteistä: konferenssijulkaisuista, laivastoalan ammattijulkaisuiden artikkeleista, opinnäytetöistä ja tutkimusraporteista. Osa lähteistä käsittelee taistelualusten modulaarisuutta yksipuolisen positiivisesti tai negatiivisesti, mutta aineiston laajuudesta johtuen eivät keskeiset tulokset perustu yksittäisiin lähteisiin. Kuten edellä mainittu, ovat taistelualusten yksityiskohtaiset käyttäjäkokemukset harvoin julkista tietoa, ja tästä syystä on perusteltua analysoida kirjallisuutta mahdollisimman kattavasti, vaikka se tarkoittaisi myös varmistamattomien lähteiden tutkimista.

Tutkielmassa esitetty taistelualusten modulaarisuuden alakäsitejako soveltunee yleisesti käytettäväksi, ja samoin havaintoja modulaarisuuden vaikutuksista voidaan pitää hyvänä yleisnäkemyksenä sekä lähtökohtana tapauskohtaiseen modulaarisuuden kustannusten ja hyötyjen arviointiin. Tutkielman pohjalta voidaan myös syventää analyysia esimerkiksi yksittäisen modulaarisuuden tyyppin aiheuttamiin elinkaarikustannusvaikutuksiin.

## LÄHTEET

- [1] Alho, K., Lehtonen, J-M., Mankinen, R., Maury, R. ja Nikula, N. 2012. *Puolustusmateriaalin hintakehitys*. In: Tiina Tarvainen (ed.). *Näkökulmia uskottavaan puolustuskykyyn*. Helsinki: Puolustusministeriö, 2012. s. 115–145. ISBN 978-951-25-2320-7.
- [2] Clark, V. 2005. *Statement of Admiral Vern Clark, U.S. Navy Chief of Naval Operations Before the Senate Armed Services Committee, 12 April 2005*. [viitattu 21.3.2015]. Saatavissa: <http://www.navy.mil/navydata/cno/testimony/clark050412.pdf>
- [3] Kvalvik, R. & Johansen, P. 2008. *Enhetskostnadsvekst på forsvarsinvesteringer*. Forsvarets forskningsinstitutt (FFI) rapport 2008/01129. ISBN 978-82-464-1399-0. 82 s. [viitattu 21.3.2015]. Saatavissa: <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2008/01129.pdf>
- [4] Kari, M., Hakala, A., Pääkkönen, E. & Pitkänen, M. (eds.). *Sotatekninen arvio ja ennuste 2025, osa 1. Teknologian kehitys*. Ylöjärvi: Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos, 2008. 565 s. ISBN 978-051-25-1889-0.
- [5] Beauchamps, B. & Bertram, V. *Quo Vadis, Navy – Trends for Future High-Performance Naval Platforms*. In: 5th International Conference on High-Performance Marine Vehicles. Sydney, 8.–10. marraskuuta 2006, Australia. 364–373.
- [6] Doerry, N. *Institutionalizing Modular Adaptable Ship Technologies*. In: SNAME Annual Meeting 2012, Providence, Rhode Island, 24.–26. lokakuuta 2012. 18 s. SNAME-047-2012.
- [7] Smallman, L., Tang, H., Schank, J. & Pezard, S. *Shared Modular Build of Warships*. Santa Monica, California: RAND Corporation, 2011. 81 s. ISBN 978-0-8330-5148-6.
- [8] MacKenzie, S. & Tuteja, R. *Modular Capabilities for the Canadian Navy's Single Class Surface Combatant – A Perspective on Flexibility*. Ottawa: Defence R&D Canada, 2006. 43 s. DRDC-CR-2006-004.
- [9] Glanville, J. *Capability Analysis of Multi-Role Warships for Australia*. In: International Maritime Conference 2010: Maritime Industry - Challenges, Opportunities and Imperatives. Sydney, 27.–29. tammikuuta 2010, Australia.
- [10] Saksinen, J. *Sota-alusten modulaarisuus*. Esiupseerikurssin tutkielma. 2014. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. 30 s.
- [11] Harras, J. *Pintataistelualusten kehittämisen haasteet 2000-luvun alussa – Yhdysvaltojen laivaston Littoral Combat Ship- ja hävittäjähankkeiden laivatekniikka*.

- Yleisesikuntaupseerikurssin diplomityö. 2011. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos, 117 s.
- [12] Hölttä-Otto, K. *Modular Product Platform Design*. Väitöskirja. Espoo, 2005. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto, TKK Dissertations 10. 65 s.
- [13] Baldwin, C. & Clark, K. *Design rules: The power of modularity*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2000. 483 s. ISBN 0-262-02466-7.
- [14] Jiao, J., Simpson, T. & Siddique, Z. 2007. *Product family design and platform-based product development: a state-of-the-art review*. Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 18, no. 1, s. 5-29. DOI 10.1007/s10845-007-0003-2.
- [15] Gershenson, J., Prasad, G. & Allamneni, S. 1999. *Modular Product Design: A Life-cycle View*. Journal of Integrated Design and Process Science, vol 3, no 4, s. 13–26.
- [16] Erikstad, S. *Modularisation in Shipbuilding and Modular Production*. Norwegian University of Science and Technology, Department of Industrial Economics and Technology Management, Working paper 11-2009. 56 s.
- [17] Gockowski, W. *Modularisation in Ship Equipment*. Tutkimusraportti projektiin InterModul s/03/G. Gdynia, Puola, 2005. 50 s. Viitattu 21.3.2015. Saatavissa: [http://www.cto.gda.pl/fileadmin/Inne\\_pdfy/Task\\_1\\_english.pdf](http://www.cto.gda.pl/fileadmin/Inne_pdfy/Task_1_english.pdf)
- [18] Bertram, V. *Modularization of Ships*. Tutkimusraportti projektiin InterModul s/03/G. Brest, Ranska, 2005. 16 s. Viitattu 21.3.2015. Saatavissa: [http://www.cto.gda.pl/fileadmin/Inne\\_pdfy/modular\\_equipment\\_survey\\_final.pdf](http://www.cto.gda.pl/fileadmin/Inne_pdfy/modular_equipment_survey_final.pdf)
- [19] Brekke, Ø. *Modular Capabilities on Offshore Support Vessels*. Pro Gradu. Trondheim, 2012. Norwegian University of Science and Technology, Department of Marine Technology. 66 s.
- [20] Kimber, A. & Giles, W. *Minor Warship Roles – How Technology Is Leading to a New Ship Type*. In: Pacific 2008 International Maritime Exposition. Sydney, 30. tammikuuta 2008.
- [21] Abbott, J., Levine, A. & Vasilakos, J. *Modular/Open Systems to Support Ship Aquisition Process*. In: ASNE Day 2008 Proceedings. Arlington, Virginia, 23.–25. kesäkuuta 2008.
- [22] ISO/IEC TR 24748-1:2010(E). Systems and software engineering – Life cycle management – Part 1: Guide for life cycle management, Technical report. International Organization for Stardatization, 2010. 78 s.

- [23] Pääesikunnan suunnitteluosasto. *Kenttäohjesääntö, yleinen osa – puolustusjärjestelmän toiminnan perusteet*. Helsinki: Edita Prima Oy, 2007. 110 s. ISBN 978-951-25-1744-2.
- [24] Anteroinen, J. *Enhancing the development of military capabilities by a systems approach*. Väitöskirja. Helsinki, 2013. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. Sarja 1, no 33. 112 s.
- [25] Asiedu, Y. & Gu, P. 1998. *Product life cycle cost analysis: state of the art review*. International journal of production research, vol 36, no 4, s. 883-908.
- [26] Garver, S. & Edyvane, J. *Ship modularity cost-reduction models*. In: ASNE ETS 2010 Proceedings. Falls Church, Virginia, 14.-15. heinäkuuta 2010.
- [27] Work, R. *Naval transformation and the Littoral Combat Ship*. Washington DC: Center for Strategic and Budgetary Assessments, 2004. 178 s.
- [28] White, R. 2007. *Globalization of navy shipbuilding. A key to affordability for a new maritime strategy*. Naval War College review, vol 60, no 4, s. 60-72.
- [29] Birkler, J., Rushworth, D., Chiesa, J., Pung, H., Arena, M. & Schank, J. *Differences between military and commercial shipbuilding – implications for the United Kingdom's Ministry of Defence*. Santa Monica, California: RAND Corporation, 2005. 111 s. ISBN 0-8330-3670-X.
- [30] Garver, S. & Abbott, J. 2014. *Embracing change. Reducing cost and maximizing mission effectiveness with the flexible warship*. Marine technology, heinäkuu, s. 22-28.
- [31] Modular ship design. Economical solution in times of tight budgets. Naval Forces, 2003. Vol 1, s. 36-44.
- [32] NATO Naval Group 6. *NATO/PfP Working paper on small ship design*. 2004. 377 s.
- [33] Modular warship concepts: is 'plug and fight' here to stay? IHS Jane's International Defense Review. Posted 31.7.2013. [Viitattu 21.1.2015]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/CustomPages/Janes/DisplayPage.aspx?DocType=News&ItemId=++1581871&Pubabbrev=IDR>
- [34] Flex Fleet: Denmark's new standard warships emerge. IHS Jane's International Defense Review. Posted 8.7.2004. [viitattu 21.1.2015]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/CustomPages/Janes/DisplayPage.aspx?DocType=News&ItemId=++1103715&Pubabbrev=IDR>

- [35] O'Rourke, R., 2014. *Navy Littoral Combat Ship (LCS) Program: Background and Issues for Congress*. Congressional Research Service, raportti no. 7-5700. 103 s.
- [36] United States Government Accountability Office, 2013. *Navy Shipbuilding. Significant Investments in the Littoral Combat Ship Continue Amid Substantial Unknowns about Capabilities, Use, and Cost. Report to Congressional Requesters*. 77 s. GAO-13-530.
- [37] Lundquist, E. *Modular warship construction: Are the pieces finally coming together?* Naval Forces 2012, vol 1, s. 42–51.
- [38] Work, R. *Littoral Combat Ship: How we got here, and why*. Naval War College, Newport Paper, 2014. 60 s.
- [39] Jean, G. *Surface Navy 2015: USN gears up for IOTE on LCS mission packages, trimaran seaframe*. IHS Jane's Navy International. Posted 15.1.2015. [Viitattu 21.1.2015]. Saatavissa:  
<https://janes.ihs.com/CustomPages/Janes/DisplayPage.aspx?DocType=News&ItemId=++1733732&Pubabbrev=JNI>
- [40] *Boxing clever? LCS mission modules approach reality*. IHS Jane's International Defense Review. Posted 13.7.2012. [Viitattu 21.1.2015]. Saatavissa:  
<https://janes.ihs.com/CustomPages/Janes/DisplayPage.aspx?DocType=News&ItemId=++1513734&Pubabbrev=IDR>
- [41] *Make or break year? The US Navy's Littoral Combat Ship programme in 2014*. IHS Jane's Navy International. Posted 12.3.2014. [Viitattu 21.1.2015]. Saatavissa:  
<https://janes.ihs.com/CustomPages/Janes/DisplayPage.aspx?DocType=News&ItemId=++1704618&Pubabbrev=JNI>
- [42] Jean, G. *Update: USN to proceed with modified LCS for multimission small surface combatant programme*. IHS Jane's Navy International. Posted 16.12.2014. [Viitattu 21.1.2015]. Saatavissa:  
<https://janes.ihs.com/CustomPages/Janes/DisplayPage.aspx?DocType=News&ItemId=++1731588&Pubabbrev=JNI>
- [43] *Geometry lesson: SIGMA embraces the virtues of modular standardisation*. IHS Jane's International Defense Review. Posted 5.3.2013. [Viitattu 21.1.2015]. Saatavissa:  
<https://janes.ihs.com/CustomPages/Janes/DisplayPage.aspx?DocType=News&ItemId=++1547711&Pubabbrev=IDR>
- [44] GlobalSecurity.org. *MEKO*. [Viitattu: 21.1.2015]. Saatavissa:  
<http://www.globalsecurity.org/military/world/europe/meko-list.htm>

- [45] The MEKO family. IHS Jane's International Defense Review. Posted 25.9.2000.  
[Viitattu 22.1.2015]. Saatavissa:  
<https://janes.ihs.com/CustomPages/Janes/DisplayPage.aspx?DocType=News&ItemId=++1604919&Pubabbrev=IDR>
- [46] Non-identical twins: FREMM frigates take to the seas. IHS Jane's International Defense Review. Posted 8.11.2011. [Viitattu 21.1.2015]. Saatavissa:  
<https://janes.ihs.com/CustomPages/Janes/DisplayPage.aspx?DocType=News&ItemId=++1108417&Pubabbrev=IDR>