

Lappeenrannan-Lahden Teknillinen Yliopisto LUT

School of Energy Systems

Konetekniikka

Pekka Kemppainen

**KUSTOMOIDUN ALUSPROJEKTIN TUOTTAVUUDEN VARMISTAMINEN KON-
SEPTOINTI- JA SUUNNITTELUVAIHEISSA**

Diplomityö

21.4.2021

Tarkastajat:

Professori Harri Eskelinen, TkT. Katriina Mielonen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden Teknillinen Yliopisto LUT

School of Energy Systems

Konetekniikka

Pekka Kemppainen

KUSTOMOIDUN ALUSPROJEKTIN TUOTTAVUUDEN VARMISTAMINEN KONSEPTOINTI- JA SUUNNITTELUVAIHEISSA

Diplomityö

2021

115 sivua, 56 kuvaa, 17 Taulukkoa, 11 liitettä

Tarkastajat: Professori Harri Eskelinen, TkT. Katriina Mielonen

Avainsanat: järjestelmäteknikka, mallipohjainen järjestelmäteknikka, konseptointi, meriteollisuus

Diplomityössä on tutkittu mallipohjaisen järjestelmäteknikan periaatteiden soveltamista kustomoituihin alusprojekteihin konseptointi- ja suunnitteluvaiheissa. Alukset ovat teknisesti suorituskykyisiä ja järjestelmiltään monimutkaisia. Merenkulun ohjeisto, luokitusyhteisön säännöt, lippuvaltioiden lait ja omistajien vaatimukset luovat rajat kehitysprojektille. Projektin kannattavuus määritellään konseptointivaiheessa.

Tutkimusongelma muodostuu edellä mainittujen sisäisten ja ulkoisten suunnittelun reuna-ehdojen sekä asetettujen teknisten ja taloudellisten tavoitteiden muodostamasta monisyisestä kokonaisuudesta. Tutkimuksen tavoitteena on löytää uusia menetelmiä monimutkaisuuden ja samalla kustannusten sekä riskien hallintaan annetun tehtävän puitteissa.

Tutkimusmenetelminä käytettiin sidosryhmäkyselyjä, kirjallisuustutkimusta ja empiiristä mallipohjaisen järjestelmäsuunnittelun periaattein luotua järjestelmämallia. Kysely toteutettiin ulkoisille ja sisäisille sidosryhmille koskien yhden projektin (n=10) alusta ja yhteensä (n=18) henkilön omakohtaista kokemusta projektista vuoden 2020 aikana. Suunnittelu-, tuotanto-, ja projektitoimintojen nykytila-arviointi tehtiin katselmoimalla vuonna 2018 laaditun *projektien hallinnan kehitysraportin* pohjalta soveltuvien osien.

Järjestelmämallissa käytettävä laskentaperiaate tutkittiin vertaamalla ennalta valitun diesel moottorin stoikiometristä suorituskykyä moottorivalmistajan käsikirjan antamaan tietoon ja toiseen vastaavaan tutkimukseen. Tuloksista johdettua ilmanvaihdon määrää verrattiin EN-ISO 8861 standardin ja kaupallisen lähteen yleiseen suositukseen. Empiirisen konehuoneen tuuletuksen mitoituksen järjestelmämalli toteutettiin taulukkolaskentaohjelmalla. Mallin tavoitteena on korvata hidas tekstipohjainen työskentelytapa täsmällisyydellä ja uudelleenkäytävyydellä, parantaen samalla työn tehokkuutta. Tutkimustulosten pohjalta mallipohjaisen järjestelmäsuunnittelun avulla on luotavissa hyvät edellytykset kustannustehokkaaseen toimintaan koko järjestelmän elinkaaren ajaksi.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Pekka Kempainen

ENSURING PRODUCTIVITY OF A CUSTOMIZED VESSEL PROJECT IN THE CONCEPTING AND DESIGN PHASES

Master's Thesis

2021

115 pages, 56 figures, 17 charts, 11 appendixes

Examiners: Professor Harri Eskelinen, D.Sc. Katriina Mielonen

Keywords: Systems engineering, MBSE, concepting, maritime industry

In this thesis, the principles of model-based systems engineering to customized vessel projects in the concept and design phases has been studied. The vessels are high performing and are equipped with number of complex systems. Comprehensive maritime guidelines, classification society rules, flag state laws, and owner requirements create strict boundaries for a development project. The profitability of a project is determined in the concept phase.

The research problem consists of a many-sided entity formed by the above-mentioned internal and external design boundary conditions and the set technical and economic targets. The goal of the study is to find new methods to manage complexity and at the same time cost and intended risk levels within given assignment.

The research methods used were stakeholder surveys, literature research and a system model created from the principles of empirical model-based system design. The survey was conducted for external and internal stakeholders regarding the start of one project ($n = 10$) and the total ($n = 18$) personal experience of the project during 2020. The current status assessment of design, production and project operations was performed retrospectively on the basis of the *project management development report* prepared in 2018, as applicable.

The theory used in the system model was researched by comparing the stoichiometric performance of a preselected diesel engine with the information provided in the engine manufacturer's manual and another similar study. The amount of ventilation derived from the results was compared with the general recommendation of the EN-ISO 8861 standard and a commercial source. The system model of the empirical engine room ventilation sizing was implemented with a spreadsheet program. The goal of the system model is to replace the slow text-based way of working with precision and reusability, while improving work efficiency. Based on the research results, model-based system engineering can enable good conditions for cost-effective operations throughout the system's life cycle.

ALKUSANAT

Opinnot ovat päättymässä tämän diplomityön myötä ja nyt on vihdoin kiitosten aika. On ollut etuoikeus saada kokea eturintamassa suomalaisen opintoinnovaation, eli FITECH-verkostoyliopiston voima. Jo pitkään työelämässä mukana olleena, tämä on ollut erinomainen ja toimiva kanava pätevöityä ammatillisesti nykyajan työelämän haasteita varten. Erityisesti arvostan opintojen tarjoamaa valinnan mahdollisuutta ja poikkitieteellisyyttä, jota tarvittiin tämänkin tutkimuksen loppuunsaattamisessa.

Kiitokset LUT:n Prof. Harri Eskeliselle kaikkien harjoitustöitteni tarkastamisesta ja arvokkaasta palautteesta niiden osalta. Samoin isot kiitokset TkT. Katriina Mieloselle, päättötyöni tarkastamisesta sekä MEC & Elec -ohjelman aktiivisesta ja näkyvästä kehittämisestä 2017 alkaen.

Kiitokset Aalto-Yliopiston meritekniikan kolmikolle Prof. Pentti Kujala, Prof. Jani Romanoff sekä Prof. Heikki Remes. Teidän johdollanne järjestyi kiinnostava ja kattava sivuainekokous meriteollisuuden aihepiireistä.

Kiitokset työnantajalleni ja toimitusjohtaja Niko Harolle tästä mahdollisuudesta saada tehdä mielenkiintoinen ja kattava työ kiinnostavien tuotteiden parissa. Kiitokset ohjaajalleni Jouni Hirvenkivelle, olen saanut häneltä paljon hyödyllistä käytännön tietoa liittyen alusten suorituskyvyn kehittämiseen ja etenkin projektien hallinnan praktiikoihin. Kiitokset telakan suunnittelu- ja tuotantotiimeille tuestanne.

Kotijoukot ovat lopulta kaiken takana. Kiitokset pojilleni Aleksille ja Eemilille, ilman teidän pääsykoeharjoituslaskujanne keittiön pöydän äärellä 2017, en olisi kenties tullut hoksanneeksi aloittaa ja saattaa päätökseen DI-opintoja, joiden parissa olin ensikerran tekemisissä 2000-luvun alussa.

Iso kiitos Marjalle joustamisesta ja kaikesta tuesta ja avusta opintojeni aikana. Tällä rintamalla on sarastamassa uusi aamu.

Viimeisenä, muttei vähäisempänä iso kiitos kuuluu äidilleni Talvikille. Hän on ollut minulle lähin esimerkki ja kannustaja elämän mittaisen oppimisen tiellä kaikki nämä vuosikymmenet.

Liedossa 21.03.2021

Pekka Kemppainen

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT	4
LYHENTEET	9
SYMBOLILUETTELO	10
1. JOHDANTO	11
1.1 Tavoitteet	11
1.2 Tutkimusongelma	11
1.3 Tutkimuskysymykset	12
1.4 Työn perusolettama	12
1.5 Rajaukset	13
1.6 Kohdeyrityksen toimiala ja toimintaympäristö	14
1.7 Laivasuunnittelun perusprosessit	16
1.8 Kohdeyrityksen verifiointi- ja validointiprosessi	18
2. METODIT	20
2.1 Kehittämis- ja koulutusprojekti 2018	21
2.2 Sidosryhmäkyselyt	22
2.2.1 Ulkoinen sidosryhmäkysely 2020	22
2.2.2 Sisäinen sidosryhmäkysely 2020	23
2.3 Kirjallisuustutkimus	23
2.4 Mallipohjainen järjestelmäsuunnittelu (MBSE)	24
2.4.1 Konehuoneen ilmanvaihdon MBSE-mallin kehitys	25
2.4.2 Konehuoneilmanvaihdon perusvaatimuksia	26
2.4.3 Moottorin stoikiometrinen ilmankulutus	28
2.4.4 Moottorin merivesipiirin jäähdytysteho	28
2.5 Konseptointivaiheen yleisiä menetelmiä	29
2.5.1 Moottorin valinta AHP-menetelmällä	29
2.5.2 Nettonykyarvolaskenta (NPV)	33
3. TUTKIMUSTULOKSET	34
3.1 Projektin hallintaprosessin kehitys 2018	34
3.2 Kysely ulkoiset sidosryhmät	35
3.3 Kysely sisäiset sidosryhmät	37
3.4 Tehottomuus konseptointi- ja suunnittelutehtävissä	38
3.5 Konseptointisuunnittelun tehtäväkenttä	40
3.5.1 Tarpeiden analysointi konseptointisuunnittelussa	45
3.5.2 Kustomointi ja massaräätälöinti	48

3.5.3.	Avoin arkkitehtuuri ja modulaarisuus	49
3.5.4.	Merenkulun kattojärjestöt	51
3.5.5.	Merenkulun SFI-Järjestelmä	53
3.5.6.	Merenkulun riski- ja tavoitepohjainen suunnittelu	55
3.5.7.	STAMP-teoria, STPA-prosessi, ennakoiva riskien hallinta.....	56
3.5.8.	Visuaalinen työskentelytapa	59
3.6.	Järjestelmätekniikka (Systems Engineering)	61
3.7.	Mallipohjainen suunnittelu	63
3.8.	Kirjallisuustutkimuksen avainpoinintoja	68
3.9.	AHP-menetelmällä valittu moottori	70
3.10.	Stoikiometrinenlaskenta ja moottorin häviöt.....	71
3.11.	Konehuoneen ilmanvaihdon laskenta ja mitoitus	73
3.12.	Ilmanvaihdon toimintaperiaate ja rakenne.....	77
4.	TULOSTEN ANALYSOINTI.....	78
4.1.	Alkukartoitus ja kehityspotentiaali.....	78
4.2.	Pääoman kiertonopeuden vaikutus tuottavuuteen	82
4.3.	Stoikiometrisen laskennan analysointi.....	83
4.4.	Järjestelmien kehitys ja elinkaaren hallinta.....	85
4.5.	Konseptointisuunnittelun haasteiden analysointia MBSE-näkökulmasta	92
5.	POHDINTA	96
5.1.	Tutkimusvertailua ja kirjallisuustutkimuksen havaintoja	96
5.2.	Tutkimuksen objektiivisuus.....	99
5.3.	Tutkimuksen reliabiliteetti ja validiteetti sekä virhetarkastelu	99
5.4.	Keskeiset johtopäätökset ja löydökset.....	100
5.5.	Tulosten uutuusarvo.....	104
5.6.	Tulosten hyödynnettävyys ja yleistettävyys	105
5.7.	Jatkotutkimusaiheet	106
5.7.1.	Konduktio.....	106
5.7.2.	Dynaaminen paine (Patopaine).....	107
5.7.3.	IMO-TIER III päästörajoitukset(NO_x).....	108
6.	YHTEENVETO.....	110
	LÄHDELUETTELO.....	112
	LIITTEET.....	I
	Liite I Watercat-X Opinnäytetyön tavoitteet	I
	Liite II Aikataulu	II
	Liite III Puhallinlait.....	II

Liite IV Moottorin valinta AHP-menetelmällä	III
Liite V Konehuonetuuletuksen säännöt, standardi ja spesifikaatiot.....	VI
Liite VI Konehuoneen stoikiometrisen ilmanmäärän laskenta.....	VIII
Liite VII Moottorin terminen tarkastelu.....	X
Liite VIII EN-ISO 8861 mukainen mitoitus konehuoneen ilmanvaihdolle	XII
Liite IX Ulkoinen sidosryhmäkysely.....	XIII
Liite X Sisäinen sidosryhmäkysely	XVIII
Liite XI Modulaarisuuden terminologiaa	XXI

"No substantial part of the universe is so simple that it can be grasped and controlled without abstraction. Abstraction consists in replacing the part of the universe under consideration by a model of similar but simpler structure. Models are thus a central necessity of scientific procedure"

Rosenbluth and Wiener (1945)

"All models are wrong, but some are useful"

-George E.P.Box-

A scientist studies what is where as an engineer creates that never was

-Theodore von Karman-

"Kaikki alkaa suunnittelupöydältä"

-P.Kemppainen (2021) –

LYHENTEET

A/F	Air/Fuel -ratio
AHP	Analytical Hierarchical Process
BSFC	Brake Spesific Fuel Consumption
CAST	Causal Analysis based on Systems Theory
COLREG	Collision Regulation
COTS	Commercial Off-The-Shelf
GFE	Goverment Furbished Equipment
ECA	Emission Control Area
FAT	Factory Acceptance Test
HAT	Harbour Acceptance Test
IACS	International Association of Classification Society
IMO	International Maritime Organization
LLC	Load Line Convention
MARPOL	Marine Pollution Control
MBSE	Model Based System Engineering
MOSA	Modular Open System Architecture
PAT	Preliminary Acceptance Test
SAT	Sea Acceptance Test
SCR	Selective Catalytic Reduction
SE	System Engineering
SFI	Skipsteknisk Forskningsinstitut
SOLAS	Safety of Life at Sea
STPA	System Theoretic Process Analysis
STAMP	System Theory and Accident Modelling process
UWS	Urea Water Solution

SYMBOLILUETTELO

Δ	Erosuure
η	Hyötysuhde
ρ	Tiheys [kg/m ³]
π	Pii vakio
λ	Lämmönjohtuvuus [W/(Km)]
c	Ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg C ΔT]
δ	Keskihajonta
q_h	Tuuletusilmamäärä m ³ /s
ϕ_{dp}	Moottorin säteilylämpö (kW)
ϕ_o	Muut laitteet säteilylämpö (kW)
ϕ_{el}	Sähkölaitteet säteilylämpö (kW)
ϕ_{gen}	Apukone säteilylämpö (kW)

1. JOHDANTO

Kustomoidut alukset sisältävät erilaisia asiakaskohtaisia toiminnallisia ratkaisuvaatimuksia. Niiden toteuttaminen muodostaa haasteita vaadittujen suorituskykyominaisuuksien, käytettävissä olevan tilan ja teknisen monimutkaisuutensa vuoksi. Käytännössä tämä tarkoittaa projektissa suurta aluskohtaista suunnittelutyön määrää, jonka uudelleenkäytettävyys myöhemmissä vastaavissa projekteissa on epävarmaa. Omistajavaatimusten lisäksi merenkulun sääntöperäisten luokka- ja turvallisuusvaatimusten pitää täytyä. Kustomoitujen alusten sarjakoko on tyypillisesti yksi, enintään kaksi alusta.

1.1 Tavoitteet

Diplomityön tavoitteena on löytää uusia keinoja kustomoitujen alusprojektien tuottavuuden varmistamiseksi konseptointi- ja suunnitteluvaiheissa. Työssä tutkitaan kohdeyrityksen nykyisiä vakiintuneita käytäntöjä kyselyjen sekä käytettävissä olevan aiemman tutkimusaineiston pohjalta. Lähtökartoituksella selvitetään, miten nykyiset alusprojektit toteutuvat ja millä tavoin kehityspotentiaali ilmenee. Erityisesti tutkitaan, voidaanko mallipohjaisen järjestelmätekniikan avulla hallita monimutkaisten järjestelmien kustannusten muodostusta konseptointi- ja suunnitteluvaiheissa.

1.2. Tutkimusongelma

Laivasuunnitteluprosessi on sisäisten ja ulkoisten epävarmuustekijöiden rajoittamaa ja se muodostaa siksi kompleksisen kokonaisuuden. Huomioon otettavia tekijöitä ovat sääntö- ja määräyspohjaiset rajoitteet ja aluksen tekniseen suorituskykyyn liittyvät rajoitteet. Konseptointivaihetta ohjaavia tekijöitä ovat käytettävissä olevat teknologiat, toimintavaatimukset, ulkopuoliset vaatimukset ja kaupalliset näkökohdat. Suunnittelutyötä määrittää ja rajoittaa joukko suunnittelun reunaehdoja, jotka liittyvät valmistettavaan alukseen ja sen alusluokkaan. Lisäksi tutkittavana olevien kustomoitujen alusprojektien toteutus, läpivienti ja tuottavuus riippuvat monista erityyppisistä tekijöistä, joista monien mittaaminen suoraan numeerisesti ei ole yksinkertaista. Myös erilaisten aluskonfiguraatioiden validointi- verifointiprosessi on monivaiheinen, jotta kustomoitujen alusten vaatimustenmukaisuus ja käyttäjätarpeiden täytyminen voitaisiin varmistaa luotettavasti. Tämän tutkimuksen tutkimusongelma

muodostuu näiden näkökohtien muodostamasta monisyisestä ja haasteellisesta kokonaisuudesta.

1.3. Tutkimuskysymykset

- I. Mikä on kohdeyrityksen tämänhetkinen järjestelmätekninen suorituskyky?
- II. Miten mallipohjaisella järjestelmäteknisellä lähestymistavalla voidaan selkeyttää ja helpottaa tapaa, jolla kohdeyritys pyrkii hallitsemaan systeemitason teknisiä ratkaisuja, niiden kustannuksia ja näihin liittyviä riskejä?
- III. Miten konseptointisuunnittelun keinoin voidaan vaikuttaa projektin kannattavuuteen?

1.4. Työn perusolettama

Diplomityön yhteydessä tutkitaan projektin kustannusten muodostusta järjestelmäteknisestä näkökulmasta. Tutkimuksen päähypoteesina on, että soveltamalla mallipohjaista järjestelmäsuunnittelutapaa konseptointi- ja suunnitteluvaiheissa, projektien tuottavuus ja tehokkuus on hallittavissa:

”Käsittelemällä kustannuksen muodostuksen pääelementtejä; kustannukset, toiminnan tehokkuus ja riskit jo järjestelmätasolla konseptointi- ja suunnitteluvaiheissa, on mahdollista saavuttaa ennustettavampi projektin kustannusrakenne, verrattuna siihen, että näin ei menetellä.”

Kuvassa 1.4.1 on *Toyota Production System* mukainen kaava tuottavuudelle [44]. Sen alla on kuvattuna kolme pääelementtiä, joilla voidaan hallita kokonaiskustannusten muodostusta.

Alan J Brown et al. 2013, [9, s. 10] kuvaavat miten he suorittavat kokonaisvaltaista systeemilähestymistapaa tehdessään konseptitason vaatimusten alustavaa tarkastelua.

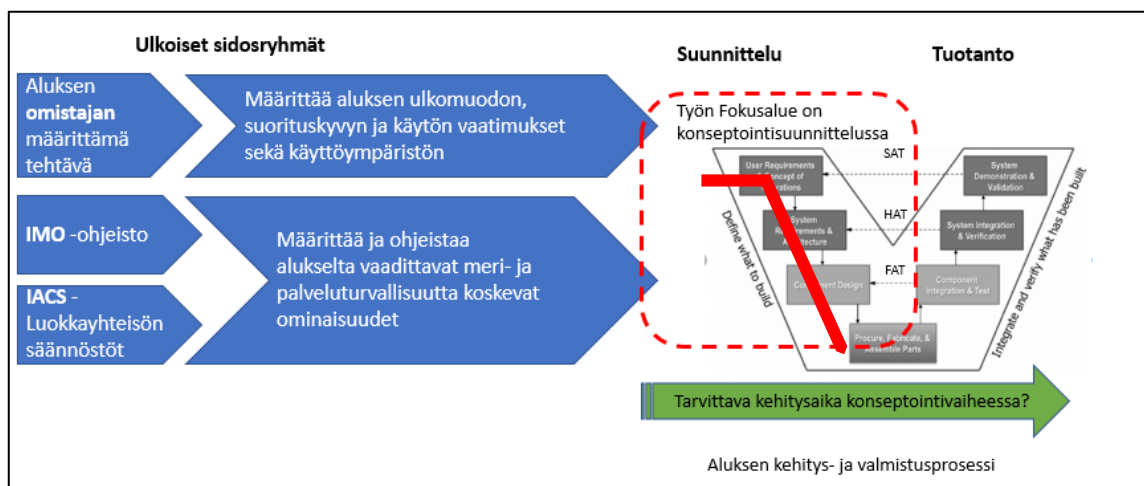
Samassa yhteydessä määritetään kyseisen tehtävän käytettävissä oleva suunnittelun tila ja laajuus monitavoitteisesti *kustannuksille, tehokkuudelle ja riskeille* [9]. Sama lähestymistapa sopii osaksi tämän työn perusolettamaa.



Kuva1.4.1. kokonaiskustannusten ja samalla tuottavuuden hallinta pohjautuu kustannusten, toiminnan tehokkuuden ja riskien hallintaan

1.5. Rajaukset

Tutkimus rajautuu oheisen kuvan 1.5.1. mukaisesti koskemaan konseptointi- ja suunnittelu- toimintojen rajapintoja vaatimusten asettajien suuntaan vasemmalle ja tuotannon toimintojen suuntaan oikealle. Pääfokus on varsinaisissa suunnittelun prosesseissa ja käytännöissä.



Kuva 1.5.1 Konseptointi- ja suunnittelutoimintojen rajapinnat ovat vaatimusten asettajien ja tuotannon välissä, kuvattuna systeemi- V:llä [Researchgate.net]

Tutkimuksen tarkastelunäkökulma koskee kustomoituja alusprojekteja, joiden valmistuserä koko on yksi tai enintään kaksi. Tämä työ ei käsittele tai analysoi henkilöiden roolituksin, esimiestyöhön tai johtamiseen yleisesti liittyviä asioita. Rajaus sivuaa kohdeyrityksen strategisia kysymyksiä.

1.6. Kohdeyrityksen toimiala ja toimintaympäristö

Kohdeyritys valmistaa ja peruskorjaa viranomaiskäyttöön tulevia nopeakulkuisia aluksia pituudeltaan 10—25 m, uppoumaltaan 12–30 tn. kokoluokassa nopeusalueella 25–55 solmua.

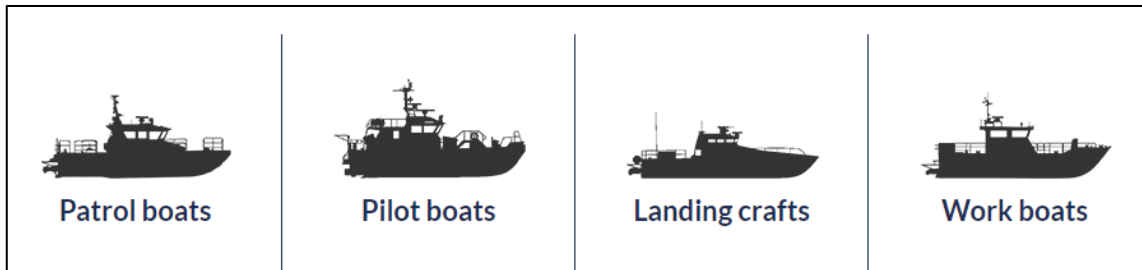


Kuva 1.6.1 Jehu Class M18 AMC Landing Craft [Marine Alutech.com]

Alusten suorituskykyvaatimukset ovat usein määritelty ääriarjoille vaaditun uppouman, huippunopeuden ja maksimitoimintasäteen rajaamina. Lisäksi alusten pitää täyttää vaadittavat luokkasäännöt sekä yleiset merenkulun turvallisuusvaatimukset.

Aluksen luokittamiseen *International Association of Classification Society*-kattojärjestön alaiset organisaatiot kuten esim. *ABS*, *Lloyd*, *DNV*, *Bureau Veritas*, *Rina* ja merenkulun turvallisuuteen liittyvät *International Maritime Organization* alaiset vaatimuskokoelma *SOLAS*, *COLREG*, *MARPOL* muodostavat suunnittelulle perusvaatimustason, jonka aluksen on täytettävä.

Näiden vaatimusten läpikäynti ja ratkaisulähtöinen työskentelytapa niitä analysoidessa vaatii suunnittelijoilta huomattavan työpanoksen, ennen kuin tarjousaineisto on valmis toimitettavaksi asiakkaalle määräaikaan mennessä.



Kuva 1.6.2 Erilaisia viranomaiskäyttöön suunniteltuja ammattivenuokkia, jotka edustavat tämän tutkimuksen kohderyhmiä [Marine Alutech.com]

Alukset ovat teknisesti suorituskykyisiä ja kokonaisuus muodostuu aluksen runkoon rakentuvista järjestelmäkokonaisuuksista. Käytettävissä oleva tila aluksessa on rajallinen. Runگون muoto, uppouma ja kulkunopeusvaatimus määrittävät valittavien moottoreiden tehotarpeen propulsioratkaisuineen.

Laitevalinnoissa on kiinnitettävä huomiota suorituskyvyn ja hankintahinnan lisäksi niiden kokonaismassaan ja sijoitteluun aluksessa. Suunnittelun aikainen aluksen painopisteen seuraaminen ja määrittäminen painolaskelman avulla on tärkeää koko projektin ajan, jotta aluksen kulku tavoitellussa operointinopeudessa olisi optimaalinen. Suunnitteluaineiston tiedollinen hallinta konseptointivaiheessa on vaativa prosessi, samalla kun tekniseen määrittelyyn käytettävä aika on rajallinen. Kohdeyrityksessä on käytössään sertifioitu AQAP* 2110 edition D-laatu järjestelmä. (*NATO QUALITY ASSURANCE REQUIREMENTS FOR DESIGN, DEVELOPMENT AND PRODUCTION)

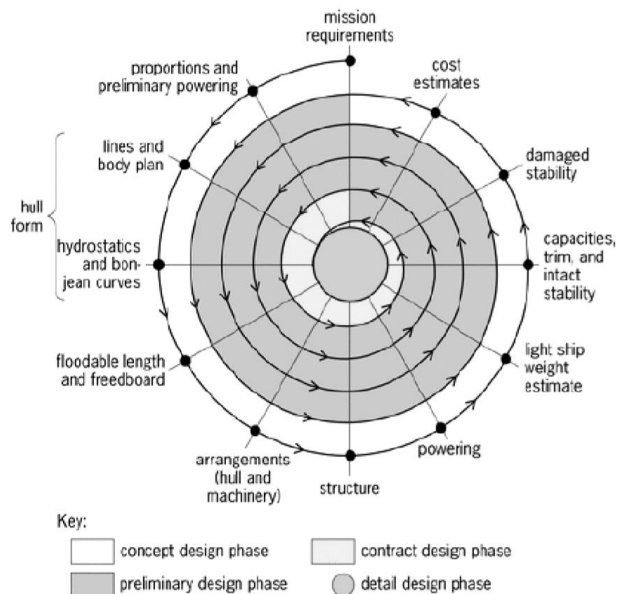
Kyseinen laatu järjestelmä edellyttää toimijoilta järjestelmäteknistä osaamista ja dokumentoituja suunnittelukatselmointikäytäntöjä.

Laatu järjestelmän edellyttämä verifiointi- ja validointitavat ovat yhteensopivat systeemi-V:n mukaisen tavan kanssa.

Esimerkiksi Suomen Puolustusvoimat edellyttää nykyisin päätoimittajiltaan AQAP-laatu standardin mukaista toimintaa. AQAP-standardivaatimus pohjaa noudatetaankin lähtökohteisesti kaikissa uusissa sopimuksissa valmistuksen ja peruskorjausten yhteydessä.

1.7. Laivasuunnittelun perusprosessit

Laivan suunnittelun perusvaiheita ovat (1) konsepti-, (2) alustava-, (3) sopimus-, ja (4) yksityiskohtainen design- ja työohjesuunnittelu [19]. Suunnittelun yksityiskohtaisuus ja työ määrä lisääntyvät eksponentiaalisesti laivan rakennusprojektin edetessä. Laivojen suunnitteluprosessit ja käytännöt ovat vakiintuneita. Kuvassa 1.7.1 on laivasuunnitteluspiraali (J.Evans 1959) Se on edelleen käyttökelpoinen apuväline suunnitteluvaiheiden tunnistamisessa ja tarvittavien toimitusaineistojen tuottamisessa. Spiraalia on kritisoitu sen yksivaiheisuuden ja peräkkäisyyden vuoksi [19]. Suunnittelun kokonaistavoite määritellään ”Ship Mission” - kuvauksella, joka toimii samalla symbolisena aloituspisteenä. Konseptointisuunnitteluvaihe käsittää ensimmäisen suunnittelukierroksen.



Kuva 1.7.1. Laivan suunnitteluspiraali kuvaa suunnitteluprosessin iteratiivisen luonteen.

[Researchgate.net]

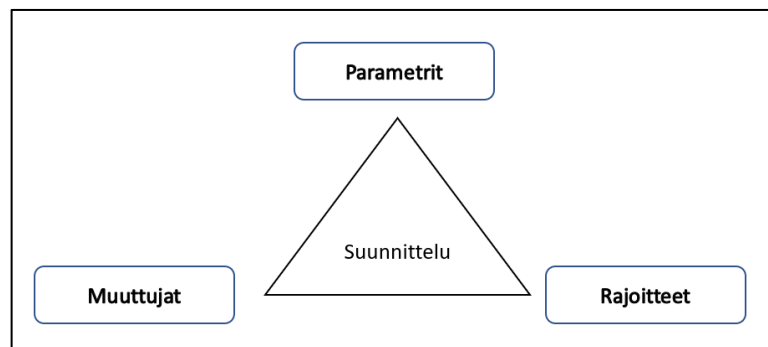
Konseptointisuunnittelun yhteydessä laaditaan alustavasti seuraavat aineistot:

- 1) aluksen rungon perusmitoitus
- 2) tehotarpeen määrittäminen
- 3) rungon muodot, märkäpinta-ala, vesiviiva
- 4) aluksen vakavuusaineisto, varalaita
- 5) tilojen ja koneistojen yleisjärjestelyt
- 6) rakennekuvaukset
- 7) voimalähteet ja koneistot
- 8) aluksen uppouma
- 9) kuormauskyvykyys

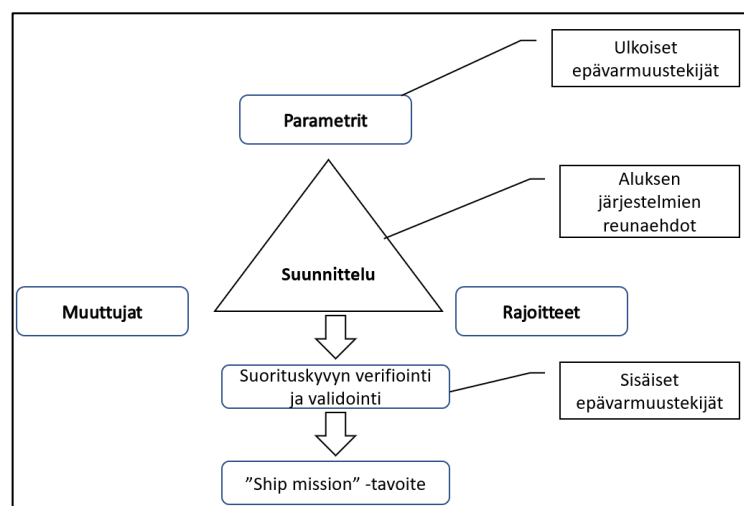
- 10) Vaurioherkkyys ja stabiileetti
 11) kustannusarvio / tarjous

Muuttujat ovat yksittäisen suunnittelijan työtapaan ja kokemukseen liittyviä muuttujia. Esimerkiksi kokemus aikaisemmista suunnitteluratkaisuista ja vaihtoehdoista eli ns. parhaat käytännöt.

Parametrit ovat aluksen suorituskykyyn, käyttöön ja käytettävyyteen annettuja tavoitteita sekä ympäristötekijöitä, joita ovat aluksen suunniteltu käyttöympäristö vuodenaikoineen. Suunnittelijalla ei ole mahdollisuus vaikuttaa suunnitteluparametreihin [6].



Kuva 1.7.2 Suunnitteluprosessia ohjaavat muuttujat, parametrit ja rajoitteet [13]

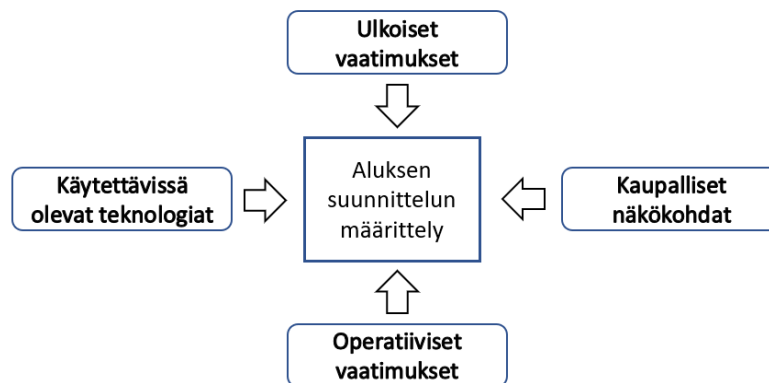


Kuva 1.7.3 Suunnitteluprosessi on sisäisten ja ulkoisten epävarmuustekijöiden rajoittamaa [13]

Rajoitteita ovat esimerkiksi:

- a) sääntö- ja määräyspohjaiset kuten esimerkiksi IMO/ECA (Emission Control Area)
- b) teknisiä suorituskykyyn liittyviä kuten melu dB/rpm, kulutus l/NM, nopeus
- c) fyysisiä muotoon liittyviä kuten tila, pituus, korkeus, leveys, syväys

Suunnittelutyötä määrittää ja rajoittaa joukko *suunnittelun reunaehdoja*, jotka liittyvät tarkemmin alukseen ja alusluokkaan [52]. Näitä ovat esimerkiksi suuri kulkunopeus yhdistettynä jäissä kulkuvaatimukseen tai systeemitason rajoitteisiin, jotka liittyvät aluksen ilmastointijärjestelmän toteutustapaan ja yleiseen paloturvallisuuteen.

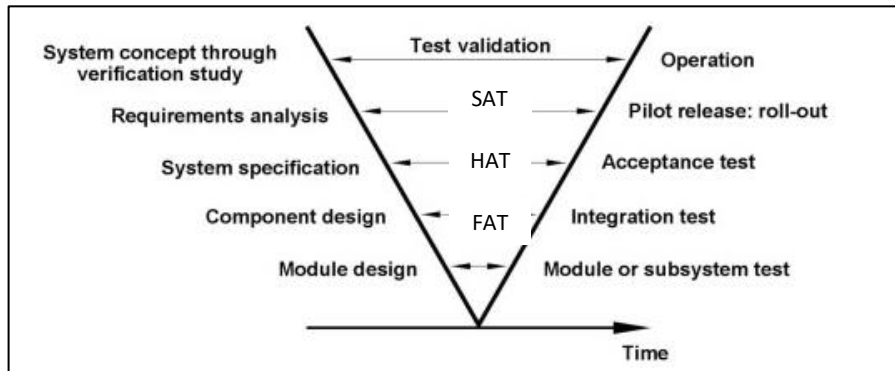


Kuva 1.7.4 Konseptointivaihetta ohjaavia tekijöitä: käytettävissä olevat teknologiat, toimintavaatimukset, ulkopuoliset vaatimukset ja kaupalliset näkökohdat (hinta) [Rolls-Royce Marine AS, Ship Technology – Offshore Systems]

1.8. Kohdeyrityksen verifiointi- ja validointiprosessi

Projektin kustannustenhallinnan tärkeimmät päätökset tehdään ja jäädytetään projektin alussa. Kustomoitujen alusten vaatimustenmukaisuus ja käyttäjätarpeiden täyttäminen on monimutkainen kokonaisuus. Kokonaistoimituksen hinta saattaa kuitenkin yksin olla ainoa määräävä tekijä. Aluksen kokoonpanon valmistuttua ensimmäinen verifiointivaihe on FAT, *factory acceptance test*, jossa varmistetaan, että aluskonfiguraatioon kuuluvat osat on asennettu alukseen ja ne ovat toiminnallisia. HAT *harbour acceptance test* vaiheessa kokeillaan ja varmistetaan, että aluksessa olevat laitteistot toimivat oikein ja ovat käytettävissä, kun alus on vedessä.

Viimeinen vaihe SAT, *Sea Acceptance Test* validoi aluksen todellisessa käyttöympäristössä, jotta asetetut suorituskykyvaatimukset täyttyvät.



Kuva 1.9.1 Systeemi -V kuvaa järjestelmäkehityksen vaatimusten hallinnasta, suunnittelun määrittelyn, varsinaisen suunnittelun, valmistusaikaisten testit ja verifiointit sekä käyttöön-oton. [<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/v-model>]

Käytäntö on yhdenmukainen systeemi V-mallin kanssa. Perusideana on asiakasvaatimusten jäljitettävyys koko kehitys- ja valmistusprosessin ajan.

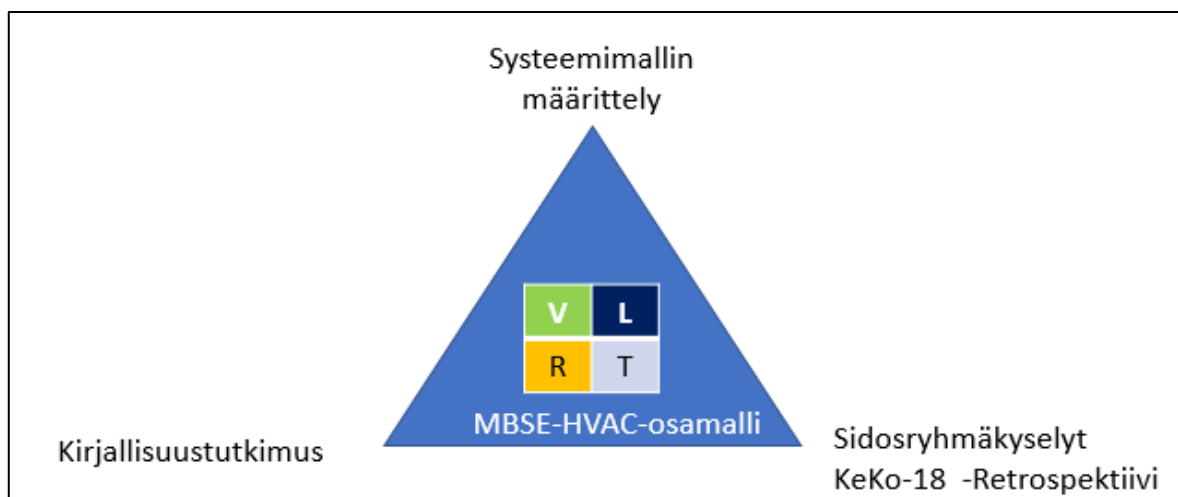
Tekstipohjaiset merenkulun säännöt muodostavat laajan aineiston. Yksittäisen systeemitason tiedon etsiminen dokumenteista on hidasta työtä. Usein tämän tiedon hakemiseen käytetty aika palvelee ainoastaan yksittäisen projektin tarpeita. Tässä on keskeinen syy, miksi tekstipohjainen työskentely ei ole ajallisesti tehokasta, tiedon uudelleenkäytettävyys ei ole hyvällä tasolla koko suunnitteluorganisaation tarpeiden näkökulmasta.

2. METODIT

Tämän tutkimusaiheen käsittelyssä ja tutkimusongelman ratkaisemisessa sekä analysoinnissa on pitkälti kyse monimutkaisuuden hallinnasta. Monimutkaisuus aiheutuu alusteknisien järjestelmien, merenkulun sääntöjen ja määräysten, operatiivisten olosuhteiden sekä käyttäjien asettamista vaatimuksista.

Systeemitiede tutkii järjestelmiä ja monimutkaisuusmalleja [2]. *International Council of Systems Engineering* (INCOSE) on järjestelmäteknikan voittoa tuottamaton kansainvälinen kattojärjestö, jonka tavoitteina on yleismaailmallinen ja poikkitieteellinen järjestelmäteknikan edistäminen [2].

Tutkimus painottuu kolmeen tarkastelunäkökulmaan (kuva 2.1). Tutkimusongelman osaratkaisuna kokeillaan mallipohjaisen järjestelmäteknikan periaatteiden soveltamista konehuoneen ilmanvaihdon yleiseen järjestelmämallin toteuttamiseen Model Based System Engineering (MBSE) periaatteiden mukaisesti. Mallipohjainen järjestelmäsuunnittelu on syntynyt tarpeeseen hallita monimutkaisten järjestelmien kehitystä tunnistamalla tekstipohjaisen vaatimus- ja lähdeaineistojen käytettävyyteen ja selkeyteen liittyvät heikkoudet kehitystyön aikana.



Kuva 2.1 Tutkimuksen empiirinen osuus on MBSE-pohjainen konehuoneen ilmanvaihtojärjestelmän järjestelmämalli. Mallin ydin koostuu neljästä lohkosta: vaatimukset; laskenta ja parametrit, toimintaperiaate, rakenne. Malli toteutetaan taulukkolaskentaohjelmalla. Konehuoneen tuuletusjärjestelmä on osa aluksen HVAC-järjestelmää* (Heating Ventilation Air conditioning Cooling (HVAC)).

Kirjallisuustutkimuksessa kartoitetaan konseptointisuunnittelun laajempaa keinovalikoimaa vaikuttaa alusprojektien tuottavuuteen ja hallita kloonista monimutkaisuutta.

Kohdeyrityksen nykyistä järjestelmätekniistä suorituskykyä tutkitaan ulkoisten ja sisäisten sidosryhmäkyselyiden avulla. Käytettävissä oleva kehityskoulutus 2018 raportti (KeKo) mahdollistaa tämänhetkisen suunnittelu- ja tuotantotoimintojen suorituskykyretrospektiivin yhdessä sisäisten sidostyhmäedustajien kanssa, rajattuna tämän tutkimuksen tavoitteisiin.

Tutkimusmenetelmien lisäksi tässä diplomityössä käsitellään muutamia hyödyllisiä konseptointisuunnittelun käyttöön soveltuvia menetelmiä pääoman, riskien ja järjestelmien hallintaan. Esimerkiksi Nettonykyarvomenetelmä, Net Present Value (NPV), Analyttinen Hierarkia Prosessi Analytical Hierarchy Process (AHP), Alustekninen luokittelujärjestelmä *Skipsteknisk Forskningsinstitut* (SFI), sekä proaktiiviseen riskien hallintaan sopiva systeemi teoreettinen prosessianalyysimenetelmä, System Theoretic Process Analysis, (STPA).

2.1. Kehittämis- ja koulutusprojekti 2018

Johdannossa kertaalleen esitelty KeKo-raportti, ***Projektin hallintaprosessin kehittäminen, 2018*** toimii lähtökohtana tälle tutkimukselle. Kyseisen projektin loppuraportti käytiin uudestaan läpi mukana olleiden suunnittelun ja tuotannon tiimien edustajien kanssa. Tavoitteena oli tunnistaa edelleen ajankohtaiset kehityskohteet kohdeyrityksen toiminnoissa, jotka sopivat tämän tutkimuksen rajauksiin.

Kyseisessä projektissa seurattiin kahden eri projektin, **A** (14 venettä) ja **B** (12 venettä), koskevien alussarjojen kulkua suunnittelusta tuotantoon.

KeKo-projektissa tehtiin kahden henkilön toimesta alkukartoitus haastattelemalla (n=14) kaikkien keskeisten toimintojen edustajia suunnittelusta, tuotannosta, ostotoiminnoista ja projektien hallinnasta.

2.2. Sidosryhmäkyselyt

Sidostyhmäkyselyiden tavoitteena oli tutkia kohdeyrityksen nykyistä järjestelmätekniistä suorituskykyä vuoden 2020 aikana toteutuneiden alusluovutusten C (10 venettä). näkökulmista Yksittäinen alustoimitus käsittää kaikki valmistuksen aikaiset asiakkaan kanssa tehtävät välitarkastukset, tarkastusasiakirjojen ja aikataulujen täsmällisyyden aluksen luovutuskatselmointiin asti. Sidosryhmäkyselyihin vastasi kaikkiaan (n=18) henkilöä.

2.2.1. Ulkoinen sidosryhmäkysely 2020

Ensimmäinen kyselyistä teetettiin projektin ulkoisella sidosryhmällä (n=10). Sidosryhmä muodostuu loppuasiakkaan, tilaajan, alustarkastajien ja alusten käyttäjien ryhmästä.

Kyselyn tarkoituksena oli selvittää, miten sidosryhmän jäsenet olivat omakohtaisesti kokeneet projektin etenemisen sen eri vaiheissa. Kyselyn aluksi tiedusteltiin vastaajan alakohdittaiset työvuodet.

Kyselyn päätavoitteena oli löytää kehityskohteita vuodelle 2021 projektin edelleen jatkuessa. Kyselyn avulla kartoitetaan samalla tämän tutkimuksen kohteena olevaa järjestelmätekniäsuorituskykyä verifiointi- ja validointiprosessien toiminnan näkökulmasta. Tarkasteltava kokonaisuus käsittää kaikkien kymmenen aluksen valmistumisen tarkastusvaiheineen, kymmenen ulkopuolisen arvioitsijan arvioimina.

Projektissa oli käytössä järjestelmätekniikassa yleisesti käytetty V-mallinen verifiointi- ja validointi-tarkastusprosessit kaikkiin kolmeen projektin tarkastus- ja käyttöönottovaiheeseen: *Factory Acceptance Test (Tehdas)*, *Harbour Acceptance Test (Satama)* ja *Sea Trial (Meri)*. FAT-raportissa todennetaan, onko kyseinen laite tai toiminto asennettu oikein ja toimintakuntoinen. HAT-raportissa todennetaan laitteistojen oikea toiminta, kun alus on vedessä. Tuolloin voidaan mm. käyttää moottoreita ja tehdä niiden esiasetuksia. SAT-testeissä mitataan ja testataan aluksen suorituskykyä ja melua sekä käsittelykykyä.

Nämä dokumentit muodostavat yhdessä *toimitusaineiston*, jolla todennetaan, että toimituskokonaisuuden kaikki vaatimukset ovat tulleet täytetyiksi.

2.2.2. Sisäinen sidosryhmäkysely 2020

Toinen vastaava kysely teetettiin tuotannon johdon, työnjohtajien ja ostotoimintojen keskuudessa joulukuussa 2020 (n=8). Kyselyn tavoitteena oli selvittää projektin toteuttavan portaan omaan kokemukseen perustuvaa näkemystä vuoden 2020 tapahtumista saman alusprojektin osalta.

Erityinen kiinnostuksen kohde tämän tutkimuksen kannalta on, miten FAT-HAT-SAT-prosessin toimivuus koetaan käytännössä. Projektin eteneminen suunnitellussa aikataulussa minimi virhemäärällä on keskeinen tekijä projektin kustannusten hallinnalle ja samalla kannattavuudelle.

Kyseisen prosessin määrittelyn olisi hyvä kuulua konseptointi- ja suunnittelutoimintojen ytimeen, kun yksittäiset järjestelmät ja komponentit alkavat muuntautua käytännön toiminoiksi omassa käyttöympäristössään. Näin ei välttämättä aina ole, jos sarjakoko on pieni. Helposti kiireisessä suunnittelutyössä ajatellaan, että on turha laatia tarkastuslistoja yhden tai kahden aluksen vuoksi.

Mikä suunnittelussa säästetään, maksetaan helposti ylimääräisenä sähläämisenä tuotannossa, kun toimitussisältöä ei ole kuvattu riittävän tarkasti. Tämä on varsin loogista. Yksittäisiä tarkastuslistoja laadittaessa saatetaan ajatella, että tämä asia teetättää suunnittelussa ylimääräistä työtä. Toisaalta suorittavassa portaassa kärsitään eri syiden vuoksi tapahtuvista henkilövaihdoksista. Tällöin on mahdollista, että päivittäinen osaamistaso eri asennustöiden välillä vaihtelee. Tarkastuslistojen ja työohjeiden ensisijainen päämäärä on eliminoida systemaattisten virheiden esiintyminen ja täten varmistaa, että työn laatu ja sisältö pysyvät vakiona riippumatta siitä, kuka työn suorittaa.

Ratkaisujen vakioinnilla ja standardoinneilla on mahdollisuus vähentää variaatioita, jolloin aiemmin laaditut kaaviot, ohjeet ja määrittelyt palvelevat soveltuvin osin uuden aluksen rakentamista [16].

2.3. Kirjallisuustutkimus

Kirjallisuuskatsauksessa on tavoitteena löytää mallipohjaisen järjestelmäsuunnittelun rinnalle yleisiä keinoja hallita suunnittelun, tuotannon ja elinkaarenaikaisia kustannuksia. Konseptisuunnittelu, massaräätälöinti, modulaarisuus, avoin arkkitehtuuri, standardointi, LEAN-periaatteet ja riskien hallinta ovat merkittäviä asiakokonaisuuksia, joiden vaikutus on

huomioitavissa systeemikehityksen yhteydessä. Yrityksen oma strateginen tahtotila määrittelee pitkälti näiden asioiden keskinäisen prioriteetin, kun tavoitellaan haluttua taloudellista suorituskykyä. Kirjallisuustutkimusosiossa taustoitetaan mitä edellytyksiä pitää olla, jotta kehitysprojekti voisi menestyä ja tuodaan esiin tyypillisiä ongelmia, joita esiintyy monimutkaisten kehitysohjelmien yhteydessä.

Erilaista järjestelmätekniikan kirjallisuutta löytyy runsaasti ja käytetyt järjestelmätekniikan esimerkit liittyvät usein pääomavaltaisen ilmailu- ja avaruustekniikan projekteihin. Vastavaa meriteollisuuden aineistoa löytyy vähemmän. Huolimatta siitä, että toimiala saattaa paikoin poiketa käytetyissä esimerkeissä laivanrakennuksesta, perusteena olevat systeemitekniset periaatteet koskien monimutkaisuuden hallintaa sopivat silti tämän diplomityön yhteydessä ratkottavan tutkimusongelman ratkaisemiseen. Eurooppalaiset merenkulkualan valmistajat ja tiedeyhteisö ovat nykyisin lyöttäytyneet yhteen löytääkseen uusia ratkaisuja alan toimijoiden kilpailukyvyyn parantamiseksi [19].

Tiedonhaun kolme tärkeintä kanavaa olivat: Proquest -sähköinen Yliopistokirjasto, Scopus Elsevier -tietokanta sekä verkosta vapaasti löydettävissä olevat aihepiiriin sopivat artikkelit ja julkaisut.

MBSE-pohjaisen mallin stoikiometristä toimintaperiaatetta laskettaessa on tukeuduttu moottorivalmistajien kaupallisesti saatavaan vertailuaineistoon sekä ISO 8861 standardiin tulosten analysointia varten.

International Maritime Organization (IMO) ja INCOSE ovat tämän tutkimusalueen kaksi tärkeintä kansainvälistä katto-organisaatiota.

2.4. Mallipohjainen järjestelmäsuunnittelu (MBSE)

Mallipohjainen järjestelmäsuunnittelu on tämän diplomityön keskeinen tutkimuksellinen kohde hallita monimutkaisia järjestelmiä kohdeyrityksen toimintaympäristössä.

Mallipohjaisessa järjestelmätekniikassa mikä tahansa järjestelmä voidaan kuvata sen sisältämien *vaatimusten, laskentaparametrien, toimintaperiaatteen ja rakenteen* kautta.

Tutkimuksen empiirisessä osuudessa toteutetaan konehuoneen tuuletusjärjestelmän perusmitoitus mallipohjaisen järjestelmäsuunnittelun periaattein taulukkolaskentaohjelmalla. Päämääränä on ymmärtää syvällisemmin tämän työskentelytavan vahvuudet ja heikkoudet ratkaistaessa varsinaista tutkimusongelmaa.

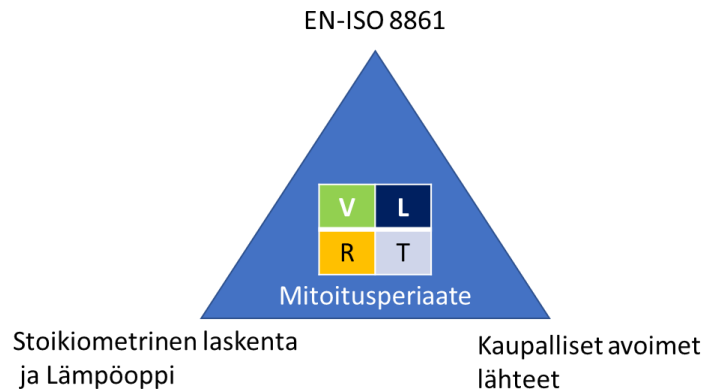
Järjestelmämallin tarkoituksena on koota yhteen vaatimusten mukaiseen toteutukseen tarvittava tieto. Mallipohjaisen järjestelmäsuunnittelun eräs tärkeä päämääränä on yhtenäistää suunnitteluprojektissa työskentelevien henkilöiden kokonaiskuva yksittäisestä järjestelmästä. Työläs tekstipohjaisten vaatimusten analysointi tehdään kertaalleen. Järjestelmämallit toimivat eräänlaisena tietopankkina, jonka avulla voidaan kuvata järjestelmän olemassaolon perusta. Tämä ominaisuus parantaa myös järjestelmämallien uudelleenkäyttöä uusissa sovelluksissa. Mallipohjaisen työskentelyn tehokkuus perustuu suunnittelijan työn uudelleenkäytettävyyteen, eli skaalautuvuuteen, vaatimusten jäljitettävyyteen ja systeemin toimintaperiaatteen teoreettiseen tarkasteluun vaadituilla parametreilla.

2.4.1. Konehuoneen ilmanvaihdon MBSE-mallin kehitys

Tämän tutkimuksen yhteydessä tehtävä empiirinen MBSE-pohjaisen järjestelmämallin toteutus tehdään konehuoneen ilmanvaihtojärjestelmään. Tähän valintaan päädyttiin siksi, että ilmanvaihdon mitoitusarve linkittyy valittuun moottorityyppiin. Tämän diplomityön yhteydessä sovelletaan Analyttistä Hierarkia Prosessia (AHP) kuvitteellisessa moottorivalintatilanteessa. Laadittava MBSE-malli pohjautuu kyseisen valitun moottorityypin mukaiseen mitoitukseen.

Konehuoneen ilmanvaihto on osa aluksen HVAC-järjestelmää. Aluksen tyyppi ja moottorivalinta ovat peruslähtökohta järjestelmän mitoitukselle ja ilmanvaihdon vaatimukset pitää ratkaista konseptointivaiheessa. Partioveneeseen asennetut suuritehoiset moottorit vaativat huomattavan määrän paloilmaa toimiakseen optimaalisesti. Lisäksi konehuoneen ympäristölämpötilasta on huolehdittava riittävällä ilmanvaihdolla ja mahdollisesti jopa ylimääräisellä jäähdytyslaitteistolla.

Konehuoneen ilmanvaihdon kapasiteetin määrittämiseen käytetään standardia *EN-ISO 8861 1998 Shipbuilding — Engine-room ventilation in diesel-engined ships — Design requirements and basis of calculations* [45].



Kuva 2.5.1 Triangulaatiota käytetään apuna järjestelmällisen teoreettisen mitoitusperiaatteen tutkimisessa.

Konehuoneen ilmanvaihdon mallia koskevat sääntöpohjaiset ohjeistot on koostettu yhteen. Yksityiskohtaisempi vaatimusten sisältö on kirjattu taulukkolaskentaohjelmassa olevaan mallin osioon. Perusperiaatteena on käyttää vaatimusten asettamia laskentaparametrejä, esimerkiksi ISO-EN-8861 antamia laskentakaavoja sekä suositeltuja raja-arvoja.

Tavoitteena mallipohjaisessa työskentelytavassa on hyödyntää vaatimusten hallinnan lopputulos geneeriseen järjestelmälliseen malliin, jolloin se on uudelleen käytettävissä. Mikäli sääntöpohjassa tapahtuu uudistuksia, mallin pitää ainoastaan päivittää uusi tieto. Konehuoneen riittävän ilmanvaihdon perusratkaisujen löytyminen konseptointivaiheessa poistaa projektilta huomattavan toiminnallisen epävarmuustekijän.

2.4.2. Konehuoneilmanvaihdon perusvaatimuksia

Partioveneissä käytettävissä oleva konehuoneen tila, suuri ilman kulutus ja vaativat muuttuvat olosuhteet kaventavat ratkaisuvaihtoehdoille jäävää suunnittelun tilaa. Tässä kappaleessa käsitellään yleisesti tunnettuja kanavien mitoitusperiaatteita ja lainalaisuuksia.

Standardin mukaisessa ilmanvaihdon mitoituksessa on huomioitava kaikki lämmönlähteet: pää- ja apumootorit, pakokaasuputket, vaihtovirtageneraattorit ja sähkölaitteet [23].

Ilmanottoaukkojen mitoitus, sijainti ja oikea toiminta ovat kriittistä, jotta voidaan varmistua, etteivät sade- tai merivesi ja ilmaitse kulkevat roskat pääse kulkeutumaan ilmanottokanavistoon. *Luokkasäännöt ja Load Line Convention* määrittävät tarkemmin ilmanottoaukkojen minimikorkeudet aluksen vesirajasta ja aluksen sääkannesta [21].

Kaikkein äärimmäisimmässä ja vaativimmassa suunnittelutapauksessa, alustyyppille saattaa olla vielä itseoikaisuvaatimus. Tämä tarkoittaa, että aluksen on säilyttävä moottorit käynnissä toimintakuntoisena, vaikka alus pyörähtäisi pituusakselin kautta ympäri. Tällainen vaatimus todennetaan käytännön kokeissa satamaolosuhteissa ja se asettaa konehuoneen ilmanottokanavasunnitteluun lisävaatimuksia entisten lisäksi.

Puhallinkanavien mitoituksen yhteydessä pätevät ns. puhallinlait (fan laws). Puhaltimen tilavuusvirta on suoraan verrannollinen puhaltimen kierroslukuun, dynaaminen paine (head) kierrosluvun neliöön ja puhaltimen ottama teho kierrosluvun kuutioon (Liite III).

Sivujen suhteiden ollessa 4:1 tai tätä pienemmät kanavan häviöt ovat vielä maltilliset. Mitasuhteet, jotka ovat suuremmat kuin 8:1 tulisi välttää.

- Suorakulmaisen kanavan tilavuusvirran ja kanavan kitkahäviöiden muuttaminen pyöreään kanavan ekvivalentiksi [24]:

$$Deq = \frac{1.30(WH)^{0.625}}{(W+H)^{0.25}} \quad (1)$$

Partiovenekokoluokassa kanavien pituudet eivät ole suuria, mutta tilanpuutteen vuoksi kanavien halkaisijat saattavat jäädä pieniksi tai geometriat epäoptimaaliksi, jolloin virtausnopeudet kasvavat vaaditulla tilavuusviralla, painehäviöiden kasvaessa liian suuriksi.

- Kun kanavan virtausnopeus on alle 13 m/s, puhaltimen jälkeen virtaussuuntaan kanavan suoran osuuden tulisi olla nyrkkisäännön mukaan $2.5 \times D$, jotta virtaus säilyisi laminaarisena ja kanavahäviöt minimaalisena [24].
- Kanavistossa kulkevan ilman nopeuden pysyessä alle 10 m/s, voidaan systeemisesti ehkäistä tarpeetonta melutason nousua [24]
- Konehuoneen enimmäispaine max. 50Pa [45]
- Konehuoneen enimmäislämpötila max. 35°C (työskentelylämpötila) [45]

Toimivalle ilmanvaihtoratkaisulle voidaan esittää seuraavat yleiset toiminnalliset tavoitteet:

- 1) toimittaa moottorin turbolle ilmanottoon riittävä määrä puhdasta paloilmaa (+ 50 %)
- 2) huolehtia lisäksi moottoritilan tuuletuksesta, joka on samalla osa moottoritilan lämpötilan hallintaa

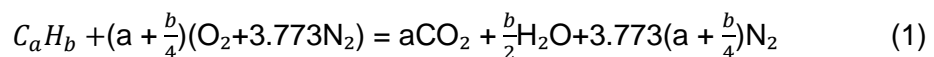
- 3) suorittaa edellä mainitut tehtävät sellaisella melutasolla, ettei siitä synny uusia ongelmia ohjaamon/matkustamon melutavoitteiden kanssa
- 4) Poistaa moottoritilassa olevaa kuumaa ilmaa, jotta lämpötila pysyy sallituissa rajoissa ja/tai vähentää konetilan lämpötilojen kerrostumista.

Toteutettava järjestelmämalli ottaa huomioon suorakaiteen muotoisen ja pyöreän kanavan poikkipinnan huomioon mitoitusta tehtäessä.

2.4.3. Moottorin stoikiometrinen ilmankulutus

Järjestelmämallin toteutuksessa otetaan lähtökohdaksi moottorin stoikiometrinen ilmankulutus. Tällä tarkoitetaan ilmamäärää, jolla esimerkiksi yksi litra diesel öljyä palaisi kemiallisesti täysin puhtaasti. Reaktioyhtälön kautta tapahtuva laskenta mahdollistaa ideaalisessa prosessissa syntyvien lämpö- ja pakokaasujen häviöiden tarkan laskemisen, jotta konehuoneen ilmanvaihdon ja muun jäähdytyksen tarve voidaan mitoittaa teoriatasolla oikein.

Laskennassa käytettävä reaktioyhtälö yleisessä muodossa: polttoaine + ilma = reaktiotuotteet [38]:



Heywood J. 2018 [38, s. 88] mukaan Diesel-öljyt koostuvat tyypillisesti useista eri hiilivetyyhdisteistä, mutta yleisesti ottaen laskennassa voidaan käyttää HC- molekyyliä $C_{13}H_{24}$

Laskentatulosta verrataan EN-ISO 8861-standardiin ja kahden eri moottorivalmistajan mitoitusohjeisiin. Tavoitteena on ymmärtää syvällisemmin moottorin tehoon perustuvan stoikiometrisen ilmamäärän ja sen päälle tulevan tuuletusilmamäärä teoriatasolla. Asian käytännön merkitys on, että ilmanvaihdon yli-/alimitoituksella voi olla mutkikkaina seurannaisvaikutuksina suorituskyky- ja meluongelmia, joiden ratkaiseminen jälkikäteen tuo odottamattomia toteutus- ja samalla kustannus- sekä aikatauluongelmia. Yksityiskohtainen laskenta on esitetty Liitteessä VI.

2.4.4. Moottorin merivesipiirin jäähdytysteho

Dieselmoottoareiden tyypillinen pakokaasujen lämpötila normaalikuormituksessa on noin 450–500°C [38]. Stoikiometrista laskentatulosta hyödynnetään moottorin jäähdytystarpeen

mitoituksessa. Tämä antaa mahdollisuuden tarkastella valmistajien käsikirjojen lähtötietoja periaatetasolla. Pienet laskennalliset erot tuloksissa muodostuvat käytännössä käytettyjen laskentaparametrien eroista esimerkiksi ilman tiheys, dieselöljyn lämpöarvo, sekä lämpötilaerot. Nämä pitää huomioida lopullisia tuloksia arvioitaessa.

Jäähdytysratkaisujen mitoituksen kannalta on oleellista, että lämpö-, säteily- ja pakokaasuhäviöiden suuruusluokka ja keskinäinen jakosuhte olisivat tiedossa. Jäähdytyksessä merivesi kulkee moottorin lämmönvaihtimien kautta öljyn lauhduttimelle ja sieltä pakoputkistoon jäähdyttäen pakokaasut (märkä pakoputkisto).

2.5. Konseptointivaiheen yleisiä menetelmiä

Tässä luvussa esitellään Analyttinen Hierarkia Prosessi (AHP) ja Nettonykyarvo (NPV) -menetelmät, jotka kummatkin soveltuvat konseptointivaiheen soveltavaan työskentelyyn. Tämän tutkimuksen yhteydessä käytetty dieselmoottori valittiin AHP-menetelmällä, käyttäen kuvitteellisia valintakriteereitä ja niiden välisiä painotuksia.

Nettonykyarvomenetelmä, NPV soveltuu havainnollistamaan kassavirran ajallisen vaikutuksen projektin kannattavuuteen. Projektin taloudellinen tarkastelu on osa konseptointivaihetta.

2.5.1. Moottorin valinta AHP-menetelmällä

Konseptisuunnittelussa on tilanteita, joissa on tehtävä valintoja useamman vaihtoehtoisen ratkaisun joukosta ja päätöksen teon kriteerit saattavat olla monen kirjavia. Tilanne muodostuu haasteelliseksi, kun arvioitavana on ei-numeerisia valintakriteereitä ja ominaisuuksia. Aikaisemmin olemme asettaneet konseptointisuunnittelun keskeisiksi tavoitteiksi kustannusten, tehokkuuden ja riskien hallinnan. Näitä samoja parametreja voidaan käyttää osana yksittäisen järjestelmäratkaisun valintakriteereinä.

Jotta konseptisuunnittelun aikainen päätöksenteko olisi johdonmukaista eri hankkeiden välillä, ratkaisujen johdonmukaiseen valintaprosessiin on hyvä kiinnittää huomiota alusta alkaen.

Yhdysvaltalainen matemaatikko **Thomas L. Saaty** kehitti matriisilaskentaan ja parivertailuun perustuvan menetelmän AHP [14]. Tässä menetelmässä analyysille asetetaan ensin

tavoite. Tämän jälkeen määritetään valintakriteerit ja lopulta valitaan kaikki vaihtoehdot vertailtavine ominaisuuksineen. Nämä elementit muodostavat keskinäisen hierarkian ja kaikki vaihtoehdot käydään ensimmäisessä vaiheessa läpi parivertailun avulla. Menetelmä perustuu kolmeen tärkeään perusominaisuuteen: *erittelyyn, parivertailuun ja prioriteettien tai hierarkian yhdistämiseen* [14]. Alan J Brown et al. tutkimuksessaan *Application of Operational Effectiveness Models in Naval Ship concept exploration* mainitsevat hyödyntävänsä parivertailun vahvuuksia etenkin konseptointivaiheessa, kun on valittava optimaalisin vaihtoehto useamman vaihtoehdon joukosta [9 s. 9].

AHP- menetelmän matemaattinen perusta rakentuu kolmeen perusaksiomaan, jotka pitää huomioida, kun toteuttaa analyysin [14]:

- 1) Resiprookkisuuden aksioma: jos A on 5 kertaa suurempi kuin B, tällöin B on $1/5$ A
- 2) isyyden aksioma: vertailtavat suureet pitää olla samaa kertaluokkaa [1...9]
- 3) Elementtien prioriteettien arvioinnit eivät ole keskenään riippuvaisia alempana hierarkiassa

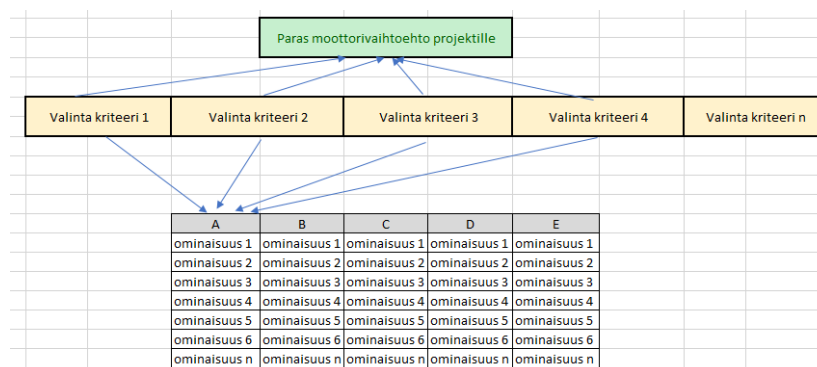
AHP-menetelmän parivertailussa käytetään aina vakioitua skaalaa 1–9 seuraavasti:

1 = samanarvoinen, 3= kohtalaisesti tärkeämpi, 5= merkittävästi tärkeämpi, 7= merkittävästi tärkeämpi, 9= erittäin merkittävästi tärkeämpi

AHP-menetelmän vahvuuksiin kuuluu laaditun analyysin johdonmukaisuusindeksin, CR laskenta. Tuon arvon tulisi olla <0.1 (10 %). Tämä ei ole ehdoton raja, enemmänkin suositus.

Tutkimuksen yhteydessä laskettu esimerkki on käytännönläheinen ja tarpeellinen konseptointisuunnittelua ajatellen. Moottori on yksi kalleimmista hankinnoista alusprojektiin. Lisäksi moottorin suorituskyvyllä on huomattavan moninaisia vaikutuksia aluksen systeemisuunnittelukysymyksiin. Asiakkaiden painotukset suorituskykyvaatimusten suhteen vaihtelevat huippunopeuden, maksimi toimintasäteen tai vuotuisen käyttötuntimäärä välillä.

Lisäksi merenkulkujärjestön IMO-tier III typenoksidien (NOx) päästövaatimukset ovat juuri astuneet voimaan vuoden 2021 alusta.



Kuva 2.5.1.1 AHP-hierarkia: Tavoite löytää paras moottorivaihtoehto viidellä kriteerillä arvioituna, kun moottoreilla n-kappaletta ominaisuuksia.

Kuvassa 2.5.1.2 on yhteenveto eri moottorivalmistajien datalehdiltä koostetusta lähtöaineistosta. Moottoreiden hinnat on indeksoitu, koska absoluuttisilla arvoilla ei ole analyysin toteuttamisen kannalta käytännön merkitystä. Valittujen moottoreiden tehoskaala on analyysissä välillä 588-882kw. Moottoreiden suhteellista hintaa arvioidaan moottorin kilokohtaisella hinnalla. Lähtökohtainen havainto on, että B2 moottorin kilowattikohtainen hinta on puolet B3 moottorin hinnasta ja kaikki loput asettuvat näiden ääripäiden välille. Arviointi tehdään asteikolla 1–9 parivertailuvaiheessa.

	Power kW	kw/kg	RPM	g/kWh	Weight kg	Price Index	Price Index kw	Emission	Rating	100%load+Ann.
B1	809	0,49	2300	215	1660	0,84	0,61	IMO II, EU Stage IIIA	IFN (1/3h)	1/3+unlimited
B2	847	0,47	2300	219,8	1814	0,80	0,55	EPA Tier 3, IMO II, EU IW	E	1/12+<1000
B3	810	0,41	2450	221	1980	1,52	1,10	IMO II, 97/68/EC	Average load: 60 - 80 % of rated power; ICFN, fuel stop; Typical annual usage: 5000 hours*	12/12+<5000
B4	882	0,45	2300	234	1940	1,12	0,75	IMO Tier 2, RCD 94/25/EC, EPA Tier 2, 97/68/EC	<20% at full load, annual h <1000	2/12+<1000
B5	588	0,33	2300	212	1760	1,00	1,00	IMO Tier III	4	1/12+<1000

B1

B2

B3

B4

B5

Kuvassa 2.5.1.2 Moottorivaihtoehdot on nimetty B1-B5 AHP-analyysissä.

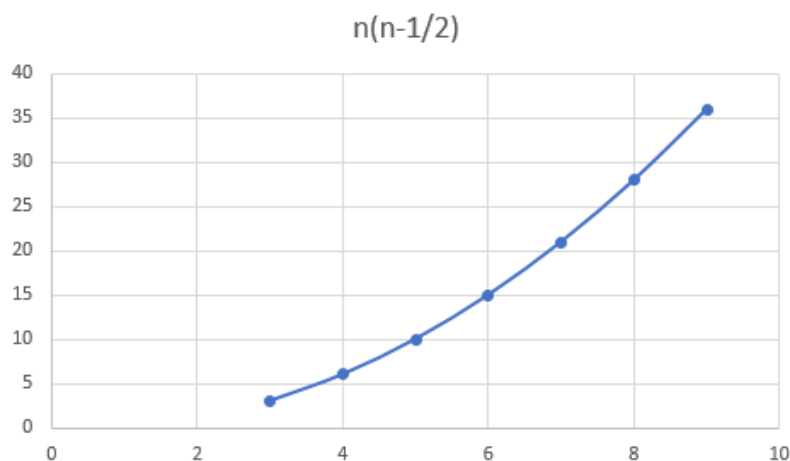
Aluksen kuormauskyky ja hinta ovat tärkeitä suunnitteluparametrejä. Kohdeyrityksessä ei ole aiempaa kokemusta AHP-menetelmän soveltamisesta konseptin valintatyökaluna. Moottoreiden valinta tehdään perinteisesti aiempaan kokemukseen, suorituskykylaskentaan ja hankintahintaan perustuen.

AHP-sovellusesimerkin tavoitteena on löytää kokonaisuutena paras moottorivaihtoehto 600-850kW teholuokassa. Päästövaatimuksena vähintään IMO- tier II tai parempi.

Valintakriteereinä ovat:

- a) **suorituskyky**, jonka mittareina ovat tehopainosuhte, moottorin rating, sekä teho ja paino erikseen.
- b) **hankintahinta**, jonka mittareina ovat lisäksi huoltoverkoston toimivuus, aiempi kokemus moottorista
- c) **Maine/ Brandi**, Tuotteen maine ja arvostus alan piireissä, huoltoverkoston saavutettavuus maailmalla
- d) **Ympäristöystävällisyys**, jonka mittareina ovat päästöluokitus ja polttoaineen kulutus (BSFC)

Analyysin rakenteen mukaan, parivertailujen koot saattavat vaihdella analyysin eri vaiheissa ja tämän vuoksi kyseinen kaava toimii yksinkertaisena tarkastuskeinona, että parivertailun kaikki kombinaatiot on muodostettu.



Kuva 2.5.1.3 Parivertailun laajuuden(kpl) määräytymisperuste valittavien vaihtoehtojen lukumäärän funktiona. Esimerkiksi kuusi eri vaihtoehtoa edellyttää 15 parivertailun tekemistä

AHP-analyysi toteutettiin taulukkolaskentaohjelman avulla. Yksityiskohtaisen AHP-analyysin vaiheet parivertailuineen on Liitteessä VII.

2.5.2. Nettonykyarvolaskenta (NPV)

Nettonykyarvolaskenta, Net Present Value (NPV) -analyysi on käyttökelpoinen menetelmä erityyppisten investointihankkeiden yksinkertaistettuun taloudelliseen mallintamiseen. NPV-menetelmän perusideana on selvittää toisilleen vaihtoehtoisten kassavirtatapahtumien pohjalta, mikä olisi tavoiteltavin toimintatapa sekä kate- ja kustannusrakenne, jotta projektin liiketaloudelliset tavoitteet voisivat toteutua. Analyysin tuloksena voidaan todeta, onko hankkeella taloudellisia edellytyksiä menestyä edes teoriassa. NPV-menetelmä havainnollistaa ajan vaikutuksen projektin kannattavuuteen.

3. TUTKIMUSTULOKSET

Tähän lukuun on koottu sidosryhmäkyselyiden ja kirjallisuustutkimuksen sekä laskennalliset tulokset liittyen tutkimuksen empiirisen osuuden, MBSE-pohjaisen konehuoneen ilmanvaihtojärjestelmän järjestelmämallin kehityksestä.

3.1. Projektin hallintaprosessin kehitys 2018

Raportin alkuperäinen sisältö katselmoitiin tutkimuksen toteutuksen aikana mukana olleiden henkilöiden kanssa: tuotantojohtaja, sähkö- ja konevarustelun esimiehet, suunnittelu- toimintojen esimies, mekaniikka- ja sähkösuunnittelijat, osto- ja hankintapäällikkö.

Suunnittelun ja tuotannon osalta laadittiin oheiset kirjaukset ja korostettuna ovat tämän tutkimuksen kannalta tärkeät havainnot:

- *rungas uudelleen tekeminen / korjaaminen tuotannossa*
- **suunnittelu eteni nopeasti detaljien suunnitteluun, vaikka suuret linjat olivat avoimina**
- *tilavarausten tekeminen konstruktion oli vaikeaa, kun sähkösuunnittelu laahasi jäljessä*
- **Puutteita tuotannollistamisessa, joka olisi vältettävissä, jos tuotannon edustajilla olisi mahdollisuus vaikuttaa suunnitelmiin ajoissa (DFM).** Tuotannon esiin tuomia puutteita ei korjata piirustuksiin. => **samojen vikojen periytyminen seuraavaan alukseen, jos tekijä on eri.**
- **Sisäinen katselmus/etappikäytäntö puuttuu:** design vs. tuotanto
- **Uniikkeja komponentteja joka aluksessa**
- **huono dokumentaatio, ei työohjeita**
- **on luotava ”laatuspeksejä” miten / mitä pitää tehdä**
- *PDM-järjestelmä on otettu käyttöön täysipainoisesti ja nyt on mahdollisuus käyttää jo suunniteltuja osia uudelleen*

Lisäksi alla on palautekeskustelun yhteydessä tehtyjä yksittäisiä kirjauksia, jotka olivat esillä keskusteluissa, mutta eivät koske suoraan KeKo-raporttia:

Suunnitteluvaatimusten hallintaan ei ole käytössä vakioitua menetelmää, käytännöt vaihtelevat suunnittelijoiden keskuudessa. On mahdollista, että kaikkia vaatimuksia ei ole huomioitu oikein.

Systeemikonsepteille ei ole vuosisuunnitelmaa, uudet ratkaisut riippuvat alusprojekteista

Suunnittelulle ei ole määritelty yleisiä tai kategorisia kehitystavoitteita, jotka koskisivat järjestelmäsuunnittelua

Uusien alusprojektien yksittäisten systeemiratkaisujen suunnitleminen, saattaa viedä odotettua enemmän aikaa.

Suunnittelutyön kokonaisfokus ei ole täysin jäsentynyt. ”Uppoudutaan yksityiskohtiin, vaikka iso kuvakaan ei ole vielä selvillä”

Tuotannon tiimivetäjät haluavat aktiivisesti osallistua suunnittelukatselmoiteihin, jottei vanhat tiedossa ja vältettävissä olevat virheet pääsisivät toistumaan.

Konseptointi- ja suunnitteluvaiheiden perusprosessia ei ole kuvattu selvästi, mistä työ alkaa ja mitä tuotoksia pitäisi syntyä.

Tehdyn suunnittelutyön skaalautuvuus (uudelleenkäytettävyys) ei ole suunnitelmallista. Tee-se-itse-kulttuurista löytyy esimerkkejä.

3.2. Kysely ulkoiset sidosryhmät

Kyselyn tulokset ovat koostettuina taulukoissa. Kyselylomakekopio on Liitteessä IX

Taulukko 3.2–1 yhteenveto arvioitsijoiden toimialakokemuksesta.

Arvioitsijoiden toimialakokemusvuodet					
1-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-40
				x	
			x		
		x			
				x	
	x				
					x
x					
					x
x					
			x		

Taulukko 3.2–2 FAT-HAT-SAT asiakirjojen laatu

4 FAT-HAT-SAT vaiheiden asiakirjojen laatu
15 Asiakirjojen valmius ja täsmällisyys katselointitilaisuudessa

	n=6	n=5	n=5	n=4	n=4	n=6	n=5	n=4	n=3	n=3	n=3
5								x		xx	xx
4,5	xxx		xx	xx	x	xxxx	xxx	x	x	x	x
4	x	xxxx	x	xx	x	x	xx	x			
3,5	xx	x	xx		x	x		x	xx		
3					x						
2,5											
2											
1,5											
1											
	Al-työt	Propulsio	Koneisto	LVI	Navi/Comm	Ohjaamo	Sähkö	SAT	PAT	Ohjekirja kansio	käyttäjän käsikirja
Keskiarvo	4,08	3,9	4	4,25	3,75	4,25	4,3	4,25	3,83	4,83	4,83
Keskihajonta	0,45	0,22	0,45	0,25	0,56	0,38	0,24	0,56	0,47	0,24	0,24
kok. KA	4,2										

Taulukko 3.2–3 FAT-HAT-SAT vaiheiden yleisarvosana työn laadusta

3. FAT-HAT-SAT vaiheiden yleisarvosana tehdyn työn laadusta

	n=2	n=2	n=2	n=2	n=3	n=3	n=3	n=2	n=2
5								x	
4,5	x				x	xx	x	x	x
4	x	x	xx	xx		x	xx	x	
3,5					x				x
3		x							
2,5					x				
2									
1,5									
1									
	Al-työt	Propulsio	Koneisto	LVI	Navi/Comm	Ohjaamo	Sähkö	SAT	PAT
Keskiarvo	4,3	3,5	4,0	4,0	3,5	4,3	4,2	4,5	4,0
Keskihajonta	0,25	0,5	0	0	0,5	0,29	0,25	0,25	0,5
kok. KA	4								

Taulukko 3.2–4 Yleisten projektin aikaisten toimintojen arviointi

	Arvioiden KA	n	δ
1. Työmaakousten järjestelyt	4,3	5	0,40
2. FAT-HAT-SAT vaiheiden aikataulutus	4,4	5	0,37
5. Aluskatselointiin valmistautuminen	4,2	3	0,62
6. Muutosten hallinta projektin edetessä	4,4	5	0,37
7. Alusten CoC1- ja CoC2 tarkastukset ja luovutuskäytäntöjen järjestelyt sekä toimivuus	4	3	0,41
8. Takuu- ja reklamaatioasioiden käsittely vuoden 2020 aikana	3,5	4	0,50
9. Ylimääräisten koulutus /harjoitus tms. tilaisuuksien toteutus	4,2	3	0,24
10. Työtilojen turvallisuus ja siisteys	4,4	5	0,58
11. Kokonaisarvio projektin kulusta	4,2	5	0,24

3.3. Kysely sisäiset sidosryhmät

Kyselyn tulokset ovat koostettuina taulukoissa. Kyselylomakekopio on Liitteessä X

Taulukko 3.3–1 Arvioitsijoiden työkokemus alalla

Arvioitsijoiden työkokemus alalla				
0-5	5-10	10-15	15-20	20-30
Vastaaja 1		x		
Vastaaja 2	x			
Vastaaja 3		x		
Vastaaja 4	x			
Vastaaja 5	x			
Vastaaja 6		x		
Vastaaja 7	x			
Vastaaja 8			x	

Taulukko 3.3–2 Yleisten projektin aikaisten toimintojen arviointi

	ka	δ	n
1. Tiedon kulku projektin ja tuotannon välillä	4,06	0,17	8
2. FAT-HAT-SAT vaiheiden aikataulutuksen onnistuminen	4,60	0,37	5
3. Aluskohtaisten aikataulujen pitäminen	4,57	0,42	7
4. Mikä on arviointi käytössä olevan PAT-FAT-HAT-SAT -prosessin hyödyistä projektin aikana	4,63	0,41	8
7. Muutosten hallinta projektin edetessä, kokonaisarvio siitä mikä on MA:n kyky hallita meistä riippumattomia muutoksia	3,75	0,79	8
8. Takuu- ja reklamaatioasioiden käsittely vuoden 2020 aikana, toteuttamisen näkökulmasta	3,93	0,62	7
9. Työtilojen turvallisuus ja siisteys	3,38	0,60	8
10. Kokonaisarvio projektin kulusta	4,06	0,39	8

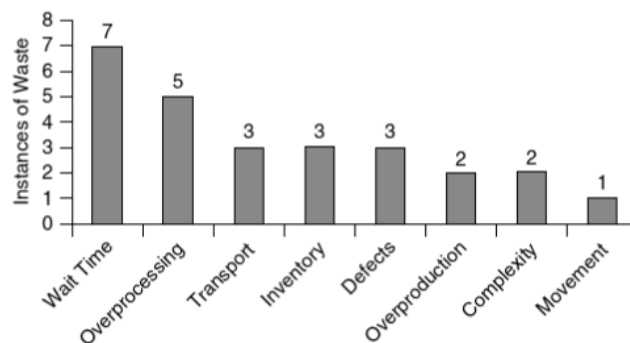
Taulukko 3.3–3 FAT-HAT-SAT-vaiheiden asiakirjojen laatu

	n=2	n=3	n=3	n=3	n=3	n=3	n=3	n=3	n=6
5				1	1	1			
4,5		1	1					1	
4	1	1	2	2	2	2	1	2	4
3,5		1					2		
3									1
2,5									1
2									
1,5	1								
1									
	AI-työt	Propulsio	Koneisto	KaPePa	LVI	Ohjaamo	Sähkö	SAT	PAT
KA	2,75	4,00	4,17	3,25	3,25	3,25	3,67	4,17	3,25
StDev	1,25	0,41	0,24	0,47	0,47	0,47	0,24	0,24	0,61

3.4. Tehottomuus konseptointi- ja suunnittelutehtävissä

Tehottomuus, tai tuttavallisemmin hukka ja sen tunnistaminen on LEAN-oppien eräs keskeisin tavoite. Tyypillisesti hukan tunnistaminen liitetään ainoastaan valmistavan teollisuuden prosessien yhteyteen, i kuin sitä ei löytyisi muualta organisaatiosta. Kirjassaan **Bohdan W. Oppenheim**. *LEAN for Systems Engineering with LEAN Enablers for Systems Engineering* [26, s 46] käsittelee aihetta tarkemmin.

Järjestelmätekniikka ja tuotekehitys ovat tiukasti sidoksissa toisiinsa eikä näitä ole syytä erottaa toisistaan, kun käsitellään tuotekehitysprojekteissa runsaasti esiintyvää hukkaa sen eri muodoissaan [26]. Ensimmäisenä mainitaan ” *craft mentality, tee-se-itse*”, eli suunnitteleluinsinööreillä on taipumus nähdä asiat ”*erikoisina tai erityisinä*”. Tästä syystä he alkavat luomaan niihin omia erikoisia ja ainutlaatuisia ratkaisujaan sen asemesta, että nämä ratkaisut syntyisivät vakiintuneimpien ja aiemmin tunnettujen prosessien kautta [26]. Tähän ilmiöön usein yhdistyy alun perinkin huono suunnittelu ja valmistautuminen koko hankkeeseen. Projektissa tehdään alkumetreistä lähtien ratkaisevan tärkeitä päätöksiä ad-hoc -henkisesti yhdistettynä huonoon viestintä- ja yhteistyökulttuuriin [26]. Kuvassa (3.4.1) on yhteenveto 27* ilmailualan kehitysohjelmien yhteydessä tutkituista ja havaituista hukan muodoista ja jakautumisesta [26]. Oikean tiedon puuttuminen on luokiteltu kaikkein suurimmaksi kustannuksia nostavaksi tekijäksi. Joko ihmiset odottavat tietoa tai tieto odottaa ihmisiä [26].



Kuva 3.4.1 Hukan ilmenemismuodot 27* eri ilmailualan kehitysohjelmassa [26, s 46]

(*kirjan taulukossa ja taulukon kuvatekstissä on ristiriita, taulukossa on ainoastaan 26 havaintoa, sen tekstissä mainitaan 27)

On merkille pantavaa, että kaksi suurinta havaintoryhmää, eli **odotusaika** ja sen vastakohta **ylisuorittaminen** edustavat yhdessä 46 % kaikesta havaitusta hukasta. Toisin sanoen vaikuttamalla primäärisesti näihin kahteen tekijään, on odotettavissa kaikkein suurin tuottavuusloikka suunnittelussa.

Lopulta toimimaton ja tuottamattoman systeemi on hukan kaikkein pahin ja kallein ilmene-
mismuoto [26, s.48]. Kohdeyrityksen KeKo-2018 raportissa esiin tuodut seikat eivät ole ai-
nutlaatuisia valmistavan teollisuuden piirissä.

Toyota Production System [44 s.18] esittää, että hukan eliminointi on prioriteetilta korkein
eliminoitava kustannustekijä, koska: $\text{voitto} = \text{tulot} - \text{kustannukset}$

LEAN:n *hukan* (engl. *waste*) muodot ovat: 1) *ylituotanto*, 2) *yliprosessointi*, 3) *Liike*, 4) *Kul-
jetus*, 5) *vialliset kappaleet*, 6) *varastointi*, 7) *odottaminen*. 8) Nykyisin LEAN -aiheisissa kou-
lutusaineistoissa edellä mainittua listaa on täydennetty vielä kahdeksannella hukalla, joka
on *käyttämätön osaaminen*.

Haettaessa vertailukohtaa kohdeyrityksessä esiin tulleille suunnittelutoimintojen kehitys-
kohteille, kirjallisuudesta löytyy vastaavanlaisia esimerkkejä, joiden avulla voidaan taustoit-
taa syntyvien ongelmien alkuperää.

Toisessa selvityksessä *Advances in System Engineering* teoksessa (John Hsu et. al 2017)
[32, s 271] listataan usean sadan kokeneen pääinsinööriä ja ohjelmapäälliköllä teetetyn
kyselyn tulos, miten vesitetään menestyksen edellytykset kehityshankkeen alkutaipaleella,
vaikka yrityksen muuten menestyksekkäät suunnittelukäytännöt olisivatkin muodollisesti
hallinnassa [32].

Alla olevat kymmenen kohtaa ovat tuon kyselyn lopputulos: [32].

1. *Reaktiivinen kehityshankkeen toteutus*
2. *Vaatimusten selkeys, valmiusaste on puutteellista sekä lisäksi ovat ailahtelevia*
3. *Yritysten välisen yhteistyön koordinointi on puutteellista*
4. *Yritysten väliset arvovirrat eivät ole keskenään optimoituja*
5. *Roolit ja vastuut ovat epäselvät*
6. *Riittämättömät tiimityötaidot, tehoton toimintakulttuuri ja työskentelytapa*
7. *Riittämätön kehityshankkeen suunnittelu*
8. *Epäkelpo metriikka ja mittarit*
9. *Kehityshankkeen johdon ennakoimaton ja leväperäinen toiminta riskien ja epävar-
muuksien hoitamisessa*
10. *Kehityshankkeen heikot hankinta- ja sopimuskäytännöt*

Projektin selkeä *pää tavoitteen kuvaus* ohjaa prosessia kehitystiimien keskuudessa, kun on
esimerkiksi ratkaistavana yksityiskohtaisiin prioriteetteihin liittyviä kysymyksiä [32].

John Hsu et. al. 2017 [32] esittää, että kehittäminen pitäisi jakaa yrityksessä kolmeen erilliseen vaiheeseen:

- 1) Tutkimiseen / tutkimuksiin (yrityksen sisällä ja / tai yhdessä tutkimusinstituutioiden kanssa)
- 2) Kehittämiseen / kokeiluun
- 3) Suunnitteluun

Tutkiminen tarkoittaa pienyritykselle käytännössä tiivistä perustieteellistä yhteistyötä oman alan korkeakoulujen ja yliopistojen kanssa. Hankkeet ovat usein aikaa vieviä ja tutkimukset saattavat vaatia pitkälle kehittyneitä laitteita ja mittavälineitä. [32]. Kehitysvaiheessa tuotetaan toimivia moduleita ja kokeilukappaleita tutkimustulosten hedelmistä. Näitä malleja voidaan testata ja pakata erilaisiin konfiguraatioihin [32]. Suunnittelutiimi optimoi valmiiksi testatun modulin tai kaupallisen tuotteen käsillä olevan projektin tarpeisiin, esimerkiksi muodon, painon, tehon tarpeen suhteessa tarvittavaan suorituskykyyn [32].

3.5. Konseptointisuunnittelun tehtäväkenttä

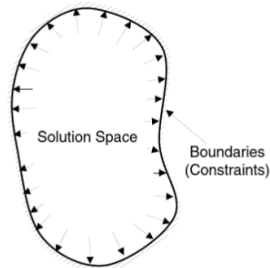
Mitä on konseptointisuunnittelu?

Kaksi tuotetta on valmistettu samaan käyttötarkoitukseen, toisessa tuotteessa on ennestään tuttu toiminto tai ominaisuus, joka on toteutettu uudella ja innovatiivisella tavalla. Voidaan sanoa, että tuotteessa on otettu käyttöön uusi innovatiivinen ratkaisu tai konsepti [15].

Tuore esimerkki on erään tunnetun perämoottorivalmistajan alkuvuodesta 2021 lanseeraama 600 hevosvoimainen V12 perämoottori, jossa on tuplapotkurillinen vetolaitteisto, ns. azipod-tyyppisellä alavaihteella, sekä kaksiportaisella vaihteistolla.

Markkinoille on syntynyt kokonaan uusi perämoottorikonsepti. On mahdollista, että kyseinen tuotemerkki vankistaa markkina-asemaansa ja etumatkaansa kilpailijoihin nähden innovatiivisuutensa ansiosta. Onnistuneella konseptointisuunnittelulla voi olla siis yrityksen elinkaaren aikana huomattavia ja kauaskantoisia vaikutuksia. Konseptointisuunnittelun kaikkein tärkein yksittäinen vaihe on ymmärtää oikein tehtävän asettajan tai käyttäjien todellinen tarve [15]. Konseptointisuunnittelussa ratkotaan joko perinteisiä tai kokonaan uusia ongelmia uudella ja innovatiivisella tavalla tuottamalla asetettuun tehtävään uusi luova ratkaisu [15]. Konseptointisuunnitteluvaiheessa on mahdollisuus vaikuttaa kyseessä olevan järjestelmän rakenteeseen, modulaarisuuteen, järjestelmäarkkitehtuuriin [17] tai systeemi-

integraation tasoon [18]. Kuvassa 3.5.1 havainnollistetaan miten rajoitteet kaventavat suunnittelun käytettävissä olevaa tilaa.



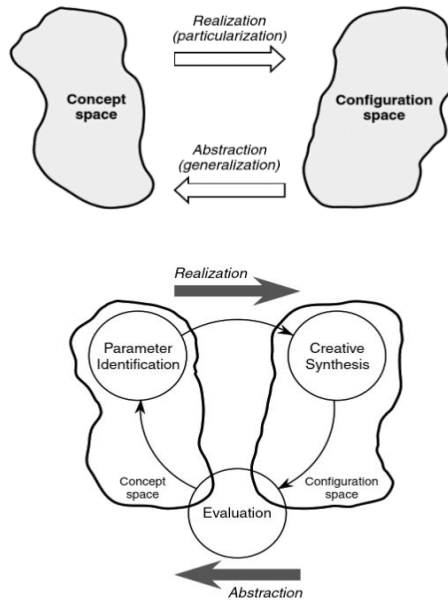
Kuva 3.5.1 Rajoitukset määrittävät käytettävissä olevan ratkaisutilan [15, sivu 21]

Konseptointisuunnittelu on työtapana abstrakti verrattuna tilanteeseen, että on täysin valmis spesifikaatio käytettävissä. Suunnittelijan ei tällöin tarvitse kiinnittää erityishuomiota asioiden välisiin riippuvuussuhteisiin. Kroll, Ehad, et al. 2001 [15] havainnollistavat asian oheisen kuvan 3.5.2 mukaisesti. Vaatimukset määrittävät oleelliset parametrit, joiden avulla voi esimerkiksi suorittaa käytännön kokeita ja evaluoida tehtyjen kokeiden tuloksia. Suunnittelija vaihtaa työskentelymoodiaan abstraktista ajattelusta vuoroin konkretian puolelle ja päinvastoin. Pyster, Arthur, et al 2018 [53, s18] Listaavat hyvälle systeemi-insinöörille kuusi ominaisuutta:

1. *Ylläpitää systeemin isoa kuvaa, ymmärtää riippuvuussuhteet ja merkitykset*
2. *Osaa kääntää teknisen slangin business kielelle ja päinvastoin.*
3. *Edesauttaa monenkirjavia tiimejä saavuttamaan menestyksen. Tuntee tiimin jäsenet ja heidän vahvuutensa*
4. *Hallinnoi projektien ja järjestelmien syntyä, luo positiivista kuvaa tulevaisuudesta, vähemmän negatiivista.*
5. *Edistää hyvää teknistä systeemitason päätöksentekoa*
6. *Tukee systeemin business case:a, osaa tasapainoilla tiukan projektiaikataulun, kustannusten ja teknisten vaatimusten rajamailla.*

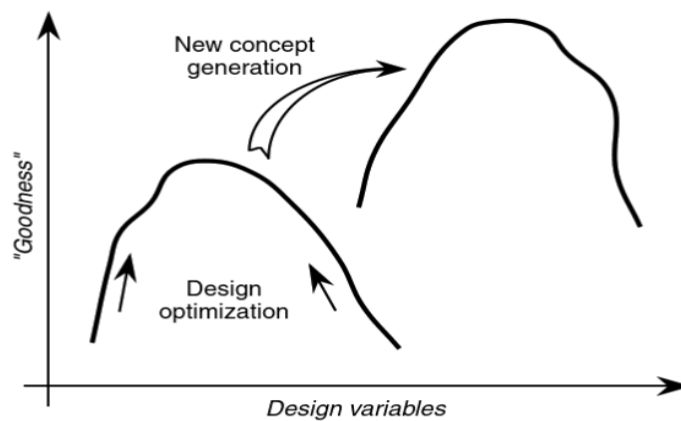
Nämä edellä mainitut ominaisuudet edesauttavat suoriutumaan monimutkaisista ja abstrakteista ongelmatilanteista, joita konseptisuunnittelu lähtökohtaisesti pitää sisällään. Rutinointuneella ja kaavamaisella ajattelulla ei kyetä vaihtamaan näkökulmaa ongelmaan, tilanteessa, jolloin ensimmäinen kokeiltu ratkaisumalli ei toimikaan. Konseptointisuunnittelun tärkein yksittäinen vaihe on ymmärtää oikein tehtävän asettajan tai käyttäjien todellinen tarve [15]. Asiakkaan tarpeiden huolellinen analysointi ja ymmärtäminen mahdollistaa

hyvien ja oikein priorisoitujen suunnitteluaineistojen laatimisen. Tarveanalyysin tavoitteena on laajentaa mahdollisten ratkaisujen tilaa vaatimusten rajoissa [15].



Kuva 3.5.2 Konseptointityön teoreettinen malli, jossa suunnittelijan pitää hallita työskentely vuoroin abstrakti- ja konkretiatasojen välillä [15 sivu 62, 66]

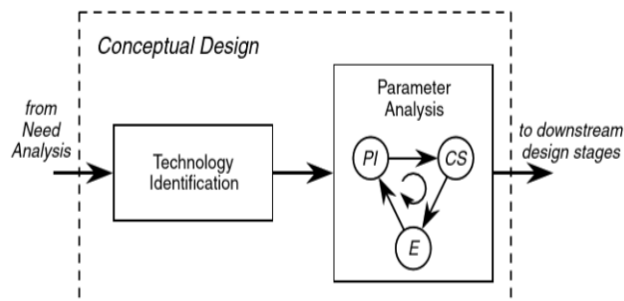
Suunnittelijoilla saattaa olla taipumus aloittaa asetetun ongelman ratkaiseminen, ilman että ensin on pohdittu syvällisemmin varsinaista ongelmaa ja sen vaihtoehtoisia ratkaisutapoja kokonaistarve huomioiden [15].



Kuva 3.5.3 Uusi konsepti vie kehitystä kokonaan uudelle tasolle. [15 sivu 57]

Kuvassa 3.5.3 Kroll, Ehad, et al. 2001, korostavat sitä, että konseptointisuunnittelussa noustaan uudelle suoritusasteelle, kun tavoitellaan uusia vaatimuksia. Lisäksi ihmiset ovat luovimmillaan ratkoessaan yksinkertaisia ongelmia. Yksinkertaiset ratkaisut ovat usein konseptillisesti kaikkein parhaita [15].

Kroll, Ehad, et al. 2001, esittävät siis luovaan konseptointisuunnittelun parametrianalyysia ja oheisen kuvan 3.5.4 mukaista prosessia. Tarpeen määrittäminen rajaa valittavat teknologiat. Tämän jälkeen asiaa prosessoidaan vuoroin abstraktilla konseptitasolla, vuoroin kokeilevalla konfiguraatiotasolla. Suunnitteluparametrin tunnistaminen (PI), luova synteesi (CS), evaluointivaihe (E).



Kuva 3.5.4 Tarveohjautunut konseptointiprosessi alkaa sopivan teknologian valinnalla [15 sivu 72]

Parametrianalyysin perustuvan konseptointisuunnittelun yhteenveto [15]:

- Suunnittelun jokaisen konfiguraatiomäärittelyn takana on oltava käsitteellinen syy tai perustelu.
- Laadukkaan suunnittelun kehittäminen edellyttää keskittymistä yhteen tai enintään muutamiin kriittisiin käsitteellisiin kysymyksiin kerrallaan.
- Konseptisuunnittelun luovin näkökohta ei ole uuden kokoonpanon keksiminen, vaan suunnittelijan kyky löytää käsitteellisesti uusi tapa tarkastella tuttua ongelmaa.
- Hyvän konseptisuunnittelun avain on taustalla vaikuttavan fysiikan perusteellinen tuntemus.
- Hyvä design on tulosta joukosta hyviä ideoita tai konsepteja, ei ainoastaan yhtä hyvää ideaa.

Olemassa olevien tuotteiden analysoiminen on tästä näkökulmasta katsottuna suositeltavaa entistä paremman konseptisuunnittelun kannalta; parhaimmillaan siinä paljastuu analysoitavien tuotteiden kokoonpanon, rakenteen ja fysiikan lainalaisuudet [15].

Konseptointisuunnittelun yhteydessä esiintyvään kasvavaan monimutkaisuuteen on kiinnitetty kasvavaa huomiota. Henrique M. Gaspar et.al 2012 Handling Complexity Aspects in Conceptual Ship Design [17, s 4] esittävät ratkaisuksi monimutkaisuuden hallintaan hajottamista ja kapselointia, jota voidaan suorittaa eri näkökohdista katsottuna erimenetelmin. Taulukossa 3.5.2–1 on yhteenveto tästä.

Taulukko 3.5.2–1 *Systeemi voidaan ensin purkaa ja uudelleen kapseloida eri näkökohdista katsottuna. Systeemin rakenteellinen pilkkominen määrittelee järjestelmän arkkitehtuurin, modulaarisuuden ja integraation perustason Tarkastelu kattaa systeemin koko elinkaaren [17].*

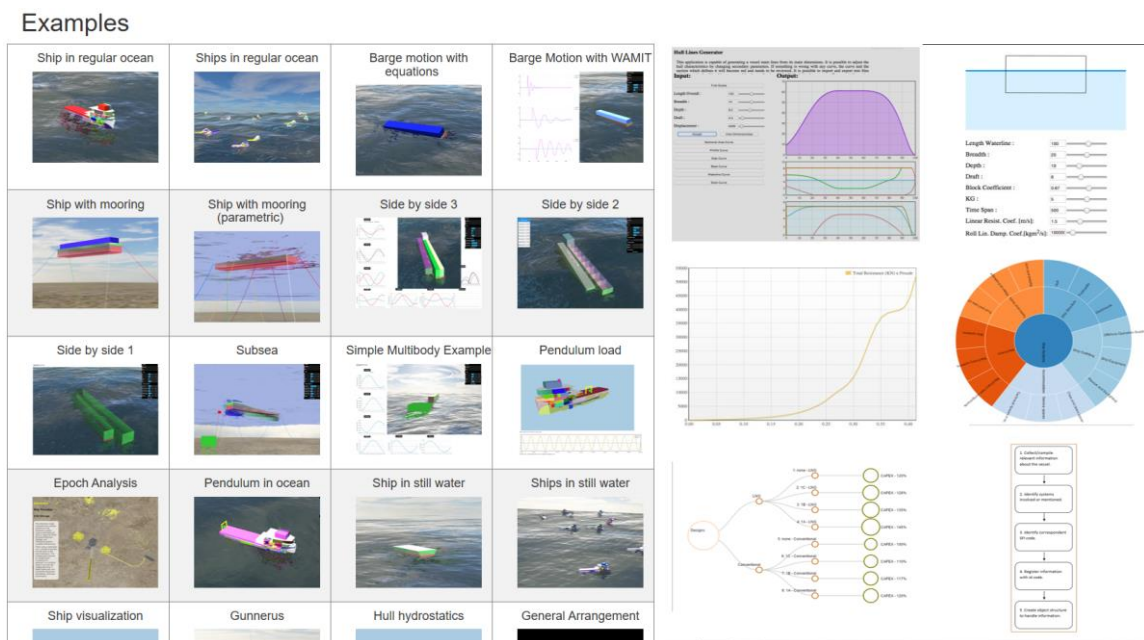
Näkökohta	Purkaminen	Kapselointi	Esimerkki
Rakenteellinen	<i>Modularisointi tunnistaa läheiset itsenäiset moduulit. Määrittelee moduulin määrittelykriteerit</i>	<i>Modularisointi määrittelee i/o-rajapinnat moduuleille</i>	<i>Rakennusmoduulipohjainen suunnittelu, systeemipohjainen suunnittelu, rakenteen monimutkaisuuden arviointi</i>
Ominaisuuspohjainen	<i>Toiminnallinen eriyttäminen. Systeemin pilkkominen alisysteemeihin</i>	<i>Simulointidatan tallentaminen</i>	<i>Systeemipohjainen alussuunnittelu</i>
Asian yhteyteen liittyvä	<i>Ota huomioon aluksen käyttöprofiileita</i>	<i>Standardit ja kustomoidut käyttöprofiilit</i>	<i>Riskianalyysi, aikausanalyysi</i>
Ajallinen	<i>Jaa elinkaari aikakausiksi. Jokainen aikakausi edustaa otosta elinkaaresta</i>	<i>Aikakaudet kapseloivat muutokset ja epävarmuudet, aikajakset otetut aikakaudet</i>	<i>Elinkaariarviointi, ajallinen epävarmuus, arvopohjainen muutettavuusanalyysi</i>
Havainnollinen	<i>Vaatimusten selvittäminen eri sidosryhmille</i>	<i>Monitavoitteiset menetelmät kuten AHP ja pareto</i>	<i>Monitavoitteiset menetelmät. AHP ja pisteyttämistoiminnot. Reagoivat järjestelmien vertailumenetelmät</i>

Konseptitason järjestelmäarkkitehtuurilla on iso vaikutus järjestelmään syntyvien rajapintojen lukumäärään, jotka taas vaikuttavat myöhemmin verifiointi- ja validointivaiheissa. Monimutkaisissa järjestelmissä yksittäisten systeemelementtien lukumäärä määräytyy siinä olevien elementtien mukaan seuraavasti $n(n-1)/2^*$ [32, s.277]. (* huomaa tämä on sama kaava, kuin AHP-menetelmän parivertailujen määrän muodostumisperusteella)

Konseptointisuunnitteluvaiheessa otetaan kantaa systeemin kaikkiin neljään mallipohjaisen järjestelmäsuunnittelun mukaisiin osiin: vaatimuksiin, laskentaparametriin, toimintaperiaatteeseen ja rakenteeseen.

Kuvassa 3.5.5. on eräs esimerkki nykyaikaisesta parametripohjaisesta konseptointisuunnitteluun sopivasta ratkaisusta. Ålesundssa sijaitsevan Norjan tiede- ja teknologiayliopiston (NTNU) kehittämästä malli- ja parametripohjaisesta (web/java) suunnitteluympäristöstä konseptointisuunnittelun tarpeisiin. Järjestelmämallin avulla voidaan nopeasti analysoida yhden tai useamman muuttajan vaikutus kokonaisuuteen.

Virtuaalisten laivamallien avulla voidaan simuloida rungon hydrodynaamista käyttäytymistä. Tutkimusyksikön laivamallikirjasto sisältää menetelmiä hydrostaattisiin ja stabiiliuslaskelmiin [54].



Kuva 3.5.5. web-pohjainen mallinnustyökalu aluksen hydrodynaamisten ja stabiiliuteen liittyvien kysymysten ratkaisemiseksi [56, <http://www.shiplab.hials.org/>]

3.5.1. Tarpeiden analysointi konseptointisuunnittelussa

Yritykset määrittelevät itsensä usein valmistettavien tuotteidensa kautta, eivätkä niiden tarpeiden perusteella, joiden vuoksi tuotteet ovat olemassa [15, s 9]. Tämä johtaa ennen pitkää näköalattomuuteen tarpeiden ja markkinoiden ymmärtämisessä. Kun tuotteet aikanaan

vanhenevat, pahimmillaan vanhenee yrityskin maailman muuttuessa ympärillä, esimerkkeinä vaikkapa edesmenneet toimistotyökalut kuten kirjoituskone [15]

Ehud Kroll et al. ehdottavatkin ns. *black-box-menetelmän* soveltamista, jossa tuote nähdään pelkkänä mustana laatikkona, johon tulee input / output -rajapinnat. Nämä tulot ja lähdöt ovat käytännössä *energiaa, tietoa tai materiaa*. Näistä lähtökohdista laaditaan varsinainen vaatimuslista mitä oikeasti tarvitaan. Kun kyseinen tuote on tällä tavoin analysoitu, voidaan taulukoida alkuperäinen toteutusidea ja pohtia samalla vaihtoehtoisia ratkaisuja, kun tarve on suunnittelutiimin kesken selkiytynyt [15].

Tarveanalyysin päähuomio on **toiminnoissa** ja **rajoitteissa** [15]. Rajoitteet voidaan jakaa *eksplisiittisiin* ja *implisiittisiin* ryhmiin. Ensin mainitut tulevat annettuina ja ne pitäisi havaita jo tarveanalyysin alussa. Jälkimmäiset ovat vaikeammin hahmotettavia ja saattavat ilmaantua vasta kehitystyön edetessä [15]. Tarveanalyysi pitää yrityksessä nähdä eräänlaisena löytöretkiprosessina, jossa löydetään mielenkiintoisia näköaloja kehitteillä olevaan tuotteeseen sekä huomataan kriittisen tärkeitä yksityiskohtia [15]. Löytöretkiprosessi on jaettavissa viiteen alla olevaan yleispätevään kategoriaan. Eräs suositeltava käytäntö tarveanalyysin tekemiseksi on listata etukäteen kysymyksiä näiden viiden kategorian alle ja käsitellä ne kootusti suunnittelutiimin kanssa, jotta kaikilla on sama selkeä käsitys kaikista tarpeista ja vaatimuksista [15].

I. Suorituskyvyn merkitys tarveanalyysissä

Tämä tarkoittaa suunniteltavan tuotteen toimintaan ja toiminnallisuuteen liittyvien funktioiden eriyttäminen ja niiden kunkin suorituskyvyn arviointia. Suunnittelutiimin epäonnistuminen rakenteen jäsentämisessä voi aiheuttaa projektille hankalia ristiriitatilanteita ja aikatauluviivästyksiä myöhemmin, kun toimintojen väliset rajallisuudet ilmenevät yllättäen [15].

Uuden ennalta tuntemattoman teknologian käyttöönotto lisää entisestään projektin riskejä suunniteltavan tuotteen suorituskyvyn osalta [15].

II. Arvon merkitys tarveanalyysissä

Arvolla tarkoitetaan ensisijaisesti alkuperäisiin asiakkaan tarpeisiin pohjautuvaa arvoa. Tuotteen suorituskyky ja sen arvo ovat tyypillisesti vahvasti sidoksissa toisiinsa, päinvastoin, tuotteen matala arvo ja sen alhainen suorituskyky tavataan usein yhdessä [15]. Valmistajaa kiinnostavat yritysarvoa kuvaavat avainmittarit ovat esimerkiksi pääomakulut, tuotto (ROI) ja esimerkiksi investoinnin takaisinmaksuaika. Yritys joutuu tasapainoilemaan

tuotteen asiakkaalleen tuoman arvon ja sen valmistamiseen käytetyn kustannusrakenteen välillä päivittäin [15].

III. Koon merkitys tarveanalyysissä

Koolla tarkoitetaan tässä yhteydessä kaikkea mikä liittyy tuotteen kokoon, mittoihin, muotoon ja painoon. Tässä aihekokonaisuudessa suunnittelijoilla on tyypillisesti eniten ennakoideoita, -oletuksia ja vääristyneitä kuvitelmia [15]. Mikäli näitä fyysisiä rajoitteita ei riittävästi huomioida suunnittelun alkaessa, saatetaan kohdata huomattaviakin uusia ongelmia myöhempiä vaatimuksia täytettäessä [15].

IV. Turvallisuuden merkitys tarveanalyysissä

Turvallisuuden huomioiminen tuotteiden suunnittelun ja valmistamisen yhteydessä on nykyisin tärkeämmässä roolissa [15]. Työ- ja laiteturvallisuus muodostavat työyhteisöille keskeisen osa-alueen vaatimuksineen. Laittevalmistajilla teknisten ja samalla taloudellisten riskien hallinta korostuu. Tässä yhteydessä riskien hallinta on tarkoituksenmukaista ulottaa systeemisuunnitteluun, jossa systeemitasolla voidaan varmistaa toimintojen kahdentaminen, redundanttisuus ja hallittu vikaantuminen [15]. Samalla tulee huolehdittua mahdollisten taloudellisten riskien hallinnasta elinkaaren aikana.

V. Erityisvaatimusten merkitys tarveanalyysissä.

Tähän kategoriaan kuuluvat esimerkiksi ympäristön, markkinatilanteen ja lakisäätteisten sääntöjen ja määräysten huomioiminen [15].

Tarveanalyysin lopuksi on hyvä laatia kompromissianalyysi kriittisten parametrien kesken [15]. Konseptointisuunnittelun aikana joudutaan usein ottamaan kantaa tavoiteltavaan järjestelmäarkkitehtuuriin ja sen myötä systeemi-integraatioihin. Joshua Logan Grumbach et. al 2020 [18] tutkivat monimutkaisten järjestelmien integrointia. He kokosivat poikkitieteellisen tausta-aineiston yli 80 artikkelista hakusanoilla *hierarchy, modularity, integration ja reuse*. Tekemässään kirjallisuuskatsauksessa he löysivät kuusi keskeistä periaatetta systeemi-integraatiolle [18]:

- 1. Hierarkian periaate*
- 2. Hierarkisen verifiointin periaate*
- 3. Riippuvuuden periaate*
- 4. Uudelleenkäytettävyyden ja kehittyvyyden periaate*

5. *Oivalluksen periaate*

6. *Optimoinnin periaate*

Ensimmäinen periaate tarkoittaa monimutkaista järjestelmää, joka koostuu kiinteistä ja vaikeista alijärjestelmistä, jolla on selkeät rajapinnat.

Toisessa periaatteessa edellytetään järjestelmän huolellista verifiointia ennen etenemistä seuraavalle tasolle.

Kolmas periaate edellyttää alhaalta ylös kulkevaa merkittävää monimutkaisten järjestelmien keskinäistä riippuvuutta, joka vaikuttaa kokonaisuutena integraatiossa, eikä sitä näin ollen voi purkaa.

Neljännessä periaatteessa tunnistetaan mahdollisuus hankkia tarvittava valmiiksi saatavilla oleva komponentti tai alikokoonpanot muilla keinoin kuin kehittämällä ne itse tyhjästä (huom. tee-se-itse-kulttuuri).

Viidennen periaatteen taustalla vaikuttaa henkilönä huipputason integraattori, joka ymmärtää koko integrointiprosessin yksityiskohtia myöten.

Kuudennella periaatteella ymmärretään systeemiin ja systeemistä lähtevän tietovuon rajoittamista minimiin. Kaikki ylimääräinen aiheuttaa pelkästään lisäkustannuksia [18].

3.5.2. Kustomointi ja massaräätälöinti

Suunniteltavan aluksen sarjakoon ollessa yksi tai kaksi on selvää, että suunnittelutyön osuus aluksen hinnasta on merkittävä verrattuna isompiin esimerkiksi kymmenen aluksen sarjoihin. Hankinnoissa tai valmistuksessa ei voida täysimääräisesti hyödyntää suurempien sarjojen tuomaa skaalaetua. Valtaosa työajasta kuluu valmisteleviin aputöihin valmistamisen asemesta. Varsinainen jalostavan työn osuus jää siis kaikissa vaiheissa vähemmistöön suhteessa kokonaisuuteen. kilpailutilanteen takia, kustannusten siirto sellaisenaan hintoihin ei useinkaan ole mahdollista. Tällöin ratkaisua on etsittävä aiemmin tehdyn suunnittelutyön hyödyntämisestä, suunnittelukäytännöistä ja sen tuottavuudesta, uusista innovaatioista, suunniteltujen ratkaisujen modulaarisuudesta, ja niin edelleen.

Yrityksen pitää jatkuvasti kehittää sen kykyä tunnistaa asiakkaidensa tarpeita, tuntea kilpailutilanteensa, määritellä tuotteidensa tavoiteltu laatutaso, suunnitella toteuttamiskelpoisia ratkaisuja ja rakenteita sekä viedä kehitysprosessit nopeasti läpi [16].

Massakustomointi on paljon tutkittu valmistavan teollisuuden osa-alue. Scopus -tietokannasta löytyy yli 4900 artikkelia haulla ”*mass customization*”. Suomalainen teollisuus pystyy tänä päivänä vähenevässä määrin kilpailemaan kotimaasta käsin maailman suurimpien sarjavalmistusmaiden kanssa.

Kilpailutilanne muuttuu markkinoilla jatkuvasti ja tämän vuoksi valmistajien nopea kyky sopeutua uuteen markkinatilanteeseen on kilpailuetu.[16]. Massakustomoinnin ansiosta yrityksellä on valmiina sekä ulkoiset, että sisäiset vaatimukset täyttäviä ja testattuja modulaarisia ratkaisuja [16].

Modularisoidun tuotteen tavoitteena on täyttää asiakkaan vaatimukset ja tarpeet nopeasti ja kustannustehokkaasti [16].

Kari Tuominen et. al kuvaavat kirjassaan *Competitive Advantage through Mass-Customization* variaatioiden haitallista vaikutusta yrityksen toimintaan oheisen taulukon avulla. Taulukko havainnollistaa periaatetasolla, miten tehokkuus putoaa ja yksikköhinta kasvaa variaatioiden määrän lisääntyessä [16].

Taulukko 3.5.2–1 Variaatioiden määrä ajaa tuottavuutta laskuun ja yksikköhintaa ylöspäin [16, s. 11]

<i>Variaatioindeksi</i>	<i>Tuottavuus</i>	<i>Yksikköhinta</i>
1	100	100
2	76	120
4	57	145

Kasvava variaatioiden määrä vaikuttaa heikentävästi tuottavuuteen. Esimerkiksi valmistusprosessien kontrollointi mutkistuu ja tämä vaikuttaa epäsuorasti laaduntuottokykyyn. Suurempi variaatioiden määrä edellyttää kattavampaa varastotoimintaa. Usein työkalujen ja menetelmien määrä lisääntyy sitoen entistä enemmän pääomaa. Lisäksi tarvitaan erilaisia henkilökompetensseja kaiken tämän hallinnointiin, joka jälleen johtaa kiinteiden kulujen kasvuun. Alhaisempi tuottavuus ajaa yrityksen kustannusrakennetta ylöspäin [16].

3.5.3. Avoin arkkitehtuuri ja modulaarisuus

Järjestelmäarkkitehtuurilla on mahdollisuus vaikuttaa systeemin eri toimintojen integraatioon, modulaarisuuteen ja rajapintoihin [17],[18]. Valituilla ratkaisuilla vaikutetaan koko

systemin elinkaaren ajan. Kohdeyrityksen toimiala huomioiden esimerkiksi Yhdysvaltojen puolustushallinto soveltaa modulaarista avoimen järjestelmäarkkitehtuurin lähestymistapaa (MOSA, Modular Open System Architecture). Tämä lähestymistapa yhdistää tekniset vaatimukset sopimusmekanismeihin ja oikeudellisiin näkökohtiin tukeakseen valmiuksien ja tekniikoiden nopeampaa kehitystä tuotteen koko elinkaaren ajan käyttämällä arkkitehtuurimodulaarisuutta, avoimia järjestelmästandardeja ja asianmukaisia liiketoimintakäytäntöjä.[35] MOSA:n avulla saatavina hyötyinä tavoitellaan kustannussäästöjä tai kustannusten eliminointia, tarkempia projektien toteutusaikatauluja, nopeampaa uuden teknologian käyttöönottoa ja parempaa järjestelmien keskinäistä yhteensopivuutta [35].

Kohdeyrityksen toimialana on alustoimitukset Merivoimille. Suomi ei ole täysimääräinen NATO-jäsen, mutta Puolustusvoimat osallistuu säännöllisesti NATO-kumppanuus sotaharjoituksiin Suomessa, Itämerellä ja Pohjoismaissa. Kumppanuusohjelman alla on erillisiä ohjelmia, joissa arvioidaan mm. liittoutumattomien maiden kuten Suomen, kaluston operatiivisia kyvykkyyttä [33].

MOSA rakentuu vahvan prosessikehityksen ja standardoidun järjestelmätekniikan osaamisen päälle. Mahdollistavia tukipilareita ovat: mahdollistava toimintaympäristö, modulaarinen suunnittelu, tärkeimmät rajapinnat, avoimet standardit ja varmennettu vaatimustenmukaisuus [35]. Yhdysvaltojen puolustushallinto on toimenpannut MOSA-lähestymistapaa kaikissa järjestelmähankinnoissaan viimeisen 20 vuoden aikana [34, s. 2]. Siirtyminen joustamattomista ja suljetuista järjestelmistä kohti avoimen arkkitehtuurin ratkaisuja on ollut systemaattista. Tavoitteena on järjestelmien elinkaaren aikainen kustannus- tehokkuus [34]. Arkkitehtuuri toimii suunnitelmana tuotteen tai järjestelmän kehittämiseen ja ylläpitoon sen koko elinkaaren ajan. Modulaarisen arkkitehtuurin luominen vaatii systeemin pilkkomisen toiminnallisiin kokonaisuuksiin. Nämä kokonaisuudet toimivat järjestelmän rakennuselementteinä [34, s. 13].

Toiminnallinen pilkkomisprosessi on ensiarvoisen tärkeä modulaarisen lähestymistavan toteuttamisessa. Toiminnallinen pilkkominen / erottaminen poistaa tarpeettomat rajapinnat, mikä helpottaa standardointityötä sopivien rajapintojen tunnistamiseksi [35].

Kari Tuominen et. al. 2014 [16] kuvaavat modulaarisuuden tuomia etuja massaräätälöinnin yhteydessä lyhyesti näin: ” *suurin mahdollinen tuotetarjonta pienimmällä mahdollisella moduulien määrällä. Kyky vastata asiakasvaatimuksiin nopeasti ja kustannustehokkaasti*”

Liitteessä XI on yhteenveto modulaarisuuteen liittyvästä terminologiasta [34, s 14].

3.5.4. Merenkulun kattojärjestöt

Merenkulun sääntö- ja määräyspohjan sekä siihen kuuluvien organisaatioiden perustason tunteminen on yksi laivasuunnittelutoimintojen lähtökohdista. Merenkulun turvallisuus ja siihen liittyvä sääntöpohja toimivat alussuunnittelun perustana. Luokitusyhteisö valvoo säännösten toimeenpanoa. Tekstipohjaiset aineistot ovat laiva- ja alussuunnittelijoiden lähdeaineistoa. Säännöt uusiutuvat pitkälti merellä tapahtuneiden onnettomuusanalyysien pohjalta.

International Maritime Organization, IMO

IMO (1982) on YK:n alainen kansainvälinen merenkulun kattojärjestö. Suurin osa IMO:n alaisista ja hyväksytyistä tai järjestön muutoin vastuulla olevista sopimuksista jaetaan **kolmeen** pääryhmään. **Ensimmäinen** ryhmä käsittelee meriturvallisuutta (SOLAS), **toinen** ryhmä koskee meren pilaantumisen ehkäisemistä (MARPOL) ja **kolmas** (COLREG) vastuuseen ja korvauksiin, erityisesti pilaantumisen aiheuttamien vahinkojen osalta. Merenkulun turvallisuus on tärkein IMO:n alainen vastuualue. [28]

Meriturvallisuuskomitea (MSC)

MSC on IMO-organisaation korkein tekninen elin ja se koostuu kaikkien jäsenvaltioiden edustajista. Meriturvallisuuskomitean tehtävänä on ottaa huomioon kysymyksiä liittyen mm. alusten navigointiin, rakentamiseen ja varusteisiin, miehitykseen ja sen turvallisuuteen, törmäysten ehkäisemiseen, vaarallisten lastien käsittelyyn ja merenkulkua koskeviin sääntöihin [28].

Luokituslaitokset (IACS)

International Association of Classification Society, IACS on luokituslaitosten kansainvälinen kattojärjestö. Yksittäisen luokituslaitoksen tehtävänä on tarjota merenkulkualan toimijoille meriturvallisuutta parantavia ja merien pilaantumista ehkäiseviä palveluja kaikkialla maailmassa. Kuvassa 3.5.4.1 on eri luokituslaitosten luokitustunnuksia [31].

Tavoitteena alusten luokittelulle on tarkistaa kansainvälisten ja / tai kansallisten vaatimusten noudattaminen sekä lippuvaltion lakisääteisten määräysten toteuttaminen kuten [30]:

aluksen rungon olennaisten osien rakenteellinen lujuus ja eheys ja luotettavuus propulsio- ja ohjausjärjestelmien toiminta, sähköntuotanto ja apulaitteet sekä aluksen järjestelmät

Society	Symbol
ABS	⊠ A1
BV	I
CCS	★ CSA
CRS	★ 100A1
DNV GL	⊠ 1A
IRS	⊠ SUL
KR	⊠ KRS1
LR	⊠ 100A1
NK	NS *
PRS	* KM
RINA	100-A-1.1 or C
RS	KM⊠

Kuva 3.5.4.1 Luokituslaitosten luokitustunnuksia [WWW. IACS.com]

Luokkasääntöjen mukaisesti suunnitellulle ja rakennetulle alukselle voidaan hakea todistus luokkasääntöjen täyttämistä ja siihen kuuluvasta luokituksesta [30]. IACS korostaa, että luokituksen myöntäminen ei ole itsestään selvä tae meriturvallisuuden toteutumisesta ko. aluksella, se on kuitenkin eräs tärkeä elementti sen toteutumisessa [30]. IACS jäsenyrityksillä ei ole kaupallisia intressejä laivojen suunnitteluun ja rakentamiseen. IACS toiminta on kansainvälisen IMO:n alaisten SOLAS ja LLC yleissopimusten tunnustamaa meriturvallisuuden edistämistä ja merien pilaantumisen ehkäisemistä.

Luokitussääntöjen tavoitteena on luoda alalle vahvoja standardeja koskien em. luokitustarkastusten osa-alueita. Luokitussääntöjä ei kuitenkaan ole sellaisenaan tarkoitettu yksityiskohtaisiksi suunnitteluohjeiksi. Sen sijaan säännöstöissä kuvataan mahdollisten ratkaisujen minimivaatimukset.

DNV-GL* HIGH SPEED LIGHT CRAFT ja CRAFT-ohjeistot (*DNV 1.3.2021 alkaen) ovat eräitä mahdollisia sovellettavia luokkavaatimussäännöstöjä. Partioveneiden luokkamerkinän päätavoitteena on taata miehistön ja mahdollisesti muiden aluksella olevien henkilöiden sekä aluksen turvallisuus vaikeissa olosuhteissa.[20]

Partioveneiden luokitus koskee veneitä, jotka eivät kuljeta tavallista rahtia, matkustajia, eivätkä harjoita kaupallista merenkulkua. Partioveneiden luokitusmerkintöjä voidaan soveltaa

aluksille, jotka on tarkoitettu esimerkiksi merenkulun palvelutehtäviin kuten luotsille, poliisille, tulli-, pelastus-, palo-, ambulanssi-, laivasto-, rannikkovartiosto-, pilaantumis- ja partiointipalveluille. [20].

Tämän tutkimuksen yhteydessä tehtävässä konehuoneen ilmanvaihdon järjestelmällisissä tarvitaan luokkasääntöjen määrittelemiä mitoitusohjeita.

Taulukoon 3.5.5–1 on koottu kohdeyrityksen käyttämien ohjeistojen antamia mitoistietoja. Tässä yhteydessä on tarkoitus havainnollistaa, miten erilaisia mittatietoja löytyy ilmanottoaukon korkeudelle veden pinnasta (D1) ja sääkannesta (D2). Oikean tiedon etsiminen tekstipohjaisista dokumenteista on käytännössä aikaa vievää.

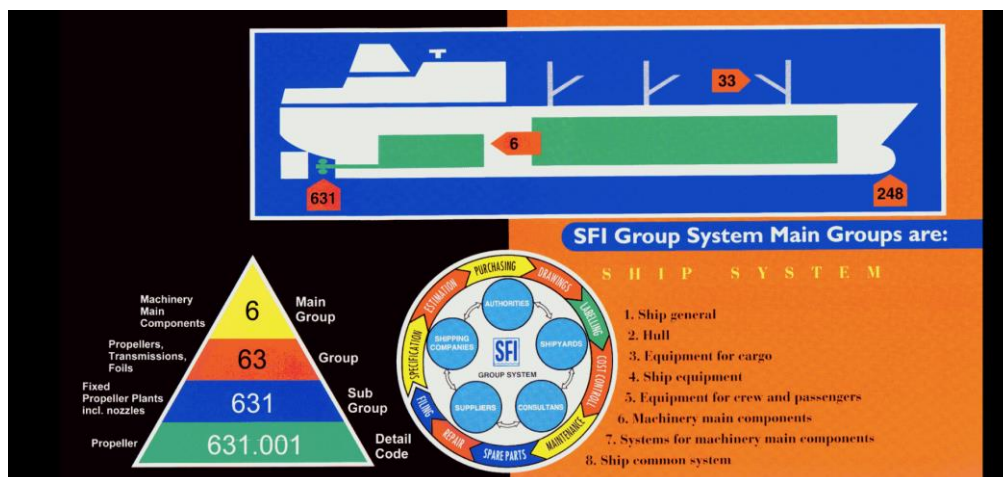
Taulukko 3.5.4–1 DNV-GL High Speed Light Craft Part 5 ja ILLC mukaiset ohjeistukset ilmanottoaukkojen mitoitukselle

HSLC		Requirement	WL-Intake	Coaming heights
Part 5			D1 (mm)	D2 (mm)
Ch1	Passenger craft	none		
Ch2	Car Ferry	none		
Ch3	Cargo craft	none		
Ch4	Crew boats	3.7.1 Air Intakes and ventilation openings (R3)	0,035L / min 1500	none
Ch5	Patrol Boats	4.2 Ventilators and air intakes (R2 or R3)	1200	none
Ch6	Small service craft	3.8 Air intakes and ventilation openings (R3)	min.1500	min. 380
Ch7	Naval and naval support vessels	3.8.1 Air intakes and ventilation openings (R3)	min.1500	min.900
ILLC				D2 (mm)
	Regulation 17 Machinery Space Openings (pos2)			380
	Regulation 18/3 Miscellaneous Openings in Freeboard and Superstructure Decks			380
	Regulation 19/ 4 Ventilators			760

3.5.5. Merenkulun SFI-Järjestelmä

Konseptointi- ja suunnittelutoimintojen tueksi on olemassa valmiita ja vakiintuneita luokittelukäytäntöjä. Norjalaisen laivateknillisen tutkimusinstituutin, Skipteknisk Forskninginstitut (SFI) alun perin 1970-luvulla kehittämä laivarakenteen luokittelujärjestelmä on luotu helpottamaan kommunikaatiota eri merenkulun toimijoiden kesken laivan elinkaaren aikana [37]. Esimerkiksi suunnittelijat, telakat, luokituslaitokset ja vakuutusyhtiöt soveltavat SFI-järjestelmää [37].

Järjestelmän peruseriaatteena on pilkkoa aluksen järjestelmät numeroituihin ryhmiin ja niiden loogisiin alaryhmiin komponenttitasoille asti.



Kuva 3.5.5.1 SFI-järjestelmän luokitteluperiaate ulottuu pääryhmästä nimiketasoille [SFI® Group System]

Kahdeksan pääryhmää:

Pääryhmä 1 - Yleistä

yleisjärjestely (GA), laadunvarmistus, vesillelasku, telakointi ja takuu.

Pääryhmä 2 - Rungon järjestelmät

Aluksen runko ja rakenteet, pintakäsittely.

Pääryhmä 3 - Rahtivarusteet

Rahtivarusteet ja -koneet, mukaan lukien aluksen lastin järjestelmät, lastaus- / purkujärjestelmät, lastivinssit ja luukut

Pääryhmä 4 - Laivavarusteet

Aluskohtaiset laitteet ja koneet. Navigointilaitteet, ohjauskoneet, ankkurointivälineet ja viestintälaitteet.

Pääryhmä 5 - Miehistö ja matkustajalaitteet

Miehistöä ja matkustajia palvelevat laitteet, koneet, järjestelmät, hengenpelastusvälineet, huonekalut, aterialaitteet ja saniteettijärjestelmät.

Pääryhmä 6 - koneiden pääkomponentit

Konehuoneen pääkomponentit kattilat ja generaattorit.

Pääryhmä 7 - Koneiden pääkomponenttien järjestelmät

Järjestelmät, jotka palvelevat koneiden pääkomponentteja, esimerkiksi polttoaine- ja voiteluöljyjärjestelmät, käynnistysilmajärjestelmä, pakojärjestelmät ja automaatiojärjestelmät.

Pääryhmä 8 - Yhteiset järjestelmät

Keskuslaivajärjestelmät, esimerkiksi painolasti- ja pilssijärjestelmät, palonsammutus- ja huuhtelulaitteet, sähköiset jakelujärjestelmät ja niin

Vakioitu järjestelmien numerointikäytäntö suunnittelussa ja tuotannossa helpottaa työntekijöiden kykyä hahmottaa aluksen rakennetta paremmin ja samalla ehkäisee omien ja oma-peräisten luokittelujärjestelmien syntyä tai pahimmillaan sellaisen puuttumisen.

Tässä työssä myöhemmin laadittava järjestelmämalli nimetään SFI-järjestelmän mukaisella tunnuksella, SFI-74.

3.5.6. Merenkulun riski- ja tavoitepohjainen suunnittelu

Kansainvälinen merenkulkuyhteisö uudistaa ohjeisiin ja sääntöihin tukeutuvaa järjestelmäänsä kohti tavoitepohjaista (*engl. goal-based*) järjestelmää. Peruseriaatteena on luoda selkeät, demonstroitavat ja todennettavissa olevat tavoitteet alukselle, joka on rakennettu ja ylläpidetty hyväksytyin menetelmin. Tällaisen aluksen tulisi tarjota mahdollisimman turvallinen käyttöympäristö sen miehistölle ja rahdille koko sen elinkaaren ajan [30]. Tavoitepohjaisessa suunnittelun lähestymistavassa määräystenalainen sääntelykehys siirretään vaatimustenmukaisuuden kulttuurista benchmarking-kulttuuriin, jota tukee toiminnalliset riskipohjaiset vaatimukset [30]. Tarkoituksena on, että tavoitteet voivat olla saavutettavissa vaihtoehtoisilla malleilla ja ratkaisuilla, jotka tarjoavat vastaavan turvallisuustason. Samanaikaisesti edistetään uutta tekniikkaa ja aiempaa suurempia innovaatioita merenkulkualalla [30]. Merenkulkuala on perinteisesti konservatiivinen toimiala, jossa muutokset tapahtuvat pienin askelin. IMO on rohkaissut luokituslaitoksia tavoitepohjaisen suunnittelun edistämiseen, jossa ratkaisujen vähimmäisturvallisuustaso on luokituksen yhteyteen asetettu. Samalla avataan tilaa uusille innovaatioille ja teknologioille [28].

3.5.7. STAMP-teoria, STPA-prosessi, ennakoiva riskien hallinta

Tämän diplomityön näkökulmasta järjestelmien kehityksenaikainen riskien eliminointi on ensisijainen tavoite. FMEA- menetelmä (Failure Mode Effect Analysis) on tunnetumpi riskianalyysityökalu kuin STPA (System Theory for Accident Modeling Process). Scopus tietokannasta löytyy noin 5000 viittausta FMEA:lle, kun STPA:lle löytyy noin 500.

FMEA avulla analysoitaessa kokonaisriski on esiintymistodennäköisyyden ja vaikuttavuuden tulo. Tämän menetelmän heikkous on siinä, että se eliminoi kokonaan epätodennäköiset tapahtumat [41].

STAMP- (System Theory On Accident Modelling Process) -teoriassa, joka perustuu systeemiteoriaan, on tunnistettu tuo yllä mainittu heikkous [41]. Teoriassa tukeudutaan tutkituun tietoon siitä, että ihminen on huono arvioimaan epätodennäköisiä tapahtumia [41]. STAMP- teorian perusoletus on, että onnettomuudet ovat lähtökohtaisesti kontrolliperäisiä ongelmia eivätkä esimerkiksi olosuhdeperäisiä. Tämä on perustavaa laatua oleva ero riskienhallintamenetelmien välillä. STAMP on malli tai joukko oletuksia onnettomuuksien tapahtumisesta. STAMP on vaihtoehto vikatapahtumien ketjulle, kuten Fault Tree Analysis.[41]

STAMP-lähestymistapa on mielenkiintoinen järjestelmätekniikan näkökulmasta. STAMP-teoria huomioi ohjelmistot, ihmiset, organisaatiot ja turvallisuuskulttuurin onnettomuuksien aiheuttajina [41]. Riskien ja meriturvallisuuden samanaikaisen tarkastelun ulottaminen systeemin kehitykseen edesauttaa riskien eliminoinnin ennalta ehkäisevästi systeemeistä. Riskienhallinnan yhteydessä on arvioitava myös taloudellista toteuttamiskelpoisuutta. STAMP-teorian kehittäjä Nancy G. Leveson et al. 2018 Michigan Institute of Technologystä haluavat korostaa, että tyyppisesti turvallisuusasioihin havahdutaan vasta projektin loppumetreillä, jolloin päädytään jälkikäteen järjestelmiin ”pultattaviin” turvallisuusratkaisuihin lisäkustannusten kera. ”*Turvallisuus maksaa ylimääräistä*” -väittämä ei välttämättä pidä paikkaansa, mikäli ratkaisut toteutetaan oikeassa vaiheessa systeemi- ja laitekehitystä [41]. Oikea-aikainen riskien ja turvallisuuden hallinta systeemikehityksen aikana voi olla yritykselle tulevaisuuden menestystekijä, kun turvallinen ja matalariskinen alus on markkinoilla verrokkejaan edullisempi jo tarjousvaiheessa.

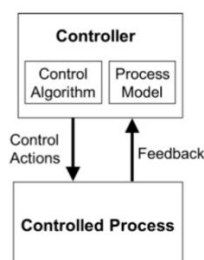
STAMP-luo teoreettisen pohjan STPA:lle (system theory for process analysis), jonka avulla suoritetaan varsinainen systeeminen vaarojen tarkastelu.

Ensimmäisessä vaiheessa laaditaan lista niistä menetyksistä mihin järjestelmän pettäminen voi pahimmillaan johtaa. [L-1] uppoaminen, [L-2] tulipalo, [L-3] menetetty missio, ja niin edelleen, enintään seitsemän, kahdeksan kappaletta [L= loss]

Seuraavassa vaiheessa tunnistetaan vaaroja, jotka voivat johtaa menetyksiin. [H-1] poikkeaminen tunnetulta väylältä, [H-2] alus on ylikuormattu, [H-3] aluksella on liian suuri tilannenopeus, [H-4] alus on alimiehitetty, [H-5] aluksen huollot on laiminlyöty, ja niin edelleen [H = hazard]

- Kaikkien vaarojen tulisi viitata järjestelmän yleiseen tilaan ja järjestelmän tilaan, ei yksittäiseen komponenttiin
- Vaarojen tulisi viitata tekijöihin, joita järjestelmän suunnittelijat ja käyttäjät voivat hallita ja kontrolloida
- Kaikkien vaarojen tulisi kuvata ehkäistävät järjestelmätason olosuhteet (*esim. konehuoneen korkea lämpötila johtaa...*)
- Vaarojen määrän tulisi olla suhteellisen pieni, yleensä enintään 7–10.
- Vaarojen ei tulisi sisältää epäselviä sanoja, kuten "vaarallinen", "tahaton", "vahingossa" ja niin edelleen.

Järjestelmätason rajoitus, SC (system constraint) määrittää järjestelmän olosuhteet tai käyttäytymisen, jotka on täytettävä vaarojen estämiseksi (ja lopulta tappioiden estämiseksi).



Kuva 3.5.7.1 Kontrollirakenteen yleismalli [41 s.23]

Esimerkiksi: [H-1] poikkeaminen tunnetulta väylältä -> [SC-1] suurin sallittu tilannenopeus max. 5kn. [SC-2) Aluksen keulaan järjestettävä tähystys, ja niin edelleen.

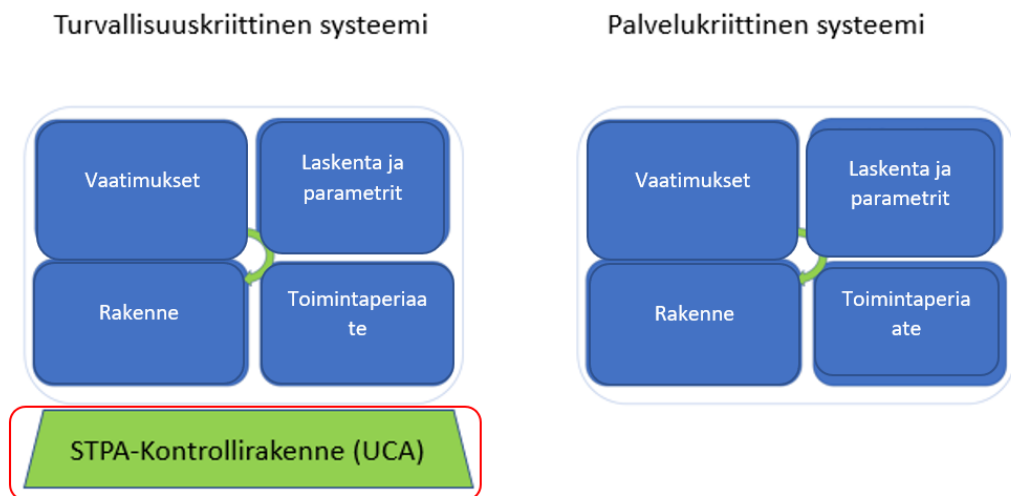
Seuraavaksi systeemistä laaditaan sen kokonaisvaltainen hierarkkinen kontrollirakenne. Kuvan yleistä ohjauspiiriä voidaan käyttää selittämään ja ennakoimaan monimutkaisia *ohjelmistoja* ja *ihmisten* välisiä vuorovaikutuksia, jotka voivat johtaa menetyksiin. Ohjausalgoritmeja voidaan kutsua joko toimintamenetelmiksi tai päätöksentekosäännöiksi. Ihmisten toimintaa kuvaa prosessimallit. Kontrollirakenteen kuvaamisen perusperiaate on kummasakin kuitenkin sama. [41]

Viimeisessä vaiheessa on tarkoitus tunnistaa kunkin funktion epänormaali toiminta [41].

Funktion ohjauksella on tarkastelussa kategorisesti neljä erilaista systeemitilaa:

- funktion **ohjaus ei kytkeydy** päälle aiheuttaen vaaran
- funktion **päälle kytkeytyminen** aiheuttaa vaaran
- funktion kytkeytyminen **liian aikaisin/liian myöhään/viallisuus** aiheuttaa vaaran
- funktion **pysäytetty liian aikaisin tai pidetty päällä liian** kauan aiheuttaa vaaran

Usein kysytty kysymys on: Mitä eroa on *häiriösietoisuudella* ja *turvallisuudella*? *Turvallisuus* on nähtävä prosessina ihmisten tai tuotteiden menetyksen välttämiseksi. *Häiriösietoisuus* on taas prosessi häiriöiden ennakoimiseksi ja kyseisen järjestelmän toimintojen osittaisen tai täydellisen palauttamisen saavuttamiseksi. [32] Jotkut järjestelmien häiriöanalyseistä eivät ole lainkaan turvallisuuskriittisiä (kuva 3.5.7.2); ne voidaan paremmin luokitella palvelukriittisiksi [32]. Esimerkiksi ohjaamon lämmitysjärjestelmä on palvelukriittinen järjestelmä, jossa lämmön tarjoaminen on palvelu ja ensisijainen tehtävä. Järjestelmän pettäminen ei aiheuta välitöntä vaaraa tai merkittäviä menetyksiä.

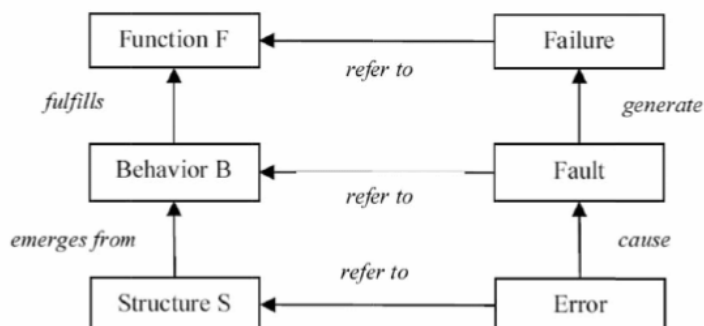


Kuva 3.5.7.2 Kuvassa on yhdistetty MBSE- rakenteen mukainen yleinen järjestelmämalli ja STPA-mukaisen vika-analyysi. Tällainen tarkastelu on perusteltavissa, kun kyseessä on turvallisuuskriittinen järjestelmä.

Odottamattomien tapahtumien ja riskein analysointi on otettavissa kiinteäksi osaksi systeemisuunnittelua soveltamalla STPA-prosessia.

Mallipohjaisessa tarkastelussa Patrice Micouin 2014 [1, s. 191] havainnollistaa *virheen*, *vian* ja *vikaantumisen* käsitteellisen eron systeemisessä tarkastelussa. Virhe aiheuttaa vian, joka johtaa vikaantumiseen.

Virhe on rakenteessa, jolla on ominaisuus, jossa vika ilmenee. Ominaisuudella on toiminto, johon tulee toimintahäiriö.



Kuva 3.5.7.3. Virheen, vian ja vikaantumisen ilmeneminen systeemin perusrakenteessa [1, sivu 191]

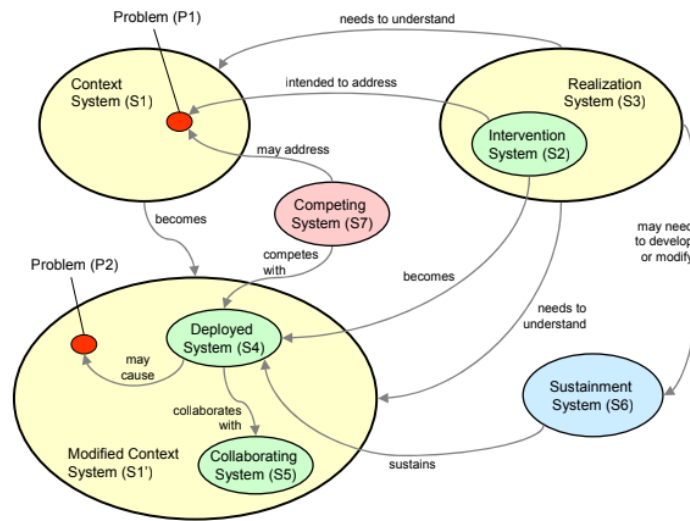
3.5.8. Visuaalinen työskentelytapa

Eräs keino tutkimusongelman ratkaisemisessa on pyrkimys vähentää tarvetta etsiä aiemmin jo etsittyä tietoa uudestaan tekstipohjaisista aineistoista. Sen asemesta sääntöjen sisältämää tietoa kootaan kuvalliseen esitystapaan, esimerkiksi toiminta periaatetta kuvaavaan järjestelmämalliin. Konseptointivaiheessa on usein tarvetta kuvata järjestelmien välisiä vuorovaikutussuhteita graafisesti. Tätä käytännöllistä lähestymistapaa tukee vanhempi tutkimus, jossa selvitettiin visuaalisen esitystavan eroa tekstipohjaiseen esitystapaan.

Tutkijat kiinnostuivat 1970-luvulla Leonardo da Vincin tavasta kuvata keksintöjään ja ideoitaan. Tony Buzan kehitti menetelmää ja nykyisin se tunnetaan paremmin nimellä *Mind Mapping*. Tässä tekniikassa keskeiseen asiaan tai teemaan säteittäisesti kytkeytyviä asiayhteyksiä kuvataan graafisesti.

Tällöin lukija kykenee hahmottamaan kokonaisuuden ja siitä mahdollisesti puuttuvat elementit tai luomaan ja johtamaan siihen liittyviä kokonaan uusia ideoita [3]. Esimerkkikuva on James Martinin 2004 INCOSE symposium esityksestä, jossa kuvataan ongelmien vaiheittaista eskaloitumista projektin aikana.

Esitys voitti ”Best Paper” -awardin kyseisenä vuonna [49].



Kuva 3.5.8.1 Mind mapping on tehokas mallinnustyökalu asioiden ja niiden välisten yhteyksien kuvantamisessa [49, James Martin The Seven Samurai of systems engineering]

Ihmisen vasen aivopuolisko on erikoistunut sanojen ja tekstin käsittelyyn ja oikea taas hahmojen ja kuvien tunnistamiseen sekä mielikuvitukseen [3]. Tämä havainto herätti 1970-luvulla Ralph Haberin kiinnostuksen tutkia asiaa tarkemmin. *Scientific American Magazine*ssa julkaistussa Ralph Haberin tutkimuksessa havaittiin, että testattavat yksilöt kykenevät tunnistamaan kuvia ja hahmoja 85–95 % tarkkuudella.[3] Tutkimustuloksista pääteltiin, että muistamme asiat, koska kuvien ja hahmojen tunnistaminen hyödyntää merkittävästi oikean aivopuoliskon kapasiteettia [3].

Kuvat auttavat ihmistä luomaan tarkempia ja kyvykkäämpiä assosiaatioita pelkkiin sanoihin verrattuna ja tämän vuoksi kuvallinen esittäminen edistää ajatteluamme ja muistamistamme.[3] Tämä edellä kuvattu noin puolivuosisataa vanha tutkimus on rohkaiseva kuvaus siitä, miksi yritysten ja organisaatioiden kannattaisi tavoitella mahdollisimman laajaa kuvien ja mallien käyttöä sekä graafista esitystapaa kaikissa sopivissa asiayhteyksissä. Etu on ymmärrettävä verrattuna siihen, että tiimin sisällä vallitsee erilaisia tulkintoja vaatimustekstien ja spesifikaatiolistausten luetun ymmärtämisestä.

3.6. Järjestelmäteknikka (Systems Engineering)

Järjestelmäteknikan juuret juontavat 1930-luvun lopulle länsiliittouman asejärjestelmien kehitykseen [2]. Järjestelmäteknikan engl. System Engineering (SE) on poikkitieteellinen ja asioita yhdistävä lähestymistapa, joka mahdollistaa suunniteltujen järjestelmien onnistuneen toteutuksen, käytön ja käytöstä poiston elinkaaren lopussa. Keskeistä on vaatimusten ja tarpeiden syvällinen ymmärtäminen projektissa. Tämä ohjaa kehitysprosessien aikana tapahtuvaa toimintaa ja päätöksen tekoa. Järjestelmäteknikassa sovelletaan tieteellisiä ja teknologisia menetelmiä sekä johtamismalleja [2]. Järjestelmäteknikan lähestymistapa kattaa tuotteen tai palvelun koko elinkaaren hallintaan liittyvät vaatimukset teknisestä ja taloudellisista näkökulmista [2].

1937	British multidisciplinary team to analyze the air defense system
1939–1945	Bell Labs supported NIKE missile project development
1951–1980	SAGE air defense system defined and managed by Massachusetts Institute of Technology (MIT)
1954	Recommendation by the RAND Corporation to adopt the term "systems engineering"
1956	Invention of systems analysis by RAND Corporation
1962	Publication of <i>A Methodology for Systems Engineering</i> by Hall
1969	Modeling of urban systems at MIT by Jay Forrester
1990	National Council on Systems Engineering (NCOSE) established
1995	INCOSE emerged from NCOSE to incorporate international view
2008	ISO, IEC, IEEE, INCOSE, PSM, and others fully harmonize SE concepts on ISO/IEC/IEEE 15288:2008

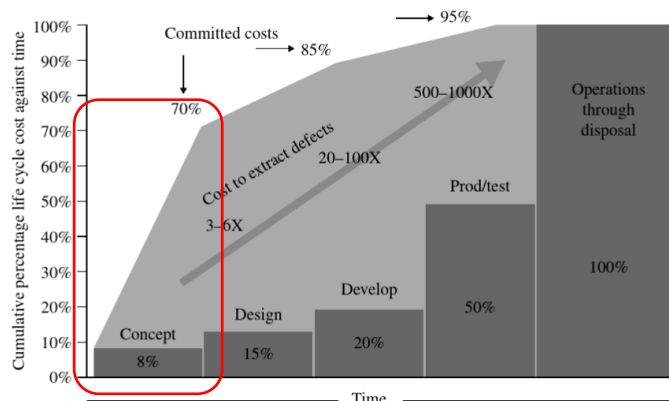
kuva 3.6.1 Järjestelmäteknikan merkkipaaluja 1937–2008 [2 s.12]

Järjestelmäteknisen työskentelytavan vahvuus piilee sen systemaattisessa ja dokumentoidussa tavassa hallita vaatimuksia kehitysprosessin alkuhetkistä lähtien.

Järjestelmällinen vaatimusten hallinta ohjaa suunnitteluprosessia, joka tuottaa kaikki tarvittavat dokumentit valmistukseen, verifointiin ja validointiin. Näin hallitaan kehitysprosessin aikaista problematiikkaa kokonaisvaltaisesti alusta loppuun. SE kattaa projektissa suunnittelun, testauksen, valmistuksen, suorituskyvyn, kustannukset, aikataulun, tarvittavan koulutuksen ja tuen sekä elinkaaren päättymisen [2]. Kaikki tämä edellyttää onnistuakseen huomattavaa poikkitieteellistä osaamista ja tiimityötä.

Mitä monimutkaisemmista järjestelmistä on kyse, sitä tärkeämpi rooli on järjestelmäteknisellä lähestymistavalla.

Järjestelmätekniikka on syntynyt käytännön tarpeeseen hallita monimutkaisia systeemejä ja järjestelmiä tilanteessa, jossa käytettävissä olevat resurssit ovat rajalliset [32].



Kuva 3.6.2 Konseptointivaihe edustaa 8 % elinkaaren kustannuksista ja vastaa n. 70 % elinkaaren aikaisista kustannuksista [2 sivu 14].

Asiakasvaatimukset muuntuvat ensin järjestelmävaatimuksiksi ja tuotearkkitehtuuriksi. Nämä muuntuvat yksityiskohtaisemmiksi komponentti- ja järjestelmädesignneiksi omine vaatimuksineen [2]. Perinteisesti järjestelmätekniikassa vaatimukset esitetään tekstimuotoisena (TBR) veloitteena tai kieltona [1]. Eräs määritelmä *vaatimukselle* on IEEE 1220 standardin mukainen kuvaus: *"tuotteen tai prosessin toiminnallisuus tai toiminta, tai luonteenomainen design tai rajoite, jotka ovat yksiselitteisiä, testattavia tai mitattavia ja välttämättömiä tuotteen tai prosessin hyväksyttävyydelle asiakkaan, käyttäjän tai laatu järjestelmän näkökulmasta."* [1]. Muut standardit ovat *"vaatimusten"* suhteen huomattavasti epämääräisempiä, kuten esimerkiksi ISO 15288, EIA632, ARP47A [1, s. 100].

Nyky aikaisten järjestelmien muuttuessa monimutkaisimmiksi tekstipohjainen työskentelytapa on käynyt entistä haastavammaksi. Kuluneen viimeisen 10–15 vuoden ajan mallipohjainen järjestelmätekniikka (MBSE) on kasvattanut suosiotaan. Kirjallisessa muodossa esitetty vaatimus luonnollisella kielellä, saattaa jättää helposti lukijalle tulkinnan varaa siitä, mitä tekstin kirjoittaja on halunnut tarkalleen vaatimuksellaan tarkoittaa. Etenkin jos on kielellisiä ja kulttuurillisia eroja kirjoittajan ja lukijan välillä. [1]

Tämän vuoksi on aiheellista kysyä, onko tekstipohjainen tapa tehokkain kuvaamaan vaatimuksia ja lopulta millä hinnalla. Tämä johtaa mielenkiintoiseen jatkokysymykseen, pitäisikö ilmaisua *vaatimus* rajoittaa, kunnes vaatimus voidaan ilmaista niin yksiselitteisesti, että tietokone voi sen prosessoida ja lopulta ratkaista? [1]

Jotta päästäisiin IEEE 1220 määrittelemään tasoon vaatimusten kuvantamisessa tarvitaan avuksi objektiivinen ilmaisutapa vaatimusten määrittelyssä, jottei niiden merkitysten tulkinnoille jää sijaa. Tällainen objektiivisuus on välttämätöntä Model Based System Engineering lähestymistavalle. [1]

Taulukko 3.6.-1 Teksti- ja mallipohjaisuuden eroavaisuudet [1, s. 102]

Työskentelyorientaatio	Vaatimukset	Design
Tekstidokumenttipohjaisuus	Tekstipohjaiset	Tekstikuvaukset
Mallipohjaisuus	Ominaisuuspohjaiset	Design- mallit

3.7. Mallipohjainen suunnittelu

Termillä malli on monta määritystä ja merkitystä, mutta yleisesti sillä tarkoitetaan abstraktiota tai esitystä systeemistä, kokonaisuudesta, ilmiöstä taikka kyseessä olevasta prosessista. Järjestelmätekniikassa malleilla on erityinen merkitys erilaisten järjestelmien kuvaamisessa toimintaympäristöissään. [2]

Systeemimalleilla voi olla monta käyttötarkoitusta. Siksi eräs peruseriaatteista järjestelmätekniikassa on kuvata ensimmäiseksi käytettävän mallin tarkoitus [2, 183–184]. Alla on esimerkkejä standardissa IEEE 15288 laaditusta luettelosta erilaisista malleista:

Toiminnallinen malli: järjestelmän toiminnot ja niiden toiminnalliset rajapinnat

Käyttäytymismalli: järjestelmän toimintojen yleinen käyttäytyminen

Aikamalli: arkkitehtuurin ajoitukseen liittyvät näkökohdat

Rakennemalli: järjestelmän elementit ja niiden fyysiset rajapinnat

Massamalli: järjestelmän massaan liittyvät näkökohdat

Layout-malli: järjestelmän elementtien absoluuttiset ja suhteelliset paikkasijoitukset

Verkkomalli: järjestelmän toiminnot tai elementit ja niiden keskinäinen vuorovaikutus

Mallien käyttö konseptien kokeilemisessa ja ideoiden testaamisessa tarjoaa hyötyjä suunnittelun alkuvaiheessa. [2]

Esimerkiksi suunniteltavan veneen pienoismallin avulla voidaan vetoaltaassa tutkia rungon hydrodynaamisia ominaisuuksia allaskokeiden avulla. Mallin testaustulokset tarjoavat myöhemmässä vaiheessa suunnittelijoille arvokasta tietoa rajoista ja rajoitteista vaadittuihin

suoritusarvoihin verrattuna. Toisaalta suunnittelijoilla voi jo olla käytössään empiirinen las-kentamalli, jonka avulla on mahdollista korvata pienoismallilla tehtävät koesarjat. Tämä no-peuttaa ja säästää huomattavasti kehityskustannuksia.

Mallilla ja mallintamisen avulla saatu uusi tieto auttaa varsinaisen projektin resurssisuunnit-telussa, kun ymmärretään tarkemmin järjestelmien ja alijärjestelmien toimintaa ja niiden vaatimaa suunnittelu- ja kehityspanosta. Uusi tieto maksaa itsensä takaisin myöhemmässä valmistus- ja validointivaiheessa monin verroin aikasäästöinä, kun vältetään kalliilta ja aikaa vieviltä virheiltä ja niiden korjaamisyrityksiltä toteutuksen aikana. Mallintamisen ja si-muloinnin tuoma lisäarvo korostuu mitä monimutkaisemmasta järjestelmäkokonaisuudesta on kyse.[2]

Mallipohjaisessa järjestelmätekniikassa työn painopiste siirtyy dokumenttipohjaisen aineis-ton hallinnasta erilaisten mallien hallintaan. MBSE helpottaa monimutkaisuuden hallintaa ja samalla parantaa suunnittelun laatua, läpimenoaikaa, kommunikaation tasoa tiimien välillä sekä mahdollistaa tiedollista evoluutiota [4]. Malli voi yksinkertaisimmillaan olla järjestelmän tai systeemin matemaattinen, looginen, käsitteellinen tai abstrakti kuvaus sen toiminnasta [4].

Mallin käyttötarkoitus on tärkeä kuvata tarkoin ennen mallin luomista tai mallintamista, jotta voidaan arvioida tarvittavaa työpanosta suhteessa mahdollisesti saatavaan hyötyyn. [4] Mallintamiseen on olemassa monia kaupallisesti saatavilla olevia ohjelmistoja, jotka poh-jautuvat SYS ML -ohjelmointikieleen. MBSE:tä voi kuitenkin harjoittaa, esimerkiksi fläppi-
taululla, joka on erään lähteen mukaan jopa suositeltavin tapa aloittaa kuvaamaan järjes-telmiä [5].

MBSE tavoitteena ei ole lisätä suunnittelun ja määrittelyn vaatimaa työmäärää vaan vähen-tää sitä olemassa olevien mallien uudelleenkäytettävyyden avulla. Teollisuudessa käyte-tään usein sanaa *skaalautuvuus* kuvaamaan tehdyn työn uudelleen käytettävyyttä. Täysi-määräinen MBSE -pohjainen työskentely edellyttää kuitenkin tähän tarkoitettujen ohjelmis-tojen käyttöönottoa ja lisäkoulutusta [4]. Vaatimusten tarkistus on tärkeä analyysi, joka suo-ritetaan MBSE: n yhteydessä. Tämän analyysin suorittamiseksi vaatimukset, järjestelmän toimintaperiaate sekä sen suorituskykyä ennustavat mallit on tuotava yhteen [8]. Etu perin-teiseen asiakirjapohjaiseen lähestymistapaan verrattuna on, että aikaisemmin toisistaan erillään olevat aineistot liittyvät yhteen malliin. Tämä mahdollistaa johdonmukaisen malli-pohjaisen dokumentoinnin tuottamisen [8]. Käsitteellinen malli toimii perustana fyysisten komponenttien toteutusmallin määrittämiselle. Toteutusmalli asettaa teknologiariippuvia

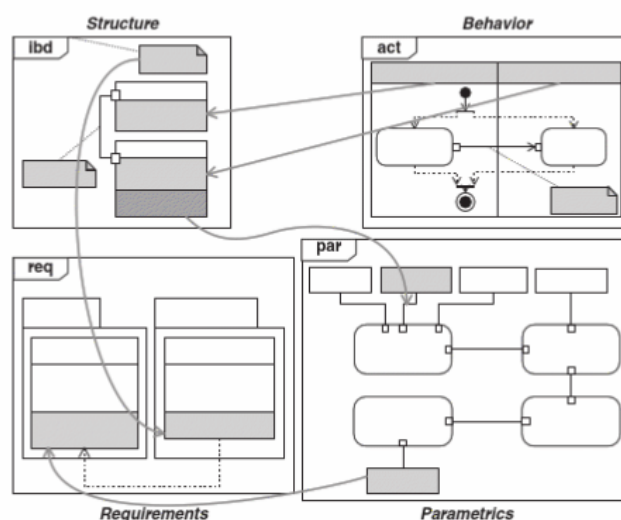
rajoituksia suunnitteluratkaisuille. Sekä käsitteelliset (ts. loogiset), että toteutusmallit (eli fyysiset) edustavat "määriteltyä" järjestelmää [8].

MBSE:n sovellusalueita ovat mm:

- Kuvata olemassa olevaa systeemiä ja suunnitella uusi tai modifioitu systeemi
- systeemikonseptin esitys
- systeemivaatimusten määrittely ja validointi
- yhdistää eri systeemi design: ja
- määrittää komponenttivaatimuksia
- ylläpitää vaatimusten jäljitettävyyttä
- suorittaa design trade-off analyysyjä (ts. kompromissianalyysi)
- verifioida systeemin vaatimusten mukaisuutta
- muutosten vaikutusten arviointi
- systeemin kustannusten arviointi

Kyseessä on siis kokonaisvaltainen tapa hallita yksittäisen systeemin vaatimuksia ja suunniteltua rakennetta luodun järjestelmämallin kautta [4]. SYSML on kehittynein mallinnuskieli ja muodostumassa alan standardiksi, mutta ei suinkaan ainoa. Mallipohjainen järjestelmätekniikka pohjautuu kuvan 3.7.1 (Friedenthal, Sanford, et al. 2011) [4 sivu 17] MBSE-perusrakenteen mukaisesti neljään peruspilariin:

rakenne (1), Toimintaperiaate (käyttäytyminen) (2), vaatimukset (3) ja parametrit (4) sekä näiden keskinäiseen vuorovaikutukseen.



Kuva 3.7.1 MBSE perusrakenne kuvattuna SYSML-ohjelmistolla: vaatimukset, parametrit, toimintaperiaate ja rakenne.

On tärkeää erottaa hyvä malli ja hyvä design toisistaan [5]. MBSE:tä kokeiltaessa eräs suosittelavin sovellusalue on aloittaa vaatimusten mallintamisesta. Tämän jälkeen malliin lisätään vaatimusten jäljitettävyyttä [5]. Tie mallipohjaiseen työskentelytapaan edellyttää vaiheittaista ja pitkäjänteistä etenemistä ja siihen tarvittavan osaamisen kartuttamista [5].

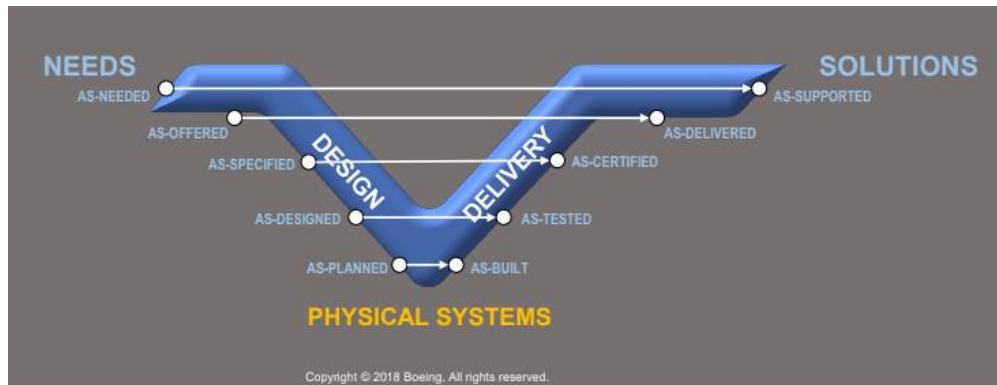
Ohessa on Matthew Hausen 2013 [5]. kuvaamia näkökohtia liittyen MBSE-käyttöön ja käyttöönnottoon.

- *Projektidokumentoinnin kehitys: paperipohjaisuus -> sähköiset dokumentit -> copy-paste-toiminnot => seuraavaksi muutos kohti automaattista dokumentoinnin luontia.*
- *Vaatimusten jäljitettävyyys: paperipohjaiset kaaviot ja taulukot -> sähköiset taulukkolaskentaohjelmat -> vaatimusten hallintaohjelmistot (RM) -> RM-työkalujen ja mallien väliset suorat linkit. => seuraavaksi muutos kohti malleja niihin integroiduilla vaatimuksilla*
- *Ongelma: Yritykset investoivat ensin mallinnusohjelmistoihin ja alkavat käyttämään kuitenkin niitä samoin kuin olemassa olevia paperipohjaisia prosesseja.*
- *Prosesseissa pitää osata hyödyntää paremmin olemassa olevien työkalujen ominaisuuksia.*
- *MBSE pitäisi ottaa käyttöön vähitellen, aloittakaa vaikka harjoitusprojektilla virtaviivaistamaan olemassa olevia prosesseja.*
- *Harjoitteluun pitää yhdistää valmennus*
- *Mallit, jotka ylittävät organisaatioiden toiminnallisia rajapintoja, kuvaavat järjestelmätekniiikan perusluonnetta.*
- *Malli ilman ulostuloa on hyödytön, mikä menee sisään, pitää tulla ulos.*

Mallipohjaisella järjestelmäteknikalla on vahvat juuret perinteisen järjestelmätekniiikan puolella. Seuraava kappale havainnollistaa asian.

Robert Scheurer Boeing Defense, Space and Security 2018 [50] kuvaa kuvien 3.7.2 ja 3.7.3 avulla koko järjestelmätekniiikan evoluution nykypäivään. Ensimmäisenä kuvassa 3.7.2 on yksinkertaistettu alkuperäinen Systems Engineering -prosessi (systeemi-V), jossa edetään vasemmalta oikealle aloittaen tarveanalyysistä ja päättyen toimitusvaiheeseen. Tämän jälkeen jatketaan järjestelmävaatimuksista kohti varsinaista suunnittelua. Suunnittelusta edetään valmistamiseen sekä verifiointeihin ja validointeihin, kunnes ratkaisu on valmis luovutettavaksi.

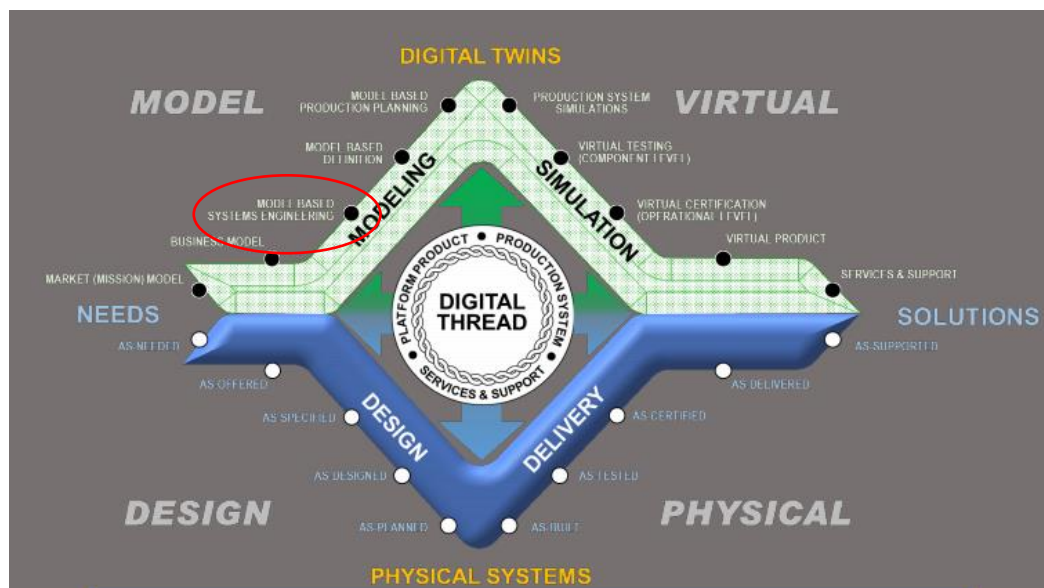
Näin perinteisesti SE:ssä. Tänä päivänä Boeing etenee mallipohjaisella polulla, joka kuvataan kuvassa 3.8.3



Kuva 3.7.2 Tarpeet ja suunnitellut ratkaisut kuvattuna perinteisellä systeemi-V:llä [50]

Pitkälle vietyinä mallipohjaisuudessa on pohjimmiltaan kyse digitaalisuuden maksimaalisesta hyödyntämisestä simuloinnin ja ns. digitaalisen kaksosen avulla. Järjestelmämalli edustaa oikean tuotteen virtuaalimallia, jonka avulla kyseinen tuote voidaan kattavasti testata ja tutkia ennen valmistuksen aloittamista.

Tässä esitettävässä alkuperäisellä systeemi-V:llä onkin virtuaalinen peilikuva. Prosessi alkaa samalla tavalla tarveanalyysistä ja jatkuu erilaisten mallien avulla kohti digitaalista kaksosta. Tämän virtuaalisen mallin avulla tapahtuu kaikki simulointi edellä kerrotulla tavalla.



Kuva 3.7.3. Mallipohjainen suunnittelu vie kohti simulointeja ja virtuaalisia tuotekehitysmalleja [50]

Model Based Systems Engineering käytännöt tulevat vastaan alkutaipaleella kohti digitaalisuuden ja virtuaalisuuden täysimääräistä hyödyntämistä teknologiaprojekteissa. Tänä päivänä on turvallista ajatella, että monimutkaisimmiksi käyvien järjestelmien suunnittelu- ja valmistusajat tulevat lyhenemään entisestään, samalla kuin suorituskyky ja laatuvaatimukset kovenevat.

3.8. Kirjallisuustutkimuksen avainpoimintoja

Konseptointisuunnittelun aikana tehdään tärkeitä valintoja ja päätöksiä, joilla vaikutetaan systeemin kehitys-, valmistus- ja elinkaarenaikaisiin kustannuksiin. Kirjallisuudesta on valittu oheiset avain poiminnat tukemaan tutkimusongelman ratkaisemista.

Toyota Production System määrittelee: $\text{Voitto} = \text{Tulot} - \text{Kustannukset}$.

Hukan eliminointi on tehokkain tapa eliminoida kustannuksia.

Käyttämätön osaaminen on hukan kahdeksas muoto.

Systeemin tarveanalyysi on tärkein yksittäinen vaihe konseptointisuunnittelussa. Varmistetaan, että lähdetään ratkaisemaan oikeaa ongelmaa. Päähuomio on toiminnoissa ja rajoitteissa.

Tarveanalyysin valmistuttua valitaan järjestelmää varten sopiva teknologia. Parametrianalyysimenetelmässä ratkaisun evaluointia ja toteutuksen testausta käsitellään vuoroin abstraktio- ja vuoroin toteutustasoilla käytännössä.

Tarveanalyysissä systeemiä tarkastellaan vaatimusten, suorituskyvyn, arvon, fyysisen koon ja turvallisuuden sekä riskien näkökulmista. Tarveanalyysi on suositeltava päättää kompromissianalyysiin, jossa arvioidaan yksittäisten vaatimusparien keskinäistä suhdetta.

Vaikuttamalla odottamiseen ja ylisuorittamiseen suunnittelussa on mahdollista saavuttaa yhteisvaikutuksiltaan suurin parannus tuottavuudessa.

Systeemin monimutkaisuutta voi hallita hajottamisen ja kapseloinnin avulla. Järjestelmien rajaaminen mahdollisimman yksinkertaisiksi, toimiviksi ja itsenäisiksi yksiköiksi mahdollistaa yleisellä tasolla modulaarisemman ja vikasietoisemman rakenteen.

Systeemin rakenteellinen pilkkominen voidaan toteuttaa ajallisin, käsitteellisin, rakenteellisin tai ominaisuusperustein.

Avoimen arkkitehtuurin ratkaisut, joissa on sovellettu COTS-tuotteita, mahdollistavat lyhyemmät kehityssykliä ja alhaisemmat elinkaarikustannukset (MOSA).

Variaatioiden määrän kasvaessa yhdestä neljään, yksikköhinta kasvaa noin 45 % ja tuottavuus laskee vastaavasti noin 38 %.

Visuaalinen työtapa stimuloi muistamista ja ihmisen mielikuvitusta.

Systeemi-integraatiossa on tutkimuksessa havaittu olevan seuraavat kuusi perusperiaatetta:

1. Hierarkian periaate
2. Hierarkisen verifioinnin periaate
3. Riippuvuuden periaate
4. Uudelleenkäytettävyyden ja kehittyvyyden periaate
5. Oivalluksen periaate
6. Optimoinnin periaate

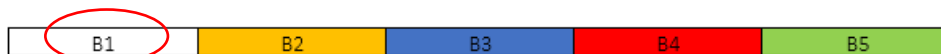
MBSE rakenteessa systeemin neljä pääelementtiä ovat: *vaatimukset, toimintaperiaate, parametrit sekä rakenne*. MBSE-pohjaisen suunnittelutavan ydinajatus perustuu näiden systeemielementtien kapselointiin yhdeksi kokonaisuudeksi ja näiden elementtien keskinäisen vuorovaikutuksien määrittelyyn. Mallipohjainen järjestelmätekniikka on kehittynyt tarpeesta kehittää monimutkaisempia järjestelmiä kustannustehokkaasti ja laadukkaasti. Mallipohjaista järjestelmätekniistä lähestymistapaa voi harjoittaa, vaikka tusseilla ja fläppitululla.

3.9. AHP-menetelmällä valittu moottori

Moottorin lopullinen valinta perustuu kriteeripainotettuun lopputulokseen. Tämän analyysin lopputuloksena paras moottori on B1.

Taulukko 3.9–1 Yhteenvedo AHP-analyysin lopputuloksesta. Tummennettu tulos on sarjan paras tulos

			B1	B2	B3	B4	B5
		Vertailun	Tulos	Tulos	Tulos	Tulos	Tulos
Suorituskyky			0,411	0,203	0,127	0,198	0,062
Hankintahinta			0,279	0,395	0,048	0,122	0,156
Maine/ Brandi			0,156	0,243	0,410	0,090	0,101
Ympäristöystävällisyys			0,229	0,133	0,124	0,077	0,437
		Kriteeri	Painotettu	Painotettu	Painotettu	Painotettu	Painotettu
	Eigen 1						
Suorituskyky	0,5130		0,211	0,104	0,065	0,101	0,032
Hankintahinta	0,276		0,077	0,109	0,013	0,034	0,043
Maine/ Brandi	0,137		0,021	0,033	0,056	0,012	0,014
Ympäristöystävällisyys	0,074		0,017	0,010	0,009	0,006	0,032
	1,0000	Summa	0,326	0,256	0,144	0,153	0,121
		Parasvalinta	1	2	4	3	5



Hankintahinnaltaan paras on B2, Maine ja brändi arvoltaan paras on B3 ja ympäristöystävällisin on moottori B5.

Uudessa vastaavassa valintatilanteessa, jossa vaikka ympäristöystävällisyys olisi asiakkaan ensisijainen tarve, tätä valmista AHP-laskentamallia olisi helppo muokata ja laatia sen pohjalta uuteen tavoitteeseen kohdennettu AHP-analyysi päätöksen teon tueksi.

3.10. Stoikiometrinen laskenta ja moottorin häviöt

Taulukkoon 3.10-1 on koottu laskentatuloksen ja eri lähdetietojen yhteenveto.

Taulukko 3.10–1 Paloilmakulutusvertailu: a- ja c antavat noin kolminkertaisen ilmankulutusarvon verrattuna b ja c -vaihtoehtoihin. Mikäli b:n laskemisessa käytettäisiin arvoa $\rho_{ilma} = 1,20 \text{ kg/m}^3$ tulos olisi likimääräisesti sama d -vaihtoehdon kanssa. Käytämme mallissa punaisella rajattuja arvoja.

Paloilman kulutus vertailu 847 kW moottorilla				
$\rho_{ilma} = 1,13 \text{ kg/m}^3^*$	m ³ /s per kW	m ³ /s per kW (incl. +50 %)	m ³ /s full load (incl +50 %)	m ³ /h full load (incl +50 %)
Wartsila Ship Technology (a)	0,00226	0,00339	2,871	10337
Stoikiometrinen (b)	0,000789	0,00118	1,002*	3609*
ISO EN 8861 (c)	0,00226	0,00339	2,871	10337
Scania Handbook (847kW) (d)	0,00074	0,00111	0,944	3398

Taulukko 3.10–2 Yhteenveto 847kW moottorin säteily- ja voimansiirron lämpöhäviöistä on 67kW. Mallissa käytetään punaisella rajattua tulosta.

847kW @ 2300rpm	kW		
Pakokaasuhäviöt	403	29,2 %	Veteen 95 %
Lämpöhäviöt	886	64,1 %	
vaihteisto $\eta=0.97$	26	1,9 %	
Säteilviöt	40	2,9 %	Ilmaan 5 %
JET $\eta=0.98$	17	1,2 %	
Sähkötoimilaitteet	10	0,7 %	
Yhteensä	1382	100,0 %	

Moottorivalmistajan käsikirjan tulosten ja laskettujen tulosten vertailu.

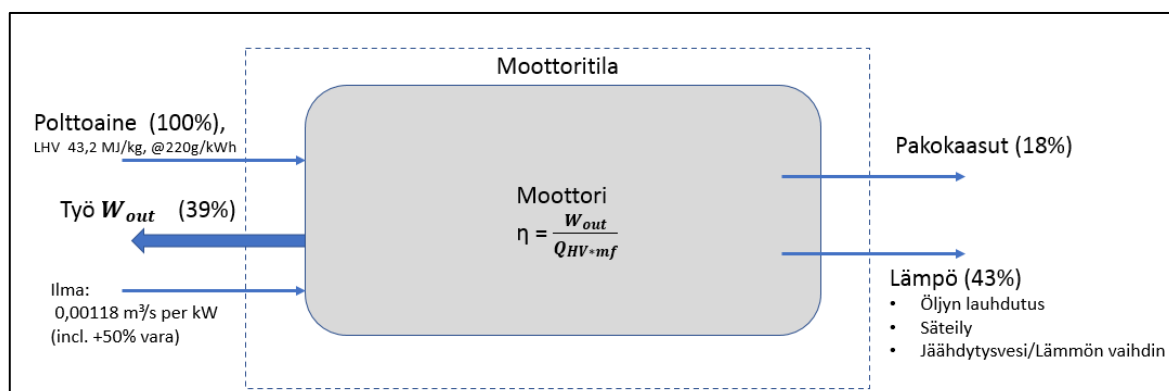
Taulukko 3.10–3 Stoikiometrinen lämpötehohäviöiden vertailu moottorivalmistajan käsikirjaan verrattuna.

Yhteenveto 847 kW moottorille @2300rpm	Kokonaishäviöt (kW)	Lämpöhäviöt (kW)	Pakokaasuhäviöt (kW)	Säteilyhäviöt ilmaan (kW)
Stoikiometrinen laskenta	1329	886	403	40*
Moottorivalmistajan käsikirja	1365	767	554	44
Δ %	2.6 %	-17,5 %	27,3 %	10 %

(*tämä säteilytehon suuruus on laskennallisesti sama osuus häviöistä, kuin se on moottorivalmistajan ilmoittamana)

Yhteenveto moottorin energiavirroista:

Kuvan 3.10.1 stoikiometriseen moottorimalliin [38] on koottu dieselpolttoaineen sisältämän energian (100 %) reaktioyhtälön avulla lasketut teoreettiset energiavirtojen jakaumat. Moottorin tekemä työn osuus on noin 39 % ja pakokaasujen osuus 18 % sekä muiden lämpöhäviöiden yhteinen (lauhdevesi + säteily) osuus kaikkiaan 43 %.



Kuva 3.10.1 Dieselmoottorin stoikiometrinenmalli [38]

3.11. Konehuoneen ilmanvaihdon laskenta ja mitoitus

Konehuoneen ilmanvaihdon laskenta ja mitoitus on toteutettu taulukkolaskentaohjelmalla. Ensimmäiseen osaan on koottu kaikki käytetyt vakiot, otsikossa kerrotaan mallin käyttötarkoitus, sekä sen vieressä SFI-tunnus. Värikoodeilla ilmaistaan mitkä ovat annettuja arvoja, mitkä mitoitusparametrejä ja onko laskennan tulos suotuisa vaiko ei.

Laskenta ja parametrit:

SFI-74	Konehuoneen ilmanvaihdon mitoitus				
	Annettava arvo	Suositus	Kohtalainen	Huono	
	Mitoitusarvo	mitoitus	mitoitus	mitoitus	
Vakiot			Yksikkö	Viskositeetti mm/s	Tmax °C
	Merivesi	1005	kg/m ³		30
	Ominaislämpökap Cv	4189	J/kgC		
	Ilma (ISO-EN-8861)	1,13	kg/m ³		30
	Ominaislämpökap Ci	1010	J/kgC		
	MDO	840	kg/m ³	(4-11)	40
	MGO	840	kg/m ³	(2-11)	40
	LHV	4,23E+01	MJ		

Kuva 3.11.1 Konehuoneen ilmanvaihdon mitoituksen laskentavakiot

Seuraavassa vaiheessa syötetään valitun moottorin teho ja polttoaineen kulutus, sekä määritellään häviöteho. Aiemmin teoriaosuudessa todettiin stoikiometrisellä laskennalla dieselmoottorin työn ja häviöiden osuudet. Sama laskentaperiaate on tuotu malliin.

Moottori (prime mover)					
	teho (kW)	847	kW		
	Polttoaineen kulutus	0,22	kg/kWh		
	Kokonaisenergia 100%	7,88E+03	MJ/h		
				MJ	kW
Energiavirrat (x100)	työ	0,39	%	3074	
	Pakokaasuhäviö	0,18	%	1419	394
	Lämpöhäviöt	0,4	%	3153	876
	Säteilyhäviö	0,03	%	236	66
Moottorin häviöt	100 %			4808	1335,6
Propulsiohäviöt	Vaihteistohäviö(%)	0,03			25,4
	JET propulsiohäviö (%)	0,02			16,9
	Propulsioteho	804,65	kW	Σ Häviöteho (kW)	1377,9
Muut häviöt (III)	apukone antoteho (kW)	21			kW
	häviöt	0,61	12,81	kW	
		Ilmaan	Säteily %	0,03	0,4
		Veteen	Lämpö %	0,97	
		Veteen	Pakokaasut		
	sähkölaitteet (kW)	10	ilmaan		0,5

Kuva 3.11.2 Kokonaishäviötehon määrittäminen

Jäähdytysteho I	Virtaus (vesi)	0,0053	m ³ /s	kW	1450,3
	ΔT 65				
	Veteen (I)	0,95		CHECK!	1309,0
Jäähdytysteho II	Ilmaan+konduktio (II)	0,05			68,9
	(II+III)				69,8

Kuva 3.11.3 Tuuletettavien häviöiden yhteisteho, 70kW.

Seuraavana malliin syötetään moottorivalmistajan ilmoittama kiertoveden tilavuusvirta ja määritetään primäärijäähdytysteho vedellä. Tarkistetaan, että jäähdytysteho kattaa kokonaishäviöt, vihreä ruutu merkitsee, että jäähdytys on riittävä. Jos jäähdytys ei riitä, ruutu muuttuu punaiseksi. Määritetään muut häviöteholähteet ja lasketaan tuuletuskapasiteetin kokonaistarve.

Tuuletustarve (m ³ /s) ISO-EN 8861 mukaan					
	konehuone max	40	°C		
	T _{in}	30	°C		
	ilmamäärä	22011,1	(m ³ /h)		
	Tilavuusvirta q _h	6,1	(m ³ /s)		
Paloilma	(m ³ /s) per kW (incl. 50%)		kokonaistarve (m ³ /h)	kokonaistarve (m ³ /s)	kokonaistarve (m ³ /s)
	Stoikiometrinen	0,00118	3598	Stoikiometrinen	ISO-EN 8861
	ISO-EN 8861	0,00339	10337	1,0	2,9
					(m ³ /s)
Konehuoneen tuuletuksen mitoitus				7,1	9,0
				426,8	539,1
					(m ³ /min)
Kanavan mitoitus					
	m	A	Stoikiometrinen	ISO-EN 8861	
			m/s	m/s	
W	0,8	0,72	9,9	12,5	
H	0,9				
øEq	0,9	0,67	10,5	13,3	

Kuva 3.11.4 kokonaisilmamäärän tarve sekä kanavan mitoitus. Suunnittelija kykenee tekemään mallin avulla iteraatioita muuttamalla oransseissa kentissä olevia muuttujia. Tavoitteena on löytää sellaiset arvot, että tulos täsmää sopivaan kaupalliseen standardipuhallinkokoon.

Kanavan mitoitus		Stoikiometrinen		ISO-EN 8861	
	m	A	m/s	m/s	
W	0,8	0,72	9,9	12,5	
H	0,9				
ØEq	0,9	0,67	10,5	13,3	

Puhaltimen mitoitus			
referenssipuhallin d1	0,8	m	$\frac{q_1}{q_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^3$ $\frac{dp_1}{dp_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2$ $\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^5$
n1	1750	rpm	
P1	7,5	kW	
Ref q1	7,5	(m³/s)	
dp1	25	mmH₂O	
ØEq = d2	0,9	m	
n2	1650	rpm	
Mitoituksen tulos			
d2 laskettu	0,8	puhaltimelle	
P2	3,76	kW	
demand q2	7,1	(m³/s) laskettu q2 =	7,1 (m³/s)
dp2	24,4	mmH₂O	

Kuva 3.11.5 Viimeisessä vaiheessa malli laskee puhaltimen parametrejä, millaisia suoritusarvoja tarvitaan kyseiseen applikaatioon. Laskennassa on sovellettu suoraan puhallinyhtälöitä. Keltaisilla kentillä olevia muuttujia vaihtamalla on löydettävissä sopiva kaupallinen puhallin (COTS).

Kun aluksen moottori on valittu, järjestelmän perusmitoitus on tehtävissä valmiin järjestelmämallin avulla.

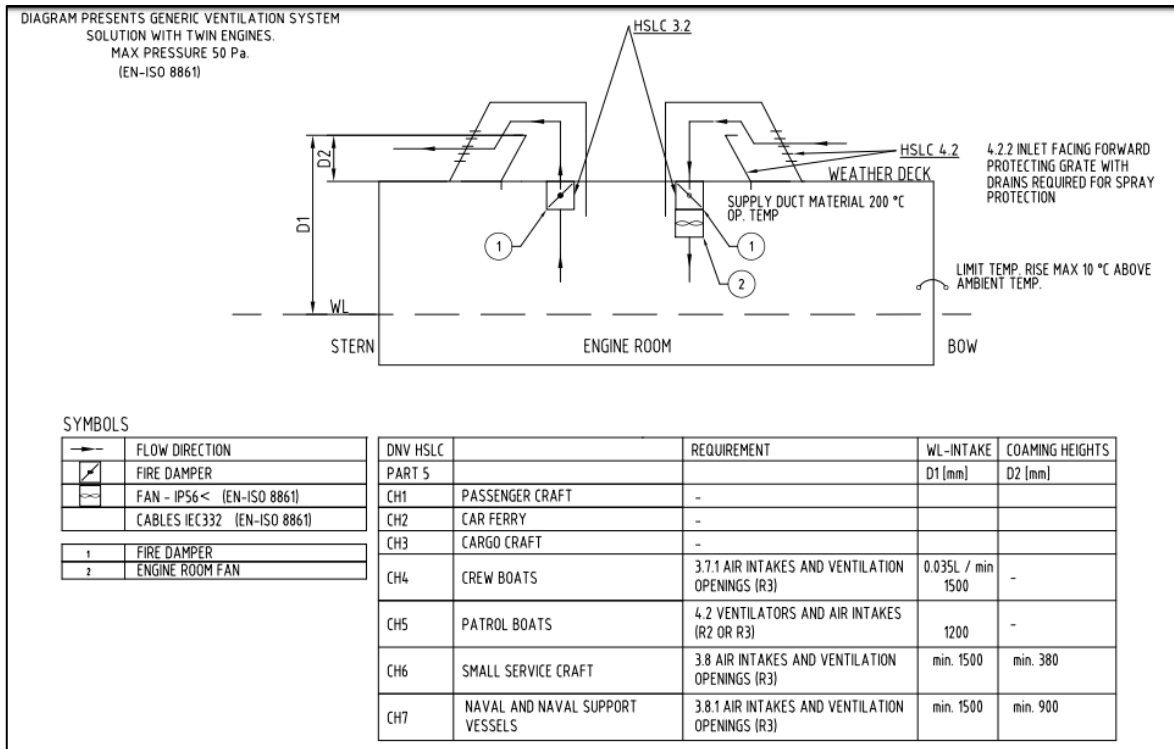
Mitoituksella valikoitui oheinen kaupallinen merikäyttöön tarkoitettu tuuletin, jossa sen kaikki viisi suorituskäypäparametria täsmäävät teoreettisella laskennalla saatuihin arvoihin: halkaisija d_2 , teho p_2 , kierrosalue rpm, tilavuusvirta q_2 ja dynaaminen paine dp_2 (kuva 3.12.6).

PRESTAZIONI:				PERFORMANCE:																						
Versione in C.A.				A.C. Version																						
Tensione 208V 1~ ; 208/360V 3~ 60Hz				Voltage 208V 1~ ; 208/360V 3~ 60Hz																						
VENTILATORE BLOWER	POTENZA Inst. POWER Inst.	POTENZA Ass. POWER Abs.	GIRI/1' RPM	db/A	PRESSIONE TOTALE mmH ₂ O										TOTAL PRESSURE mmH ₂ O											
					6	8	10	12	14	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80			
	kW	kW			PORTATA m ³ /1'										DELIVERY m ³ /1'											
ELL 315/D	0,37	0,14	1700	66	44	42	39	34	26																	
ELL 315/C	1,1	0,9	3400	81								91	85	82	78	73	67	60								
ELL 355/D	0,37	0,16	1700	68	58	54	50	44	38																	
ELL 355/C	1,1	1,1	3400	83								115	110	106	101	94	86	72								
ELL 400/D	0,37	0,22	1700	72		73	67	62	55	40																
ELL 400/C	1,8	1,7	3400	86								151	145	139	133	127	119	112	95							
ELL 450/D	0,37	0,34	1700	76		109	104	99	93	86	65															
ELL 500/D	1,1	0,9	1700	78					163	158	148	133	115													
ELL 560/D	1,5	1,3	1700	79						224	212	196	175	155												
ELL 630/D	3	2,5	1750	80						300	288	270	252	232	205											
ELL 710/G	3	2,7	1750	82					325	312	302	287	272	255	235	212	185									
ELL 710/H	4	3,6	1750	83						398	390	380	368	355	340	322	295	250								
ELL 710/I	5,5	4,8	1750	84							452	438	423	407	390	372	350	320								
ELL 710/L	7,5	6,6	1750	85										550	535	520	502	480	450	400						
ELL 800/H	5,5	4,8	1750	82							512	495	475	455	432	405	370	325								
ELL 800/I	7,5	6,6	1750	83										600	580	560	540	517	492	460	390					
ELL 800/L	11	9	1750	85											715	699	680	659	635	608	575	520				
ELL 800/M	15	12	1750	86													800	780	760	740	715	685	620			
ELL 900/E	11	9,2	1750	88											802	780	758	734	710	682	652	618	572	490		

Kuva 3.11.6 Kaupallisen COTS -puhaltimen valinta konehuoneen tuuletusapplikaatioon. [Giannecshi data lehti]

3.12. Ilmanvaihdon toimintaperiaate ja rakenne

Kuvassa 3.12.1. on esitetty konehuoneen tuuletuksen peruseriaate ja pääkomponentit. Geneeriseen mallikuvaan on tuotu tarvittava suunnitteluinformaatio luokkasäätö- ja IMO:n vaatimuskirjoituksista.



Kuva 3.12.1. Konehuoneen tuuletusjärjestelmän toimintaperiaate ja perusvaatimukset. Tuloilma ohjautuu sisään kulkusuunnassa. Kanavistossa on tulipalon varalta palopelti (1), jonka avulla ilman tulo konehuoneeseen saadaan katkaistua. Tuloilmapuhallin on termostaattilla ohjattu invertterikäyttöinen AC-puhallin (2). Poistopuolella ei ole omaa puhallinta vaan konehuoneen yläosassa olevan poistoaukon kautta lämmin huuhteluilma pääsee vapaasti poistumaan. Poistokanava on varustettu palopellillä (1).

Periaatekuvan lisäksi alla oleva mitoitustieto mahdollistaa aluksen yksityiskohtaisemman rakennesuunnittelun aloittamisen.

Rakenne:

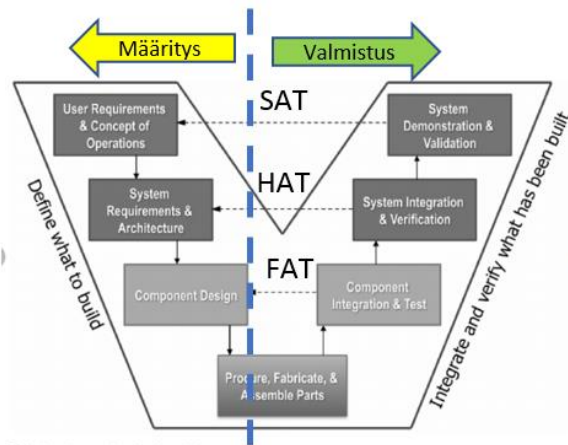
Virtausaukko: 800x900mm / D900mm
 Virtaus: 7.1 m³/s @ 3.76kW
 Virtausnopeus: 9.9 /12.5 m/s (Stoikiometrinen /EN ISO 8861)
 Puhallin tyyppi: ELL 800/H

4. TULOSTEN ANALYSOINTI

Tähän päälukuun on koottu yhteenveto tehdyistä tutkimuksista ja niiden analyyseistä.

4.1. Alkukartoitus ja kehityspotentiaali

Alkukartoituskyselyiden tulosten pohjalta on todettavissa, että suunnitteluvaiheessa luodut tuotannon tarkastusasiakirjat valmistuksen verifiointiin ja käyttöönoton validointiin toimivat käytännössä. Valmistuksen ja tarkastuksien aikataulut ovat täsmänneet ja kokonaisuudessaan projektin yleisaikataulu ja budjetti ovat toteutuneet tarkasteluajanjaksolla 2020.



Kuva 4.1.1 Systeemi V: kohdeyhteyksessä havaittu kehityspotentiaali on konseptointitoimintojen kehittämisessä (keltainen). Valmistuksen aikainen verifiointi (vihreä) sai sidosryhmäarvioinneissa kiitettävän arvon. [<https://www.researchgate.net/figure/Typical-systems-engineering-V-model>]

Tulos on linjassa järjestelmätekniikan kirjallisuuden kanssa. Tutkimuksissa on havaittu yksittäisten projektien ja yritysten parantaneen tuloksiaan systemaattisten verifiointi- ja validointitoimintojen kautta [2],[26]. Lisäksi on hyvä huomioida, että kyseisenä vuonna on eletty poikkeusoloissa niin Suomessa kuin muuallakin maailmassa.

KeKo-raportin uudelleenkatselointi ja siihen liittyvä palautekeskustelu tammikuussa 2021 suunnittelu- ja tuotantotiimien kanssa osoitti, että suunnittelutoiminnot eivät ole kuormitukseltaan täysin tasapainossa ja prioriteeteiltaan jäsentyneet.

Kun systeemi-V:n rakenne otetaan avuksi, kuvasta 4.1.1 voidaan todeta, että kohdeyrityksessä on V:n oikeanpuoleiset rajapinnat ovat suorituskykyiset saadun palautteen perusteella. Suunnittelun vasemman puolen rajapinnat kohti konseptointisuunnittelua ja asiakasvaatimuksia kaipaavat käydyn keskustelun KeKo- 2018 katsauksen perusteella enemmän huomiota ja suunnittelutyön jäsentämistä suorituskyvyn parantamiseksi.

Esimerkiksi vaatimusten hallintaan ei ole määritelty vakioitua työtapaa. Perusvaatimukset ja asiakasvaatimukset on selvitettävä tekstipohjaisista lähdedokumenteista. Työn uudelleenkäytettävyys ei ole suunnitelmallista.

Kirjallisuustutkimuksen perusteella kohdeyrityksessä ei ole kohdattu ainutlaatuisia ongelmia liittyen monimutkaisten järjestelmien kehittämistä. Pikemminkin voidaan tehdä johtopäätös, että samantyyppisiä ongelmia löytyy liittyen kirjallisuuskatsauksen yhteydessä löydettyihin tapauksiin.

Yleisesti ottaen yrityksen voimassa oleva strategia on tahtotila. Konseptointisuunnittelu ei voi yksin ratkaista yksin kaikkia suunnittelutyöhön liittyviä ongelmia, ainoastaan ne, joihin on olemassa edellytykset. Osa kirjallisuustutkimuksen yhteydessä syntyneistä kysymyksistä liittyvät yrityksen strategiaan tavoitteisiin ja näitä käsitellään osittain laajennetun SWOT-8 yhteydessä. Seuraavana on muutama strateginen kysymys, joiden selkeyttäminen voisi myöhemmin palvella konseptointisuunnittelun tehtäväkenttää:

- *Onko järjestelmäkehitykselle määritelty yleisiä tavoitteita, jotka ovat verifioitavissa yleisen alusteknisen järjestelmäkehityksen aikana, esimerkiksi: tuotesegmentointi, hintataso, keveys, suorituskyky, ympäristöystävällisyys, elinkaari, huollettavuus?*
- *Mitkä järjestelmätekniikan osa-alueet ovat ydinosaamisaluetta?*
- *Mitkä järjestelmätekniikan osa-alueet hankitaan pääsääntöisesti valmiina?*
- *Millä järjestelmätekniikan osa-alueilla halutaan erottua kilpailijoista?*
- *Strategiset kehitysohjelmat vuosisuunnittelussa?*
- *Yrityksen teknologiayhteistyö tutkimusinstituuttien kanssa?*
- *Teknologiariskien hallinta vuosikellotasoisella kehitysohjelmalla?*

Alkukartoituksen ja kirjallisuustutkimuksen yhdistelmän pohjalta on laadittu taulukon 4.1–1 mukainen laajennettu SWOT-analyysi. Tärkeimpänä tavoitteena on ensisijaisesti nähdä kustomoidut lyhyt sarjaiset alusprojektit strategisena vahvuutena, jotka vaativat omaa erityisosaamista, eli kannattavaa liiketoimintaa sarjakoko yhdellä.

Taulukko 4.1–1 Kehityspotentiaali tarkasteltuna 8-osaisella SWOT-analyysillä. Mahdollisuudet ja uhat tulevat organisaatioon ulkoapäin, vahvuudet ja heikkoudet ovat vallitsevaa osaamis pääomaa.

<p>Ulkoiset</p> <p>Sisäiset</p>	<p>Mahdollisuus</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tekninen edellä kävijyys • Nopeus ja ketteryys • Tietämys ja osaaminen 	<p>Uhat</p> <ul style="list-style-type: none"> • Heikentynyt kustannuskilpailukyky • Tekninen jälkeen jääminen • Suunnittelun hitaus ja osaamisen puute
<p>Vahvuus</p> <ul style="list-style-type: none"> • Yrittäjähenkisyys ja toimeenpanokyky, yhteishenki • Validointi- ja verifiointiprosessi on todistettavasti toiminut nykyisissä projekteissa (AQAP). • Suunnittelutoimintojen rajapinta ja kommunikaatio tuotantoon on parantunut sitten 2018 • PDM-käyttöönotto on parantanut dokumenttien versionhallintaa 	<ul style="list-style-type: none"> • Kustannusten hallinta on vietävissä systeemitasolle (<i>kustannukset, toiminnan tehokkuus, riskit</i>) • Sarjakoko yhdestä on tehtävissä yrityksen vahva tukijalka (=strateginen tavoite) • Kohdeyrityksen suunnitteluresursseja tulisi kohdentaa systeemisunnitteluun vuosikello-ohjelmalla, jolle on olemassa strategisesti määritetty päämäärä • Kustomoitujen alusten suunnittelun "karkeustason" määrittely; ne asiat, jotka tarkentuvat vasta kokoonpano-työvaiheessa • Laatia yksityiskohtaisempi suunnitelma perusjärjestelmien standardi / moduulimitoituksesta, esim. käytettävät putkihalkaisijat PA-, pilssi-, hydraulikka-, ja niin . järjestelmissä (=erilaisuuden ja variaatioiden systemaattinen vähentäminen) • Kohdeyrityksen asettamat yleiset tavoitteet systeemisuunnittelulle modulaarisuus, keveys, hinta, laatutaso • Moniselitteisten IMO:n alaisten säännösten 	<ul style="list-style-type: none"> • Mallipohjaisen suunnittelun käyttöönotto edellyttää hyvää dialogia organisaatiossa. Tekstipohjaisiin dokumentteihin pitää tukeutua. • Konseptointisuunnittelun tehtäväkenttä olisi määriteltävä yrityksen strategiaa vastaavaksi. Energiaa ei ole hukattavaksi kaikkiin hankkeisiin • Tavoitteiden kirkastamisen tarve • Osaavan henkilökunnan puute voi rajoittaa kasvumahdollisuuksia

	<p>perusvaatimusten kirjaaminen systeemimalleihin on hyödyllinen aloituskohta.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Suunnittelutyön tehokkuus perustuu osin tehdyn työn uudelleen käytettävyyteen • Mallipohjainen työskentely ei tarkoita sitä, etteikö ratkaisu voisi olla innovatiivinen 	
<p>Heikkous</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kokonaisuuksien hallinta ja työjärjestys • Vakiintuneiden katselmointikäytäntöjen puute: vaatimukset, edistyminen, DFM, FMEA • Yleisten strategisten tavoitteiden puuttuminen suunnittelutoiminnoista • Verkostoituminen on vähäistä • Suunnittelutyön uudelleen käytettävyys ei ole suunnitelmalista • Uusien konseptien valmisteluun käytetty aika ja tehdyn työn uudelleen käytettävyys? • Vaatimusten hallinnan laaja kirjo: - huonosti -akselilla 	<ul style="list-style-type: none"> • Suunnittelun prioriteettien täsmentäminen • mallipohjainen työskentely tuo systeemisuunnitteluun selkeän etenemisjärjestyksen ja tavoitteet • Mallipohjaisella työskentelytavalla voidaan ennaltaehkäistä/ vähentää vaatimusten vastaisten järjestelmien syntymistä • Yrityksen tietopääoman päämäärätietoinen kasvattaminen testaamisen ja kokeilemisen avulla, <i>"fail often and fast"</i>, • Kiireetön työilmapiiri stimuloi innovatiivisuutta ja mahdollistaa uusien ratkaisujen kokeilemisen • Tämän päivän omapepäiset, ei-standardit ratkaisut pitäisi ensisijaisesti nähdä mahdollisuuksina saada mallipohjaisen työskentelyn hyödyt esiin. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kyvyttömyys saada tarvittavia uudistuksia alkuun. • Kaikkea kaikille, ei selkeää fokusta • Kilpailun kovetessa, vaatimusten kasvaessa, ratkaisuja voi löytyä selkeyttämällä ja yksinkertaistamalla vakiintuneita käytäntöjä => uudistuspakko tai jälkeen jääminen • Tiimien yhteistyön ja kommunikaation ja koulutuksen suunnitelmallinen vuositasoinen kehittäminen lujittaa joukkovoimaa ulkoisia uhkia vasten • tiedolliset aukkokohdat, miten ne ovat löydettävissä

4.2. Pääoman kiertonopeuden vaikutus tuottavuuteen

Projektin taloudellisen tarkastelun osana käydään läpi NPV-menetelmää ja sen hyötyjä kuvitteellisen alusprojektiesimerkin avulla. Onnistunut konseptointi- ja suunnitteluvaihe voivat myötävaikuttaa sujuvaan toteutusprojektiin, joka mahdollistaa nopeamman pääoman kieron projektille.

Tässä luvussa on laadittu NPV-laskentaesimerkki kuvitteelliselle 4 miljoonan euron hintaiselle alusprojektille, jonka valmistaminen kaikkine suunnittelukustannuksineen on budjetoitu maksamaan 3.5 miljoonaa euroa. Koko projektin toteutusaika konseptointisuunnittelusta aluksen luovuttamiseen asiakkaalle kestää enintään 18kk.

Tämän analyysin tarkoitus on havainnollistaa, miten nopeutunut ja toisaalta alkupäähän painottunut maksupostiaikataulu vaikuttaa positiivisesti projektin tuottavuuteen ja nettokatteeseen. Laskenta ottaa huomioon ainoastaan maksuaikataulun muutokset asetetulla diskonttauskorkokannalla.

Kaikissa skenaarioissa suoritetaan sopimuksen allekirjoitushetkellä 350 000 euron suurinen käsiraha (dp). Skenaarioissa 1–5 on tarkoitus kuvata erityisesti sitä, miten kuukausittain tapahtuvat viivästyksöt projektissa aiheuttavat viivästyksiä maksuposteihin. Kassavirran painottuessa projektin loppupäähän koko projektin tuotto-odotukset heikkenevät. Skenaarioiden 1 ja 5 välinen nettotuottoero näin tarkasteltuna on 57 168 euroa (9 %) projektin valmistuessa 4 kk aiemmin. Skenaariot 2–4 asettuvat tähän välille. Yrityksen kyvyllä saada projektin suunnitteluvaihe ripeästi läpi on siis huomioitava vaikutus koko projektin kannattavuudelle. Jos suunnitteluvaihe viivästyy siten, että tuotantoaikataulu ei pääse alkamaan suunnittelussa aikataulussa, tuotannon on lähes mahdotonta kuroa kiinni jo menetetty tuotto-odotus. Lisääntyneen kiireen vuoksi laaduntuotto ja virheiden mahdollisuus kasvaa tuotannossa mahdollisten epätäydellisten työohjeiden - ja materiaalien vuoksi. Sekä tekniset, että taloudelliset riskit projektissa kasvavat. Kyseinen laskelma tarkastelee viivästystä ainoastaan kassavirran kautta. Pitkittynyt projekti tarkoittaa käytännössä enemmän käytettyjä työtunteja, jotka heikentävät projektin kokonaiskannattavuutta.

Taulukko 4.2–1 Nettonykyarvolaskelma 4 miljoonan euron arvoisen alusprojektin toteutus-skenaarioista. Suunnitellun aikataulun toteutumista voidaan simuloida erilaisilla skenaarioilla. Neljän kuukauden viive aiheuttaa 57 168 euroa pienemmän tuoton.

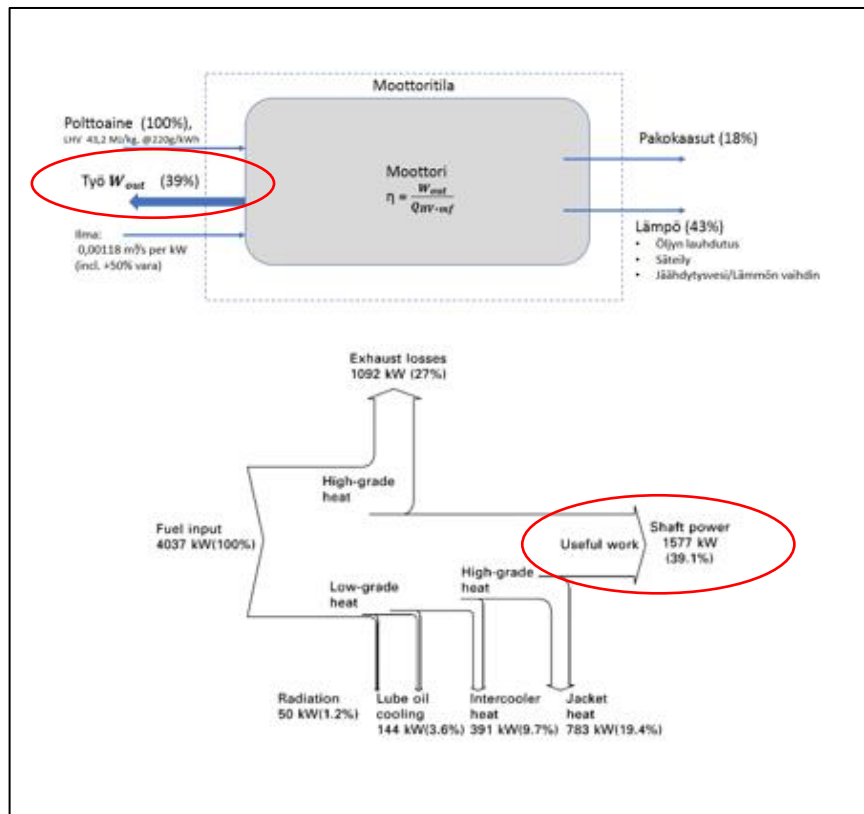
korko	0,05	kuukaudet	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6
		Projektin SiPo	-3500000	-3500000	-3500000	-3500000	-3500000	-3500000
Kassavirta	Maksuposti I (dp 10%)	1	350000	350000	350000	350000	350000	350000
Kassavirta		2	0	0	0	0	0	0
Kassavirta		3	0	0	0	0	0	0
Kassavirta		4	0	0	0	0	0	150000
Kassavirta		5	0	0	0	0	0	0
Kassavirta		6	0	0	0	0	0	0
Kassavirta		7	0	0	0	0	0	200000
Kassavirta	Maksuposti II	8	0	0	0	0	100000	100000
Kassavirta		9	0	0	0	100000	200000	200000
Kassavirta		10	0	0	100000	200000	250000	250000
Kassavirta		11	0	100000	200000	250000	350000	350000
Kassavirta	Maksuposti II	12	100000	200000	250000	350000	500000	500000
Kassavirta		13	200000	250000	350000	500000	1000000	1000000
Kassavirta		14	250000	350000	500000	1000000	1250000	900000
Kassavirta		15	350000	500000	1000000	1250000	0	0
Kassavirta		16	500000	1000000	1250000	0	0	0
Kassavirta		17	1000000	1250000	0	0	0	0
Kassavirta		18	1250000	0	0	0	0	0
		NetPresentValue	257 289 €	271 492 €	285 754 €	300 076 €	314 457 €	326 039 €
		ROI %	7,4 %	7,8 %	8,2 %	8,6 %	9,0 %	9,3 %
		GM lisäys	0 €	14 203 €	28 465 €	42 787 €	57 168 €	68 750 €
		Tuottavuuden lisäys		0,41 %	0,81 %	1,22 %	1,63 %	1,96 %

NPV-laskelma havainnollistaa projektin aikataulussa pysymisen tärkeyden. Aluksen lopulliseen budjetointiin liittyy arviot kiinteiden ja muuttuvien kustannusten osuuksista ja näistä muodostuvasta kustannusrakenteesta tuotto-odotuksineen.

4.3. Stoikiometrisen laskennan analysointi

HVAC-järjestelmämallin mitoituseriaate pohjautuu stoikiometriseen laskentaan, joka on empiirinen osa tätä tutkimusta. Stoikiometrinen laskentatuloks on linjassa (Q. Xin et. al. 2014) tutkimuksen kanssa, jossa on selvitetty raskaiden ajoneuvojen ympäristöystävällisyyden parantamista [39]. Moottorin tekemän työn (39.3 %) osalta tuloksissa on eroa ainoastaan 0.2 % (laskenta liitteessä VII).

Moottorin häviöiden osalta eroa on 2.9 % ja se on selitettävissä pitkälti laskennassa käytetty pakokaasulämpötilan pohjalta. Lisäksi kummatkin tulokset ovat yhtenevät kyseisen moottorivalmistaja käsikirjan tietoihin työn ja kokonaishäviöiden suhteellisen määrän osalta.



Kuva 5.3.1 Ylempänä tämän tutkimuksen moottorin malli (39.3 %) ja alempana vertailututkimuksen (39.1 %) Q. Xin et. al. 2014 yhteenveto dieselmoottorin energijakaumista.

Tässä tutkimuksessa laskettu ja (Q. Xin et. al. 2014) poikkeavat kummatkin pakokaasuhäviöiden osalta moottorivalmistajan ilmoittamasta 40 % lukemasta. Ero saattaa johtua siitä, kun laskettu stoikiometrinen ilmankulutus on noin 45 kg / min ilman +50 % lisämarginaalia. Valmistaja on ilmoittanut ilman kulutukseksi 64 kg / min, joka sisältää +50 % varailman. Polttoaineenkulutus on n. 3 kg/ min ja valmistaja on ilmoittanut pakokaasujen massavirraksi 67 kg / min. Kun 67 kg ilmoitetaan pakokaasujen kokonaismassana, siinä on mukana tämä +50 % varailma, jota moottori ei tosiasiallisesti käytä, vaan se jää ns. tuuletusvaraksi. Tämä olisi looginen selittävä tekijä pakokaasuhäviöiden laskennallisiin eroihin. Moottorivalmistajan käsikirjan antama paloilmankulutus (=reaktioyhtälön vasen puoli) täsmää kuitenkin hyvällä tarkkuudella reaktioyhtälön tuottaman laskentatuloksen kanssa. Asian käytännön merkitys on siinä, että tarvittavien jäähdytysratkaisujen lähtötiedot ja mitoitusarve olisivat

oikein. Moottorin paloilman määrälle kolmen eri tarkastelun kesken voidaan todeta, että standardin EN-ISO8861 ja Wartsila Encyclopedian of Ship Technology [45] ohjeistuksen tulokset ovat samat, erilaisesta ilmaisutavasta huolimatta. Reaktioyhtälön avulla laskettu stoikiometrinen arvo paloilman kulutukselle on noin kolme kertaluokkaa pienempi.

Wartsilan Encyclopedia [45 s 217] mainitsee konehuoneen tuuletustarpeesta yleisellä tasolla, kun taas 8861-standardi taas spesifisesti erikseen paloilmalle ja jäähdytykselle.

Yhteenvetona voidaan todeta yleistä järjestelmämallia ajatellen, että dieselmoottorin stoikiometrinen ilman kulutus on:

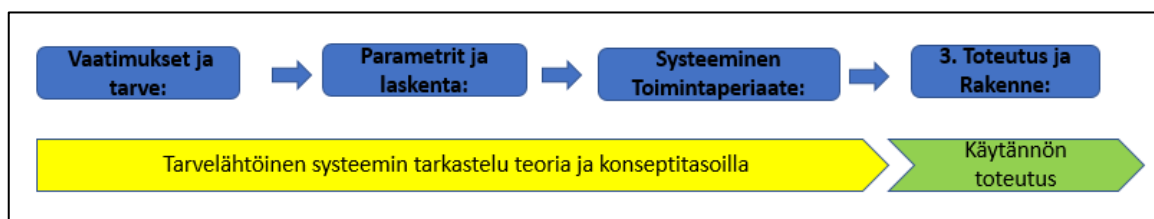
- 0,00118 m³/s per kW (sisältäen +50 % vara)
- 0,000789 m³/s per kW (ei varaa)

Kokonaisenergia 100 % jakautuu 39 % työ ja kokonaishäviöt 61 % osuuksille

Kun myöhemmässä vaiheessa näitä yllä olevia laskentatuloksia sovellettiin taulukkolaskentapohjaisessa järjestelmämallissa, mallinnus tuotti tulokseksi valitulle moottorityypille kaupallisen (COTS) puhallintyyppin, jonka kaikki viisi suoritusparametria vastasivat luettelosta löytyvää mallia. (teho, rpm, paine, dynaaminen paine, halkaisija)

4.4. Järjestelmien kehitys ja elinkaaren hallinta

Järjestelmämallin neliosaisen rakenteen voi nähdä prosessina, jonka neljä osaa muodostavat loogisen kokonaisuuden läpikäytävistä asiakokonaisuuksista. Asioiden käsittelyjärjestys saattaa vaihdella systeemeittäin.



Kuva 4.4.1 Järjestelmämallin rakentaminen konseptitasolta käytäntöön

Vaatimusten ja tarpeiden selvittäminen on luonnollinen ensimmäinen ja tärkeä vaihe. Samassa yhteydessä kootaan yhteen vakioita, laskentaparametreja ja raja-arvoja, joita tarvitaan laskennassa. Tämä on luonnostelevaa konseptitason työskentelyä.

Tämän jälkeen systeemin toimintaperiaatetta käsitellään teoriatasolla, miten sen toiminnot on laskettu ja mitoitettu käyttöympäristöönsä sekä miten ne vastaavat annettuihin vaatimuksiin. Tärkein yksittäinen vaihe on saada systeemi toimimaan teoriatasolla. Lopputuloksena voi olla lohkoavioesitys systeemin toimintaperiaatteista, missä kuvataan systeemissä kulkevan *tiedon/materiaan/energian* virtaukset.

Viimeinen rakenneosio on osa toteutustasoa, missä kuvataan systeemin pääkomponentit ja niiden keskinäinen kytkentä. Valmis lopputulos voi olla esimerkiksi tekninen järjestelmäkaavio, jonka hinta ja valmistusaika on määriteltävissä. Viimeisessä vaiheessa rakenneosiolle on suoritettavissa DFM/FMEA-analyysi yhdessä tuotannon kanssa. Tällöin yrityksen kaikille osapuolille on selvää, miksi systeemi on juuri sellainen kuin se on.

Mikäli kyseessä on *turvallisuuskriittinen systeemi*, sille olisi hyvä kuvata järjestelmä toiminnan luotettavuutta kuvaava kontrollirakenne STPA-menetelmällä. Kun kaikki tarvittavat elementit on huolellisesti dokumentoitu, voidaan jälkikäteen löytää tarvittavat lähtötiedot ja perustelut miksi on päädytty kyseiseen järjestelmämalliin.

Mallipohjaisen järjestelmäsuunnittelun perusajatuksena on tunnistaa systeemin perusrakenne: vaatimukset, parametrit ja laskenta, toimintaperiaate ja rakenne. Tämän tutkimuksen oletuksena on, että suunnittelutyön uudelleen käytettävyydellä ja sen systemaattisella kehittämisellä voidaan vähentää konseptointivaiheen työkuormaa. Perusvaatimukset ovat lähtötilanteessa selkeästi kuvattuina yleisten järjestelmien malleissa, niitä ei enää tarvitse erikseen etsiä tekstipohjaisista lähdedokumenteista. Vaikka ensimmäisessä vaiheessa MBSE-pohjainen järjestelmämalli olisikin pelkästään staattinen kuvaus, se sisältää kuitenkin kaikki MBSE:n sisällölliset elementit valmiiksi kuvattuina eli vaatimukset, parametrit, toimintaperiaatteen ja rakenteen.

Kun järjestelmien ominaisuudet ovat suunnittelijoiden helposti käytettävissä ja mallien laadullinen ylläpito on ennalta organisoitu, pelkästään konseptointivaiheessa on mahdollista kutistaa kokonaissuunnittelu-aikaa valmiiden mallien uudelleenkäytettävyyden ja muokattavuuden ansiosta. Systeemisuunnittelu mahtuu kokonaisuudessaan konseptointi- ja suunnitteluvaiheista elinkaaren hallintaan asti MBSE-viitekehukseen.

Kaikki systeemiä koskevat **vaatimukset** kootaan yhteen. **Laskenta** ja **parametrit** kokoavat yhteen käytettävät vakiot ja laskentaparametrit, joiden perusteella systeemin suorituskyky

on määritelty. Tämän jälkeen laaditaan kyseisen systeemin **toimintaperiaatetta** kuvaava esitys ja kaikki sen mitoituserusteet, rajapinnat. **Rakenne** kuvaa systeemin toteutustavan, tarvittavat komponentit, fyysiseen koon ja niin edelleen. Järjestelmämallin valmistuttua on mahdollista katselmoida valmistettavuus (DFM) ja arvioida riskit. Tavoitteena on, että kaikki tämä systeemiä koskeva tieto on helposti saatavilla ja yhteen koottuna. Yksinkertaisimmillaan järjestelmämallin voi toteuttaa esimerkiksi taulukkolaskentaohjelmalla.



Kuva 4.4.2. MBSE-järjestelmämallin toteutuksen neljä peruselementtiä

MBSE-pohjainen lähestymistapa mahdollistaa luontevasti organisaatioiden välisen yhteistyön kehitysvaiheessa. Systeimiratkaisuja katselmoitaessa voidaan tarkistaa strategisten tavoitteiden toteutuminen systeemitasoilla. Kuvassa (4.4.3) havainnollistetaan yksittäisten systeemilohkojen saamaa hyväksyntää. Kunkin systeemilohkon valmistelu, katselmointi ja hyväksyntä suoritetaan yhteistyössä ja tämän jälkeen kyseinen osuus voidaan jäädyttää. Kun mallin kaikki osa-alueet on katselmoitu ja hyväksytty, kyseinen malli voidaan hyväksyä käyttöön. Katselmoinnin yhteydessä otetaan kantaa myös yrityksen strategisiin kokonaistavoitteisiin hallita kustannuksia.

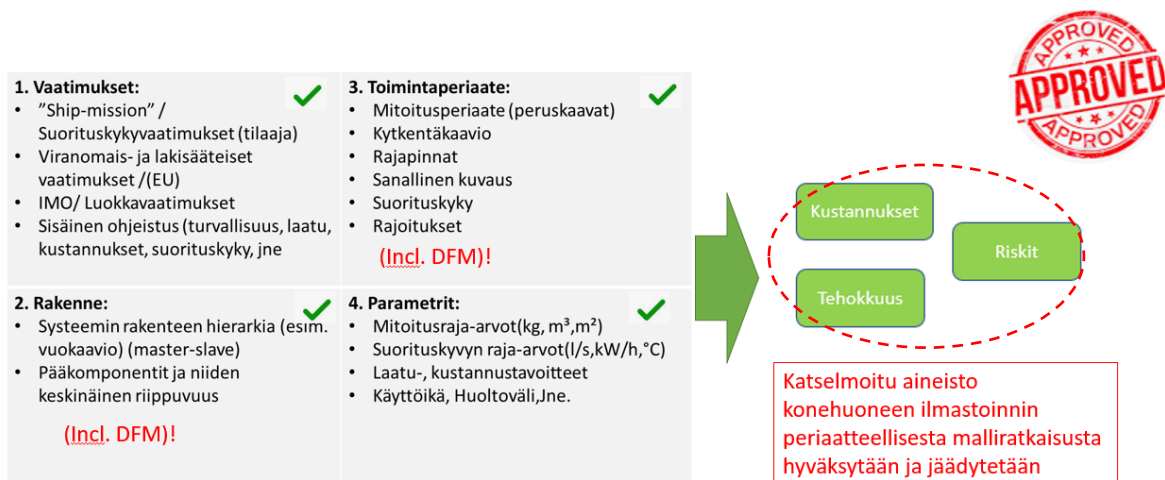
M.D. Watson et al. Engineering Elegant Systems, NASA [51] tavoittelevat systeemitekniikassa eleganssia. *"Sitä on vaikea määrittellä täsmällisesti, mutta ymmärrät, kun näet sen"* [51] Katselmoinnin yhteydessä tehtäviä tarkistuskysymyksiä [51]:

- 1) *Kuinka järjestelmä saavuttaa tavoitellut tulokset?*

- 2) Kuinka kustannustehokas suunnittelu on sen suorituskyvyn ja resurssien suhteen, joita tarvitaan rakentamiseen verrattuna kilpailevien vaihtoehtojen suhteen?
- 3) Kuinka järjestelmä toimii odottamattomissa olosuhteissa ja rinnakkaiskäytössä muiden järjestelmien kanssa?

”SFI-74 Konehuoneen ilmanvaihto”

Teknisen ratkaisun, hankinta- ja valmistuskustannusten sekä teknisten, että taloudellisten riskien arviointi on laadittavissa järjestelmämallin pohjalta



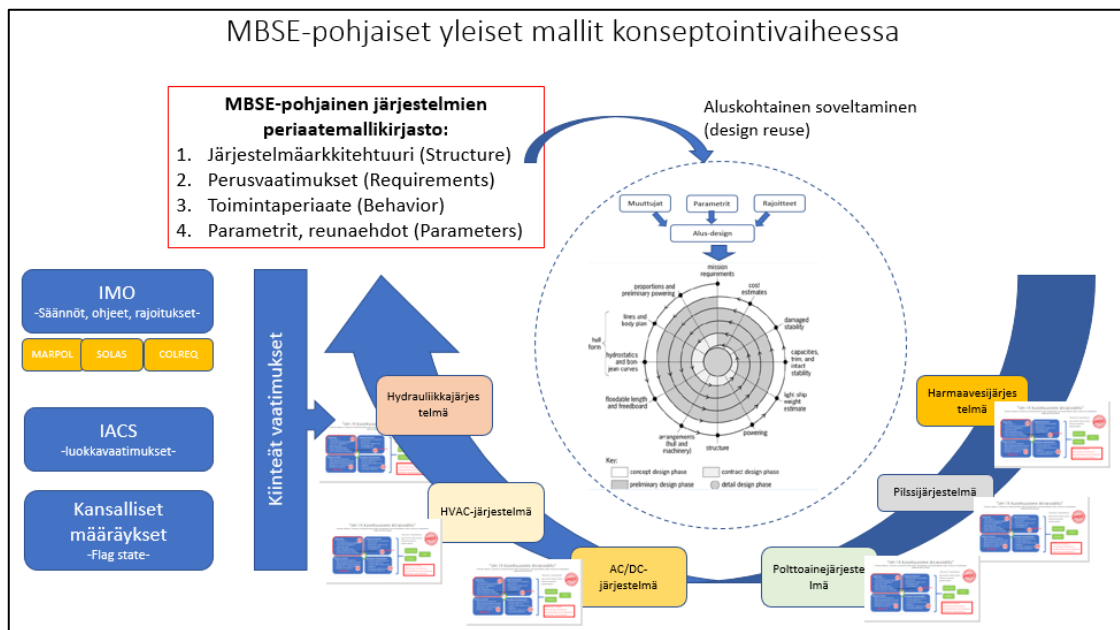
Kuva 4.4.3 Järjestelmämallien katselointi ja hyväksyntä tehdään tiimityönä. Yrityksen strategisten tavoitteiden toteutuminen on tarkistettavissa osana systeemin tarkasteluprosessia.

Kategoriset ylätasoon kustannuselementit toimivat automaattisesti arviointikriteereinä (**kustannukset, toiminnan tehokkuus ja riskit**). Lisäksi yrityksellä voi olla omia sisäisiä suorituskykyvaatimuksia kaikille systeemeille koskien esimerkiksi niiden keveyttä, modulaarisuutta tai kierrätettävyyttä, tms. Yritykselle tärkeiden tavoitteiden edistäminen viedään siis systemaattisella tavalla systeemitasolle. Suunnittelu- ja tuotanto-organisaatioilla on selkeä ymmärrys, miksi kyseinen systeemi on juuri sellainen kuin se on.

Perinteinen systeemikaavio ei sisällä tietoa siitä, minkälaisen pohdinnan ja teoreettisen tarkastelun tuloksena systeemikaavio on aikanaan syntynyt. Lisäksi se saattaa sisältää joitakin periaatteellisia heikkouksia. Tällaisen järjestelmän kopioituminen uuteen projektiin kartuttaa salakavalasti yrityksen latenttien riskien pääomaa. Jotkut alukset saattavat olla kilpailutilanteessa hintakriittisiä ja premium-luokan järjestelmät eivät tällöin tule kysymykseen. Joidenkin järjestelmien kohdalla on mietittävä sisältökysymyksiä arvon näkökulmasta. Yritykselle on tärkeä strateginen kysymys, missä hintaluokassa ja mihin segmenttiin alusmarkkinoilla ensisijaisesti tähdätään. Kilpailu markkinoilla on kovaa, joten riittävä

kustannustehokkuus ja siihen liittyvä tarvittava suorituskyky pitää rakentaa järjestelmätasoilla. Asiaa voi selkeyttää toista kautta, määrittelemällä alin taso, minkä alapuolelle yritys ei aluksia edes tarjoa. Kuvassa 4.4.4 esitetty prosessina, miten valmiita järjestelmämalleja voidaan hyödyntää konseptointisuunnittelun aikana osana normaalia suunnitteluprosessia.

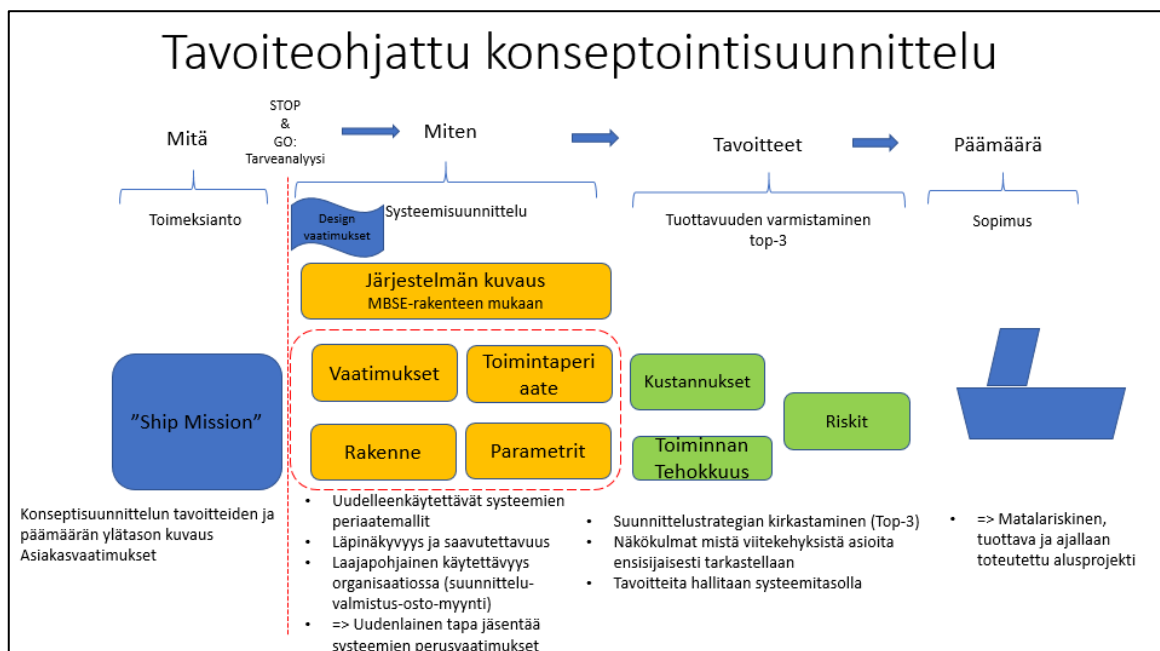
Tavoitteena on suunnittelutyön pitkälle menevä uudelleenkäytettävyys, jolloin olemassa olevia jäädytettyjä systeemimalleja hyödyntämällä voidaan rakentaa tarvittava uusi toiminnallinen aluskonfiguraatio.



Kuva 4.4.4. Kuva demonstroi tulevaisuuden visiota, jossa yksittäiset generiset järjestelmämallit ovat valmiina konseptointisuunnittelun käytävissä. Valmiit mallit kytkeytyvät osaksi normaalia aluksen perussuunnitteluprosessia. Kiinteät vaatimukset on jo huomioitu yksittäisen systeemin perussuunnitteluvaiheessa.

Järjestöpohjaiset määräykset ja säännöt ovat valmiina sisäkirjoitettuna näissä malleissa. Konseptointivaiheessa työn pääfokus on sovelluskohtaisessa mitoituksessa, ei sääntöpohjaisten tekstidokumenttien kertaamisessa. MBSE-pohjaiset järjestelmämallit kytkeytyvät luontevasti konseptointisuunnittelun perusprosessiin. Aluksen runkosuunnittelu on oma laajempi suunnittelukokonaisuutensa. MBSE-pohjainen suunnittelu tukee ensisijaisesti aluksessa olevien järjestelmien suunnittelua ja integrointia. Konseptointisuunnittelun valmistuttua on olemassa valmis kuvaus, miten aluksen suorituskyky on määritelty, mitä sen valmistaminen maksaa ja mitä riskejä hanke pitää sisällään. Yksityiskohtaisempi komponenttitason suunnittelu voi alkaa.

Kuvassa 4.4.5 esitetään mekanismi, jolla MBSE-pohjainen työskentely parantaa konseptointi- ja suunnitteluvaiheiden tuottavuutta, sekä kustomoitujen alusten elinkaaren aikaista suorituskykyä niin teknisesti kuin taloudellisestikin. Järjestelmämallien uudelleenkäytettävyys on keskeinen avaintekijänä [17]. Vasemmalla on asiakkaan esittämä tarjousmateriaali ”Ship mission”.

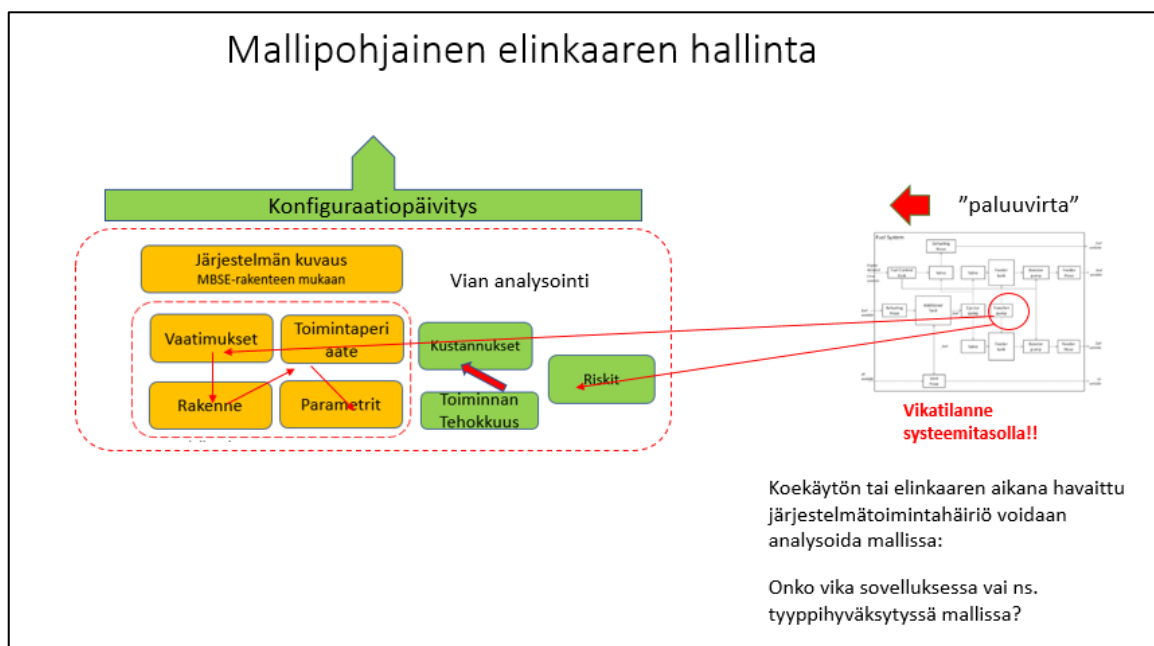


Kuva 4.4.5 Tavoiteohjattu konseptointisuunnittelun prosessi. Vasemmalta oikealle etenevä prosessi, joka alkaa annetusta tehtävästä. MBSE-mukainen systeemi määrittelee toteutustavan. Tavoitteiden toteutuminen tarkistetaan, kun käytetyt systeemit on valittu. Päämääränä on saavuttaa asiakkaan kanssa sopimus tunnetulla kustannus ja riskitasoilla.

Telakan tehtävänä on suorittaa huolellinen tarveanalyysi, jotta vastataan esitettyihin vaatimuksiin oikean sisältöisillä ratkaisulla. Tässä työssä esitetään, että tulevaisuudessa konseptointisuunnittelu voisi tuottaa tarvitsemansa tarjousaineistot pohjautuen pitkälti olemassa oleviin järjestelmämalleihin. Mitoitukset voidaan tehdä jäädytettyjen järjestelmämallien avulla uuteen konfiguraatioon, sillä mallin lohkot pitävät sisällään kaikki oleelliset suunnittelun ja valmistuksen tarvitsemat lähtötiedot. Konseptointisuunnittelulla on siis hyvä lähtökohta kustomoidun alusprojektin tuottavuuden hallintaan, tunnettujen elementtien kautta, kun käytettävissä on suuri määrä hyväksytyjä ja testattuja MBSE-rakenteen omaavia systeemiratkaisuja. Koko aluskonseptin kustannustaso ja toiminnan tehokkuuden edellytykset, kuten laatutaso ja valmistettavuus sekä järjestelmien sisältämät riskit ovat helpommin arvioitavissa, kun yrityksen strategisten tavoitteiden määrittely on alun perin

vietynä järjestelmätasolle. Lopullisena päämääränä on saada asiakkaan kanssa sopimus ja aloittaa matalariskinen, tuottava ja ajallaan toteutettu alusprojekti. Näin siis ainakin teoriassa. *Kuva 4.4.6* havainnollistaa, miten mallipohjainen työskentely tukee aluksen elinkaaren hallintaa. Ajansaatossa polttoainejärjestelmän yhteydessä havaitaan toiminnallisia ongelmia. Tapauksen käsittely siirtyy yritykselle reklamaationa ”paluu virtaan” ja tehtävänä on selvittää, johtuuko ongelma kyseisestä aluskohtaisesta sovelluksesta vai onko ongelma järjestelmän perussuunnittelun puolella. Mikäli näin on, vian syy ja korjaustapa dokumentoidaan malliin. Tämän jälkeen mallin uusi revisio aiheuttaa tarkastuksia kustannusten muodostuksen, valmistettavuuden ja työohjeiden sekä riskien arviointien osalta. Järjestelmämalli on siis eräänlainen ”solu”, joka kapseloi sisäänsä kyseisen järjestelmän valmistusreseptin. Yrityksellä voi olla oma systemaattinen tapa edistää haluttuja sisäisiä strategisia tavoitteita kaikissa järjestelmissä, kuten standardiosien lukumäärä, keveys, kierrätettävyys ja modulaarisuus.

Päivitettyä elinkaaren aikana havaitut löydökset järjestelmämalliin, vähennetään osaltaan hiljaisen tiedon kasaantumista asiaa ratkoviehen henkilöiden muistinvaraiseksi yrityspääomaksi



Kuva 4.4.6 Mallipohjainen järjestelmien elinkaaren hallinta. Vialliset ratkaisut tutkitaan systeemi- ja sovellustasoilla. Vian aiheuttajan selvittyä, päivityksen vaikutukset esimerkiksi kustannuksiin ja ostotoimintoihin sekä työohjeisiin pitää selvittää erikseen. Korjaavan ratkaisun tiedot päivityvät joko järjestelmämalliin tai siitä johdettuun sovellukseen.

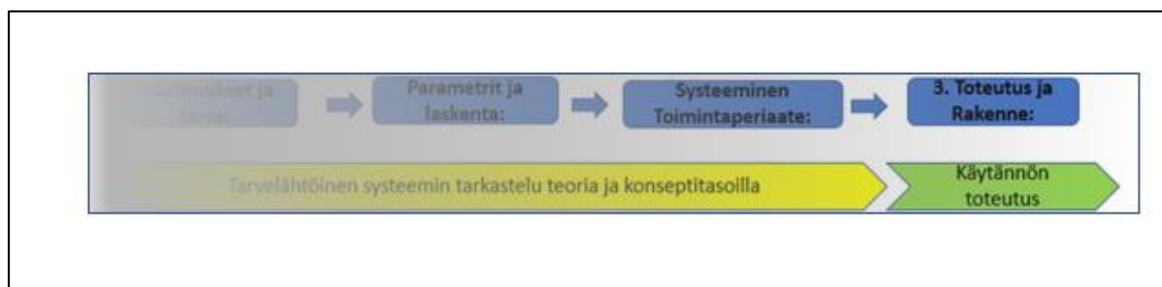
4.5. Konseptointisuunnittelun haasteiden analysointia MBSE-näkökulmasta

Tässä kappaleessa esitellään kaksi mahdollista konseptointisuunnitteluun liittyvää ongelmien syntymekanismia, jotka ovat esitettävissä mallipohjaisen järjestelmätekniikan keinoin.

Kohdeyrityksen nykytilannetta voi osin havainnollistaa kuvalla 4.5.1, jossa yrityksen suunnittelutoiminnot tiedostavat kaikkien mallipohjaisen suunnitteluun kuuluvat elementit, mutta ne eivät ilmene selkeästi jäsentyneinä ja kirkkaina varsinaisen systeemisuunnittelun eri vaiheissa. On varsin luontevaa ymmärtää käytännön inhimillinen syy, miksi yksittäinen suunnittelija syventyy ensin detaljeihin konfiguraatiotasolla, vaikka iso kuva on mahdollisesti epäselvä abstraktitasolla.

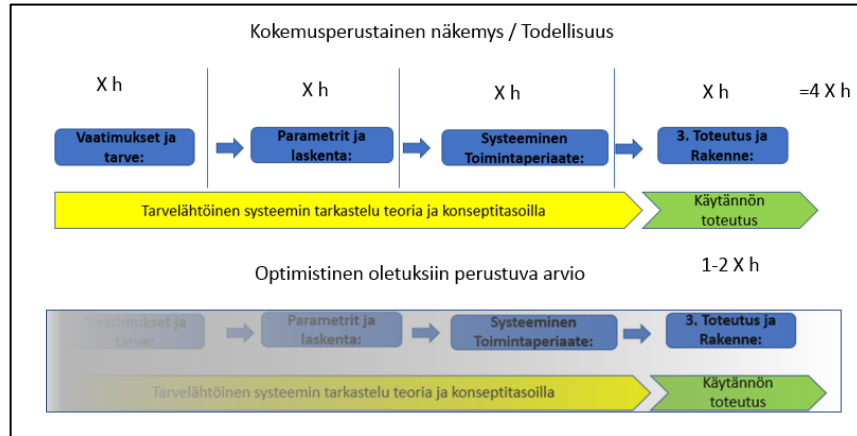
Otaksuttu käytännön ratkaisu ongelmaan näyttäytyy tuolla hetkellä kaikkein selkeimpänä mielessä, kaiken muun ollessa vielä ”hämärän peitossa”. Sekin voi olla yrityksessä määrittelemättä, kenen tehtävä on lukea vaatimuksia ja johtaa niistä periaatteiltaan toimivia systeemitasoisia ratkaisuja.

Tekstipohjaisista dokumenteista ei päästä täysin eroon tulevaisuudessakaan. Vietäessä perusvaatimukset suoraan järjestelmämallin, ne ovat siellä kuitenkin valmiiksi eroteltuina, lajiteltuina ja periaatteiltaan kuvattuina sekä toteutettuna hyväksytyssä järjestelmämallissa.



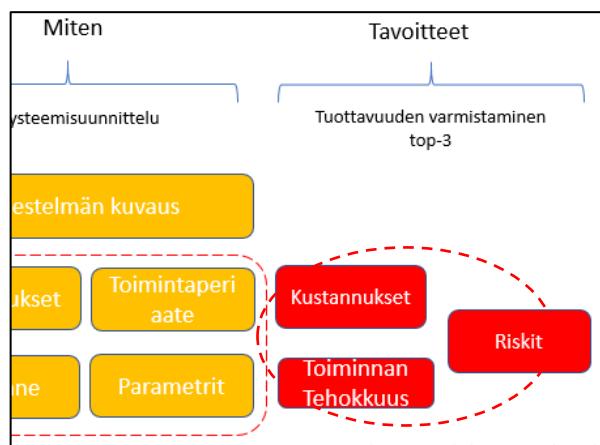
Kuva 4.5.1 Systeemin vaatimukset ja tarve, sekä sen teoreettinen toimintaperiaate näytetään epäselvinä.

Seuraavaksi tarkastellaan samaa asiaa vielä ajankäytön hallinnan näkökulmasta. Kuvassa 4.5.2 verrataan kahta eri skenaariota; ylinnä on tilanne, jossa järjestelmäkehitykseen vaadittava aika nähdään aikaisemman kokemuksen avulla selkeänä ja lähtökohtaisesti ymmärretään, että toteutusvaiheen saavuttaminen edellyttää vähintään 4 x h aikayksikköä työtä.



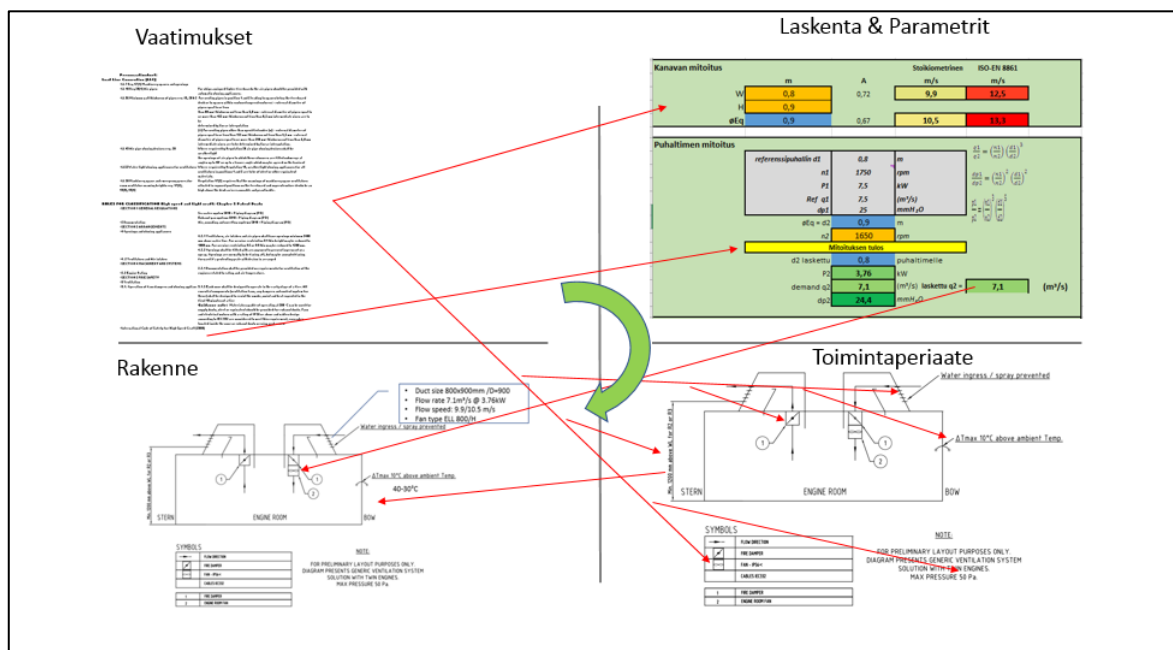
Kuva 4.5.2 Systemitekninen aikahorisontti: todellisuus vs. optimistinen arvio

Jos kuitenkin käy niin, että aikataulu laaditaan hatarien toiveiden ja oletuksien pohjalta uskoen, että vaaditun rakenteen toteuttaminen vie ainoastaan 1–2 x h aikayksikköä, ollaan tilanteessa, jossa kokonaissuunnittelu-aikataulu on alimitoitettu kuten alempi optimistinen näkemys arvioi. Puutuvat asiat ja järjestelmien yhteensopimattomuus vaatimusten kanssa sekä periaatteellinen toimimattomuus ilmenevät vasta projektin edetessä. Tämä tulee johtamaan projektin tavoitetta koskevien riskien toteutumiseen, kuva 4.5.3. Tässä esimerkissä käytetyt mallipohjaisen suunnittelun yksikkökohtaiset aikayksiköt ovat ainoastaan havainnolliset.



Kuva 4.5.3 Kaikki kolme projektin tavoite-elementtiä koskevaa mittaria ovat uhattuina ja "punaisella", kun systemitekniset puutteet ilmaantuvat yllättäen projektin suunnittelussa tai tuotantovaiheissa liian myöhään.

Edellä kuvattu esimerkki alleviivaa, miksi yrityksen järjestelmäteknisen lähtötason ymmärtäminen on tärkeää menestyksen saavuttamiseksi. Yrityksen johto määrittelee viimekädessä, millaisella riskitasolla operoidaan. Jos konseptitason järjestelmätekniseen kehittämiseen ja testaamiseen ei satsata ajoissa, on olemassa riski, että ko. järjestelmän liittyvät tiedolliset ja taidolliset puutteet, kustannuksineen realisoituvat maksettaviksi myöhemmin toteutusprojektien aikana. Valmiiksi piirretty rakennekaavio voi olla työnä huomattavan pieni osa kaikesta sitä edeltäneestä perusteellisesta selvitys- ja mitoitustyöstä fysiikan ja kemian peruskaavojen parissa. Vaatimusten hallinnan aukottomuus on toinen haasteellinen järjestelmätekniiikan osa-alue. Sitä kuvaava esimerkki on tämän tutkimuksen yhteydessä laadittu konehuoneen ilmanvaihdon systeemikuvauksesta. Kuvassa 4.5.4 on punaisilla nuolilla havainnollistettu, miten tekstipohjainen vaatimusdokumentti tosiasiallisesti linkittyy kaikkiin muihin MBSE-lohkoihin. Mikäli oletetaan, että suunnittelija osaa asiansa ja tietää tarkalleen, miten vaatimukset linkittyvät mitoitus- ja toimintaperiaatteeseen sekä rakenteeseen, niin kaikki menee kuten pitääkin. Mikäli taas on tilanne, että jokin vaatimuksen edellyttämä tiedollinen kytkös jää käytännön systeemikuvauksesta puuttumaan, niin todennäköisesti on syntymässä vaatimusten vastainen toteutus, joka ilmenee vasta myöhemmin seurannaisvaikutuksineen.



Kuva 4.5.4 MBSE-rakenteen omaava järjestelmämalli konehuoneen tuuletusjärjestelmästä. Kyseisen mallin koko sisältö on yhdessä taulukkolaskentatiedostossa. Kuva havainnollistaa, miten systeemin eri lohkot ovat keskenään vuorovaikutuksessa. Kuvan perusteella on jo nähtävissä, miten tekstipohjainen vaatimusosio linkittyy tosiasiallisessa

ympäristössään. Mahdolliset tietokatkokset punaisten nuolten osoittamissa linkeissä voi johtaa vaatimusten vastaiseen systeemin designiin ja lopulta toteutustasolla rakenteeseen.

Kummatkin edellä esitetyt esimerkit ovat hypoteettisia, mutta MBSE-viitekehiksestä tarkasteltuna käytännössä mahdollisia. Näiden esimerkkien avulla voidaan havainnollistaa, miten tehottomuus kytkeytyy osaksi suunnitteluprosessia ja tuotantoa. Mallipohjaisen järjestelmäsuunnittelun systemaattinen työtapa auttaa paljastamaan järjestelmien puutteet jo kehitysvaiheessa. Järjestelmän vaatimukset, mitoitus, toimintaperiaate ja rakenne tarkastellaan aina samoilla periaatteilla. Tämä tukee myös asetettua päähypoteesia, kuva 4.5.5. Riskien, kustannusten ja toiminnan tehokkuuden tarkastelu ovat osa järjestelmäsuunnittelua.



Kuva 4.5.5 Mallipohjainen järjestelmäsuunnittelu ohjaa yhtenäiseen tapaan tarkastella järjestelmän suorituskyky- ja kustannuselementtien sisältämiä riskejä.

5. POHDINTA

Diplomityö on tehty FITECH-verkostoyliopistossa LUT-Yliopiston alaisuudessa. Opintokokonaisuus on muodostunut LUT-Yliopiston konetekniikan pääaineopinnoista, Aalto Yliopiston Marine Technology sivuaineopinnoista sekä Vaasan Yliopiston moottori- ja energiatekniikan vapaasti valittavista opinnoista. Työssä on perehdytty nykyaikaisten ja suorituskykyisten ammattikäyttöön suunniteltujen alusten kehittämisen monimutkaisuuteen ja samanaikaiseen liiketoiminnan kannattavuuden hallintaan.

Tutkimuksen yhteydessä syntyi yksi käytännönläheinen konehuoneen ilmanvaihdon järjestelmämalli, jonka periaatteita testataan parhaillaan muihin meneillään oleviin projekteihin. Näiden järjestelmämallien luomisesta saatava käytännön kokemus osoittavat lopulta mihin suuntaan mallipohjaisen suunnittelutavan omaksuminen yrityksessä suuntautuu.

5.1. Tutkimusvertailua ja kirjallisuustutkimuksen havaintoja

Tämä diplomityö on käsitellyt tutkimuksissaan aihetta, joka koskettaa eurooppalaista meriteollisuussektoria laajemminkin.

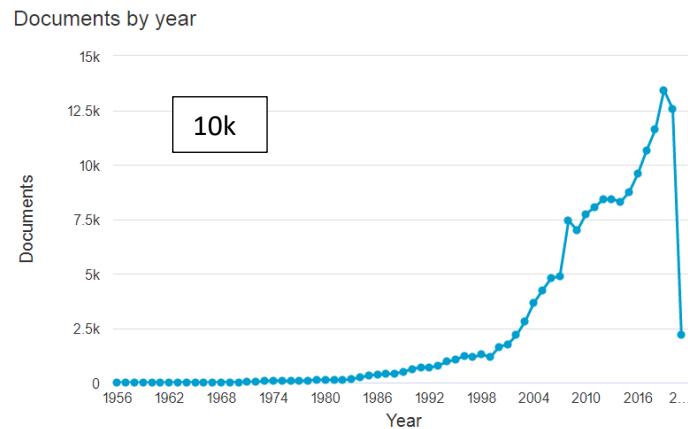
Eurooppalainen meriteollisuusklusteri ja laivanrakennuksen tutkimusyhteisö ovat yhdessä ryhtyneet ratkomaan meriteollisuuden kohtaamia kustannuskilpailukyvyyn haasteita. Hanketta varten on perustettu EU-rahoitteinen (Research & Innovation) -projekti (2016), *HOLLISHIP*, [<http://www.holiship.eu/>],[19].

Tässä yhteistyössä on mukana tunnettuja suomalaisia laivanrakennukseen erikoistuneita yrityksiä. Laivanrakennusosaamisen ympärille rakentuneen yhteenliittymän perusta muodostuu eurooppalaisen meriteollisuuden kohtaamista kovenevista vaatimuksista. Näitä vaatimuksia ovat mm. kustannusten ja kannattavuuden hallinta, asiakastarpeet, operatiiviset ja tekniset vaatimukset, sääntöpohjaiset rajoitteet, tekniset suorituskykyvaatimukset, elinkaarivaatimukset, ympäristö- ja kierrätysvaatimukset [19].

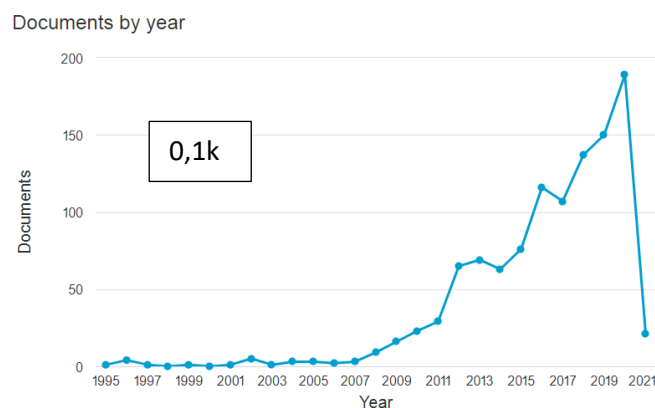
Projektien monimutkaisuus rakentuu näiden tavoitteiden yhteensovittamisen pakosta. Puutteellinen tietopohja, suunnittelutiimien välinen riittämätön yhteistyö ja toteutusaika sekä osaoptimoidut ratkaisut vaikeuttavat projektitiimien työtä entisestään. Tämän lisäksi on suuri määrä tulevaisuuteen liittyviä epävarmuustekijöitä, jotka liittyvät alusten elinkaaren hallintaan käyttöympäristössään. Nämä tekijät näyttäytyvät tavalla tai toisella suunnittelutyön lähtökohdissa. [19]

Eräs tärkeimmistä suunnittelun päämääristä on aluksen elinkaaren aikainen kustannusten hallinta. Tämä sisältää kunnossapidon ja ns. retro-fit-asennukset aluksen elinkaaren puolivälin tienoilla, kierrätyksen ja ympäristövaikutuksien huomioimisen [19].

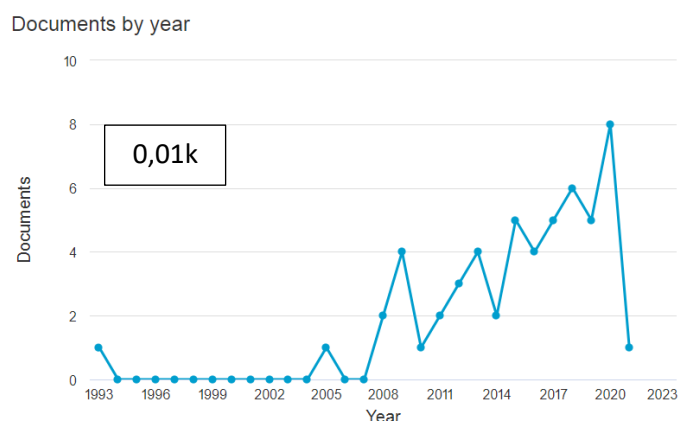
Perinteinen vaiheittainen laivasuunnittelun spiraalimalli (J. Evans 1959 [6]) nähdään nykyisin liian hitaana kehitystapana, kun tietokoneohjelmistot ja niiden yhteydessä toimivat simulointimallit mahdollistavat monimutkaisten ongelmien ratkaisemisen suuren laskentatehon avulla [19]. Oheinen otos Scopus Elsevier tietokannasta (03/2021) havainnollistaa, montako hakuosumaa saa hauilla: *Model Based System Engineering*, *MBSE* ja *Model Based System Engineering in Maritime industry*. Yhteinen nimittäjä on kasvava vuosittainen trendi.



Kuva 5.1.1 Scopus Elsevier hakusanalla Model Based System Engineering



Kuva 5.1.2 Scopus Elsevier hakusanalla MBSE



Kuva 5.1.3 Scopus Elsevier hakusanalla Model Based System Engineering in Maritime industry

Tuotteiden tekniset järjestelmät ja vaatimukset kovenevassa markkinatilanteessa kaventavat yritysten onnistumismarginaaleja tuloksellisessa liiketoiminnassa. Edellä olevat kuvaajat puhuvat sen puolesta, että järjestelmäteknikkaa koskevat tutkimukset ovat maailmalla kasvu-uralla. INCOSE organisaatiolla on merkittävä rooli maailmassa yhdistää tiedeyhteisö ja teollisuus kehittämään järjestelmäteknikan menetelmiä jatkuvasti.

Tämän tutkimuksen yhteydessä käsitelty järjestelmäteknikan kirjallisuus ja sovelluskohtaiset artikkelit, sekä niissä olevat esimerkit olivat keskenään johdonmukaisia kuvatessaan, miten systeemi V:n kaltainen verifiointi ja validointimenetelmien systemaattinen soveltaminen parantaa yksittäisten projektien edellytyksiä menestyä. Huolellinen tarveanalyysi ennen suunnitteluspesifikaation laatimista, luo projektille vahvan pohjan jatkaa eteenpäin.

Tässä tutkimuksessa, sama asia todennettiin kyselytutkimuksella joko koski yksittäistä projektia, jossa oli $n=10$ yksittäistä arvioitavaa alusta, $n=18$ yksittäistä sisäisen ja ulkoisen arvioitsijan antamaa arviota keskimäärin noin 4 arvosanalla asteikolla 1–5.

Tämä tulos oli rohkaiseva tunnustus pitäytyä kyseisessä käytännössä tulevaisuudessa. Kun kyseisestä arviointituloksesta keskusteltiin eri yhteydessä vuoden 2020 tapahtumia koskevassa ISO 9001/14001 laatuauditoinnissa 01/2021, siinä yhteydessä todettiin, että enää on vaikea parantaa tästä. Haaste onkin siinä, miten tulos pidetään korkealla tasolla jatkossa.

5.2. Tutkimuksen objektiivisuus

Tämän tutkimusaiheen on asettanut kohdeyrityksen toimiva johto. Tutkimuksen rajaus on suoritettu yhteistyössä tehtävän asettajan kanssa. Tutkimukselle, sen toteutustavalle ja viitekehykselle ei ole asetettu tuloksellista tavoitetta, tai palkkiotasoa.

Tutkimus perustui lähtökohdiltaan sekä sisäisille, että ulkoisille sidosryhmille teetetyillä kyselyillä. Kyselyiden kaikki vastaajat (n=18) ovat omakohtaisella työpanoksellaan osallistuneet kyseisen alusprojektin vuoden 2020 toimituksiin (n=10). Kyselyiden tavoitteena oli varmistaa tutkimusongelman tarkoituksenmukainen määrittely ja diplomityön sisällöllisen päämäärän selkeyttäminen.

Tutkimuksen menetelmällinen osuus tukeutuu vahvasti järjestelmätekniikan tutkittuihin ja tunnettuihin periaatteisiin hallita monimutkaisten järjestelmien kehitystä. Kirjallisuustutkimuksen yhteydessä ei tullut vastaan sellaisia väittämiä tai esimerkkejä, jotka olisivat olleet vahvasti ristiriidassa tämän tutkimuksen yhteydessä tehtyihin analyyseihin ja havaintoihin.

Tutkimuksen kohteena olevaa aihetta on mahdollista tutkia muista näkökulmista, esimerkiksi johtamisen näkökulmasta samojen sidosryhmäkyselyiden pohjalta.

Diplomityön tulosten on tarkoitus palvella kohdeyrityksen konseptointi- ja suunnittelutoimintojen jatkokehitystä 2021 alkaen.

5.3. Tutkimuksen reliabiliteetti ja validiteetti sekä virhetarkastelu

Tutkimuksen yhteydessä tehdyt kyselyt edustavat rajattua aikaikkunaa ja koskee yksittäistä projektia sekä siinä tuolloin mukana olleita henkilöitä. Kyselyiden tulos edustaa vuoden 2020 yrityksen suoritusta kyseisen projektin osalta. Tämän tutkimuksen käytettävissä ei ollut aikaisempaa tai toista samanlaista kyselyä teetettynä samalle ulkoiselle sidosryhmälle.

Tutkimus tukeutui 2018 tehtyyn projektien hallinnan kehitysraporttiin. Koska tuolloin mukana olleita henkilöitä oli tavoitettavissa enin osa (n=8/14), katsottiin sopivaksi, että aineiston uudelleen katselmoinnin avulla voidaan arvioida ajankohtaisia asioita, jotka liittyvät tämän tutkimuksen päämääriin.

Mallipohjaisen järjestelmäsuunnittelun empiirisen osuuden tutkiminen kohdistui aluksen konehuoneen ilmanvaihtojärjestelmään. Kyseinen järjestelmä valikoitui luontevuutensa vuoksi osana asiakokonaisuutta. Moottorivalinnan yhteydessä demonstroitii AHP-menetelmää,

koska moottori on kallis yksittäinen hankinta. Moottorin valinta taas vaikuttaa systeemisesti konehuoneen järjestelmiin, esimerkiksi polttoaine- ja jäähdytysjärjestelmään. Konehuoneen terminen tarkastelu osoittautui lopulta kiinnostavaksi tapaukseksi ja osaksi tutkimusongelman ratkontaa.

Stoikiometrisen laskennan tuloksia verrattiin toiseen tutkimukseen, kaupalliseen lähdeaineistoon ja EN ISO 8861 standardiin. Tuloksien pohjalta laadittu taulukkolaskentapohjainen järjestelmämalli osoittautui toimivaksi työkaluksi, kun tehtävänä oli valita konehuoneenilmanvaihtosovellukseen kaupallinen tuote. Tällä järjestelmämallilla ei ole vielä toistaiseksi tehty tosiasiallista mitoitustehtävää.

5.4. Keskeiset johtopäätökset ja löydökset

Diplomityön tavoitteena oli löytää uusia keinoja kustomoitujen alusprojektien tuottavuuden varmistamiseksi konseptointi- ja suunnitteluvaiheissa.

Tutkimusongelma muodostui laivasuunnittelun sisäisistä ja ulkoisista epävarmuustekijöistä, sovellettavien merenkulun sääntöjen asettamista reunaehdoista ja teknisten ja taloudellisten riskien muodostamasta monisyisestä kokonaisuudesta tavoiteltaessa haluttua aluksen suorituskykyä. Tutkimuksen tavoitteena oli löytää uusia menetelmiä monimutkaisuuden ja samalla kustannusten ja riskien hallintaan annetun tehtävän puitteissa.

Tutkimuskysymykset olivat:

- I. Mikä on kohdeyrityksen tämänhetkinen järjestelmätekniinen suorituskyky?
- II. Miten mallipohjaisella järjestelmäteknisellä lähestymistavalla voidaan selkeyttää ja helpottaa tapaa, jolla kohdeyritys pyrkii hallitsemaan systeemitason teknisiä ratkaisuja, niiden kustannuksia ja näihin liittyviä riskejä?
- III. Miten konseptointisuunnittelun keinoin voidaan vaikuttaa projektin kannattavuuteen?

Tutkimuksen päähypoteesina oli, että soveltamalla mallipohjaista järjestelmäsuunnittelutapaa konseptointi- ja suunnitteluvaiheissa, projektien tuottavuus ja tehokkuus on hallittavissa:

”Käsittelemällä kustannuksen muodostuksen pääelementtejä; kustannukset, toiminnan tehokkuus ja riskit jo järjestelmätasolla konseptointi- ja suunnitteluvaiheissa, on mahdollista

saavuttaa ennustettavampi projektin kustannusrakenne, verrattuna siihen, että näin ei menetellä.”

Kyselytutkimustenperusteella kohdeyrityksen järjestelmätekninen suorituskyky verifiointi- ja validointiprosessien osalta oli kiitettävällä tasolla ulkoisen sidosryhmän arvioimana. Sisäiset sidosryhmät kokivat tuotannon aikaisen verifiointin vähentävän virheiden syntymisen mahdollisuutta.

Suunnittelu- ja tuotantotiimit kokivat KeKo-2018 retrospektiivin yhteydessä, että suunnittelutoimintojen fokus ja prioriteetit eivät ole täysin jäsenyneet ja vaatimusten hallinnan osalta ilmenee ajoittain ongelmia. Tekstipohjaiset aineistot paljon käytettyinä hidastavat suunnittelutyön etenemistä, mahdollistavat virhetulkintoja ja epähuomiossa tapahtuvia unohduksia. Tämä ilmeni käytännössä, kun konehuoneen ilmanvaihdon toimintaperiaatteesta laadittiin kuvaus.

Mallipohjainen järjestelmäteknikka (MBSE) pyrkii siihen, että välttämätön tekstipohjaisten vaatimusten käsittelyvaihe tehtäisiin kerran ja kunnolla. Tutkimustulosten perusteella mallipohjaisen järjestelmäteknisen lähestymistavan avulla on mahdollista vähentää tukeutumista yksistään tekstipohjaisiin vaatimusdokumentteihin ja vastaavasti lisätä järjestelmämallien avulla tiedon uudelleenkäytettävyyttä. Lisäksi MBSE työskentelytapa eheyttää ja jäsentää monimutkaisten järjestelmien eri osatekijöitä yhteen. Tämä edesauttaa suunnitteluhenkilöstöä luomaan nopeammin yhteisen käsityksen systeemin suorituskyvystä vaadittua tarvetta vasten.

Yhteenvetona mallipohjainen järjestelmäkehitys kykenee vaikuttamaan myönteisesti yrityksen tuottavuuteen konseptointi- ja suunnitteluvaiheessa, tuotannossa sekä koko elinkaaren aikana. MBSE- tarjoaa viitekehyksen hallita systeemistä ja kroonista monimutkaisuutta sekä kustannuksia, jotka liittyvät kustomoituihin alusprojekteihin.

Mallipohjaisuus tunnistaa kaikissa järjestelmissä saman yhtenäisen rakenteen:

- i. tarpeen ja vaatimukset
- ii. laskennan ja parametrit
- iii. toimintaperiaatteen
- iv. rakenteen

- Järjestelmämalli kapseloi tiedon, perustelee toimintaperiaatteen ja määrittelee järjestelmän rakenteen. Geneerisestä järjestelmämallista voidaan johtaa sovellus, jonka perusta on tunnettu ja yhteisesti hyväksytty: uudelleen käytettävyys, optimoitu

rakenne, DFM, kustannustehokas ja matala riskinen, esimerkiksi todennettu FMEA, STPA

- Järjestelmämallin luonti on tavoiteohjattu (ulkoiset/sisäiset, strategiset): *kustannukset, toiminnan tehokkuus, riskit* (mittarit on määriteltävä yritystasolla)
- Järjestelmämallit muodostavat uudelleenkäytettävän mallikirjaston (esimerkiksi SFI-rakenne)
- Järjestelmämallit voivat olla taulukkolaskentaohjelmapohjaisia. Myöhemmässä vaiheessa niistä on laadittavissa esim. Matlab -Simulink -pohjaisia simulointimalleja.
- Pitkällä tähtäimellä yritys voi tutkia mahdollisuutta siirtyä SYSML-pohjaiseen MBSE-mallien hallintaan. Tällöin esimerkiksi yhden perusvaatimuksen tai parametrin muuttuessa, tieto päivittyy kaikkiin systeemimalleihin yhdellä muutostyöllä.
- Elinkaarenaikainen vika-analysointi voidaan tehdä mallissa teoriatasolta alkaen ja malli taltioi uuden ratkaisun.
- Järjestelmämallin luominen ja hyväksyminen lisää eri tiimien välistä yhteistyötä, ymmärrystä sekä parantaa yrityksen kommunikaatiota. Samalla vähentää omaperäisten ja itsenäisten ratkaisujen määrää.
- Mallipohjaiseen työskentelytapaan siirtyminen edellyttää yhteistä tahtotilaa vähentää monimutkaisuutta ja variaatioita, lisää standardointia, modulaarisuutta ja selkeyttä yhteistä työnkuvaa vaativan systeemikehityksen ääressä.
- Järjestelmämallien kehitystyön yhteydessä saattaa paljastua tiedollisia aukkoja. Nämä voidaan asettaa uusiksi tavoitteiksi yrityksen strategiseen vuosikelloon.
- Järjestelmämallin teoreettinen tarkastelu auttaa ymmärtämään syvällisemmin käytettyjen standardien periaatteita.

Järjestelmämallien avulla voidaan saavuttaa elinkaaren aikainen järjestelmien hallinta, selvittämällä onko löytynyt vian syy alkuperäisessä järjestelmämallissa vai mallista johdetussa sovelluksessa.

Konseptointivaiheessa on edellytykset varmistaa kustomoitujen alusprojektien tuottavuus hallitsemalla kustannuksia, riskejä ja toiminnan tehokkuutta kiinteänä osana normaalia kehitystoimintaa. Järjestelmän katselmointien yhteydessä asetettujen tavoitteiden ja vaatimusten sekä teknisten ja taloudellisten riskien tasot ovat arvioitavissa osana päätöksen tekoa.

Stoikiometrisen laskennan yhteydessä moottorivalmistajan datakirjasta löytyi poikkeama pakokaasun massasta ja sen suhteellisesta osuudesta kokonaisenergiasta. Ilman järjestelmien toimintaperiaatteiden tuntemista, tämän tyyppiset havainnot jäävät tekemättä osana järjestelmäkehitystä.

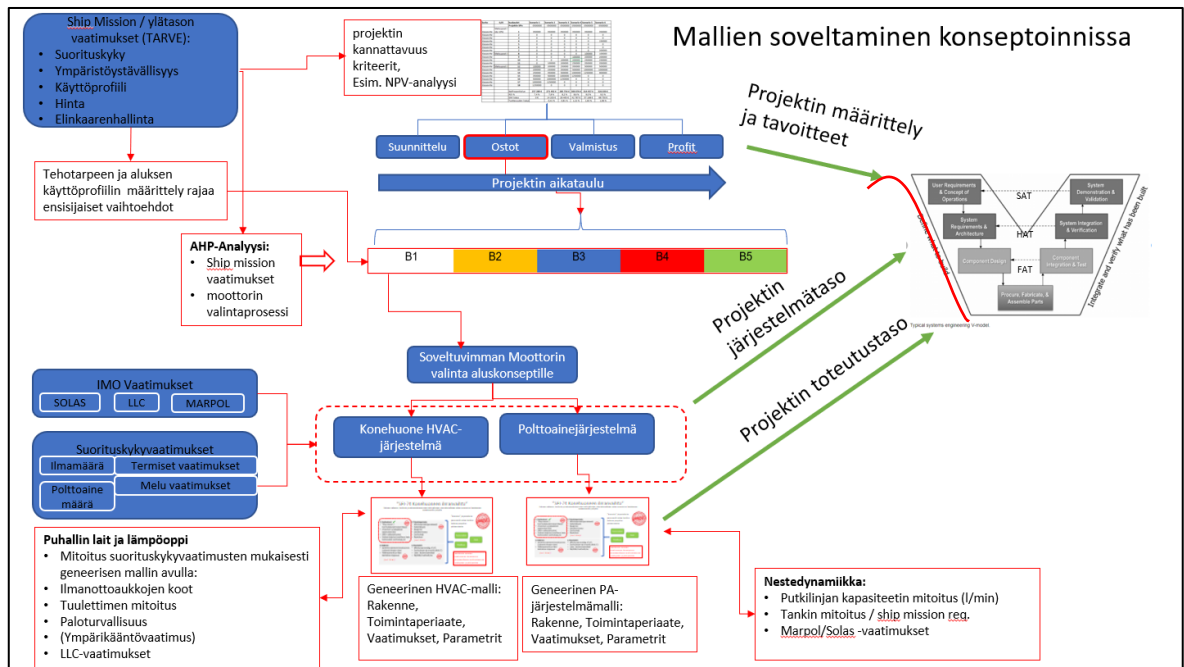
Samassa yhteydessä EN ISO 8861 standardin ohjeistamalle konehuoneen stoikiometrisen ilmamäärän suuruudelle tai paremminkin varmuusvaralle löytyi varmuuskerroin, noin 300 %. Suuremmissa aluksissa, joissa on enemmän tuuletusjärjestelmiä, järjestelmien systemaattinen ylimitoitus on jo melkoinen kustannustekijä. Kummatkin edellä mainitut esimerkit puoltavat sitä, että järjestelmäsuunnittelussa kannattaa pyrkiä teorian kautta laskemaan ensin tulos itsenäisesti, jotta voisi ymmärtää perusteet mihin oman alan kaupalliset ohjeet tai standardit perustuvat.

Konkreettinen järjestelmämalli konehuoneen ilmanvaihtoon osoitti käytännössä, miten monimutkaisuus kytkeytyy lähes huomaamatta näennäisen yksinkertaisen tehtävän ratkintaan. Järjestelmämallin loppukatselmointi olisi hyvä tehdä tiiminä, jotta suunnittelutyöajan uudelleen käytettävyys ja yhdessä oppiminen saataisiin maksimoitua. Lisäksi suunnittelijoiden kyvyt ja taidot voitaisiin käyttää luovempien ongelmien ratkomiseen aikaa säästäen.

Proaktiivinen STPA-pohjainen riskien kontrollirakenne kannattaa määrittää kehitysvaiheessa kaikille turvallisuuskriittisillejärjestelmille. STAMP-teorian mukaan onnettomuudet johtuvat kontrolliongelmista olosuhteiden asemesta.

Kuva 5.4.1 kokoaa yhteen tämän tutkimuksen yhteydessä kuvatun toimintamallin, miten mallipohjaisella järjestelmätekniikalla saadaan kokonaisvaltainen ote konseptointi- ja suunnittelutehtäviin.

Ylhäältä alas kulkeva toiminnallinen hierarkia kuvaa esimerkinomaisesti, miten konseptointivaiheen eri osa-alueet kytkeytyvät valmiiden järjestelmämallien avulla osaksi kustannustehokasta kustomoitua alusprojektia.



Kuva 5.4.1 Mallipohjaisen konseptointisuunnittelun jäsentynyt rakenne ja kytkeytyminen systeemi V-malliin projektin alussa.

Mallipohjaisen järjestelmäteknisen työskentelytavan aloittaminen ei vaadi alkuinvestointeja. Se vaatii uudenlaista ajattelutapaa nähdä järjestelmien syvälinen olemus. Järjestelmämallin kehitysvaiheen aikainen toimintaperiaatteen määrittäminen avulla on löydettävissä uusia näkökulmia lähdeaineistojen tarjoamiin parametreihin ja suosituksiin. Mallipohjainen järjestelmätekninen lähestymistapa on yksi mahdollinen keino ratkaista tutkimusongelma.

5.5. Tulosten uutuusarvo

Kohdeyrityksessä ei ole aiemmin tutkittu konseptointi- ja suunnittelutoimintojen tuottavuutta. Sisäisten sidosryhmien kanssa käydyissä palautekeskusteluissa koskien mallipohjaisen järjestelmäsuunnittelun periaatteita, tässä diplomityössä esitetyjä periaatteita on luonnehdittu seuraavin toteamuksin:

”mielenkiintoista”, ”jotain tommosta me tarvittais”, ”siinä on hyviä ja kiinnostavia elementtejä”, ”aikamoinen paketti”.

Se jää kohdeyrityksen päätettäväksi minkälaisin askelin MBSE- työskentelytapa edistyy tulevaisuudessa. Varmaa on, että alkuvaiheessa toimeenpanoon ei tarvitse investoida muuta kuin aikaa. Tussit, fläppitaulu ja taulukkolaskentaohjelma riittävät alkuun, yleinen raakadata löytyy merenkulun säännöstoista ja keskeiset järjestelmät aluksen perusrakenteesta.

5.6. Tulosten hyödynnettävyys ja yleistettävyys

Tämän tutkimuksen tuloksena syntynyt empiirinen järjestelmämalli jää kohdeyrityksen omaan käyttöön. Muilta osin tulokset puoltavat MBSE-lähestymistapaa järjestelmäteknikassa ratkaistaessa monimutkaisten järjestelmien kehittämiseen ja elinkaaren hallintaan liittyviä ongelmia. Kohdeyrityksessä on suuri joukko järjestelmiä, joille olisi tehtävissä samanlainen syväluotaava järjestelmätekninen tarkastelu ja mahdollinen jatkokehitys.

Tutkimuksellinen lähestymistapa koskien mallipohjaista järjestelmäsuunnittelua on yleistettävissä koskemaan laajaa joukkoa systeemeitä, niiden kehitystyötä ja analysointia toimialasta riippumatta.

Kohdeyrityksessä laaditut kyselytulokset edustavat otosta tuosta ajan hetkestä. Ne voivat tulevaisuudessa palvella muita vastaavia jatkotutkimuksia kohdeyrityksessä, kuten tämäkin tutkimus hyödynsi KeKo 2018 tutkimuksen tuloksia.

Monimutkaisuuden hallinnassa kannattaa ensin pyrkiä selvittämään, mikä on järjestelmän toiminnassa kaikkein oleellisinta. Tämän jälkeen hankkiudutaan eroon kaikesta havaitusta turhasta.

Käytännöntasolla näiden yllä mainittujen periaatteiden noudattaminen kohdeyrityksessä voisi tarkoittaa esimerkiksi selkeiden pelisääntöjen laatimista järjestelmäkaavioiden esitystavasta ja laajuudesta. Jos yhdellä kaaviolla esitetään mahdollisimman monen ympäröivän järjestelmän toimintoja, tämä voi mahdollisesti johtaa siihen, että kyseistä dokumenttia ei voida jäädyttää asiakkaalle tai luokittajalle hyväksyttäväksi, ennen kuin kaikki siihen kuuluvat järjestelmät on määritelty. Tällainen käytäntö on omiaan hidastamaan koko valmistusprosessia.

Konseptitasoinen toiminnallinen pilkkominen ja hajottaminen pieniksi järjestelmiksi edesauttaa modulaarisuutta sekä järjestelmien immuniteettia ympäröiviin muutoksiin ja häiriöihin, kun mahdolliset järjestelmien keskinäiset vuorovaikutustekijät saadaan paremmin rajattua. Esimerkkinä olkoon sähkölaitteiden EMC-häiriöiden proaktiivinen eliminointi perusuunnitteluvaiheessa.

5.7 Jatkotutkimusaiheet

Tämän tutkimuksen empiirisen osuuden yhteydessä käsiteltiin pintapuolisesti lämpöopin kannalta tärkeitä ilmiöitä, jotka jäivät vähemmälle huomiolle koskien aluksen konehuoneen termistä hallintaa. Alla olevat kappaleet esittävät uusia mahdollisia aiheeseen sopivia tutkimuskohteita.

5.7.1 Konduktio

Mikä on konduktion vaikutus konehuoneen ilmanvaihdon mitoituskysymyksissä eri alustyypeillä. Tämä uusi tieto voisi ohjata konehuoneen yleisiä ilman ohjaus- ja kanavointiratkaisuja.

EN-ISO 8861 standardi [45] esittää vallitsevan ilman suunnittelulämpötilaksi 35°C kun konehuone on työskentelytilaa. Aluksen konehuoneen rakenteeseen vaikuttaa muitakin vaatimuksia kuin ilmanvaihto ja ympäristön lämpötila. Aluksen vaatimuksissa on määritelty paloturvallisuustavoitteet (alumiinin sulamispiste on 660°C) ja tavoitetaso ajonaikaiselle melulle (dbA) ohjaamossa ja miehistötiloissa. Vuoraamalla konehuoneen seinät paloeristeellä, eli mineraalivillalla, saavutetaan kummatkin yllä mainitut tavoitteet. Konehuoneen jäähdytyksessä konvektio ja konduktio ovat hyödyllisiä ilmiöitä.

Alumiini omaa hyvän lämmönjohtamiskyvyn, merialumiinille lämmönjohtavuus λ on noin 200W/ mK. Alla oleva 1-dimesioisen johtumisen kaavalla [48] voidaan laskea väliaineen läpi johtuvan tehon määrä, kun väliaineen läpi vaikuttaa lämpötilaero. P on teho (kW), A on pinta-ala (m²), dT on lämpötilaero ja dx on ainevahvuus.

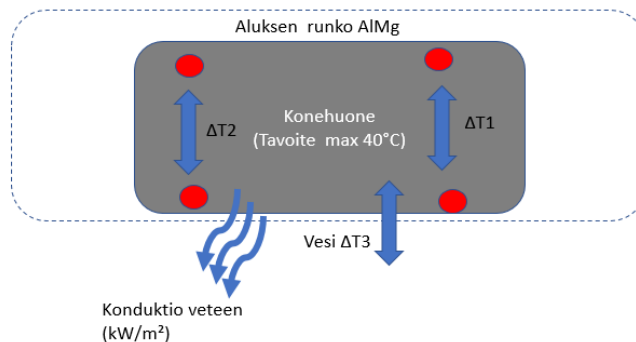
$$\lambda = \frac{P}{A x \left(\frac{dT}{dx}\right)} \quad (1)$$

Koska kaikki konehuoneen seinät on vuorattu paloeristeellä, sovellamme laskentaa ainoastaan aluksen pohjaan, jonka toisella puolella vaikuttava vesi voi vastaanottaa käytännössä äärettömän määrän lämpöä, mikäli konehuone on lämpimämpi kuin ulkona vaikuttava merivesi. Laskennassa oletamme pohjanpaksuuden olevan keskimäärin 8 mm, eli 0,008 m. Lämpötilaero veden ja konehuoneen ilman välillä oletetaan olevan ainoastaan

$$\Delta T = 1K, A = 1 \text{ m}^2.$$

$$P = \lambda A \left(\frac{dT}{dx}\right) \quad (2)$$

$$200 \times 1 \times \left(\frac{1}{0,008}\right) = 25 \text{ kW} \quad (3)$$



Kuva 5.7.1.1 Konduktion periaate veneen pohjan kautta. Tuomalla konehuoneen yläosassa olevaa lämpöä pohjaa vasten, saadaan konduktion avulla siirrettyä lämpöä meriveteen tehokkaasti.

Kohdeyrityksestä löytyi empiiristä mittausdataa punaisten pisteiden kohdilta erään nopeakulkuisen aluksen konehuoneesta. Lämpötilaerot olivat mittaushetkellä noin 15°C konehuoneen ylä- ja alaosan välillä.

Konduktion avulla tapahtuvaa jäähtymistä voisi olla hyvä tutkia käytännössä enemmän, koska paljas ja laaja alumiinipohja tarjoa erinomaisen ja suoran kosketuspinnan meriveteen. Jäähdyttämisen periaate perustuisi konehuoneen kerrostuneen ilman aktiiviseen sekoittamiseen ja lämmön siirtämiseen kohti veneen alumiinista pohjaa, josta se siirtyy konduktion avulla viileämpään meriveteen.

Nyky aikaisten dieselmootoreiden taloudellisin kuormitustaso saavutetaan käytännössä noin 80–85 % kuormitusasteella, tästä löytyy kohdeyrityksessäkin käytännön mittausdataa mainospuheiden tueksi.

5.7.2. Dynaaminen paine (Patopaine)

Toinen käytännönläheinen asia olisi selvittää mahdollisuutta hyödyntää ajonaikaista dynaamista painetta osana moottorin tarvitsemaa paloilmia. Tämä helpottaisi tuulettimen mitoittamista pienemmäksi, jolloin aluksen melutasoa ja tuuletin ratkaisun kokoa olisi mahdollisuus pienentää

Esimerkkialuksen kulkunopeus 2 x 847kW moottoreilla on suurin piirtein noin 40 solmua, (20.6 m/s)

Kulkunopeuden aiheuttama dynaaminen paine:

$$P_{dyn} = (\rho \times v^2) / 2 \quad (1)$$

joka näillä alkuarvoilla on ($\rho = 1,13 \text{ kg/m}^3$, $v = 20.6 \text{ m/s}$) => $P_{dyn} = 239.2 \text{ Pa}$

Toisaalta voidaan kysyä minkä kokoinen kanava pitää olla tällä ajonopeudella, että ilman tuotto q_h konehuoneeseen olisi kulutusta vastaava $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

$$d = \sqrt{\frac{4}{3.14 \times 20.6}} = 0,249 \text{ m} = \phi 0,25 \text{ m} \quad (2)$$

Kyseinen laskentatulokset osoittaa, että dynaamisen paineen avulla saadaan tuotettua $\phi 0,25 \text{ m}$ kanavakoolla juuri stoikiometrisen palamiseen tarvittava ilmamäärä sisältäen +50 % varmuusvaran. Tällaisella ratkaisulla saisi teknisesti varmistettua riittävän ilman saannin, sähköisen puhaltimen rikkoutuessa. Normaali tilanteessa dynaamisen paineen avulla saadaan joka tapauksessa tuotettua hieman lisäjähdytystä konehuoneeseen, $\Delta T 10^\circ\text{C}$

$$\Rightarrow P_{jäähd.} = q_h \times c \times \rho \times \Delta T \Rightarrow -11,4 \text{ kW} \quad (3)$$

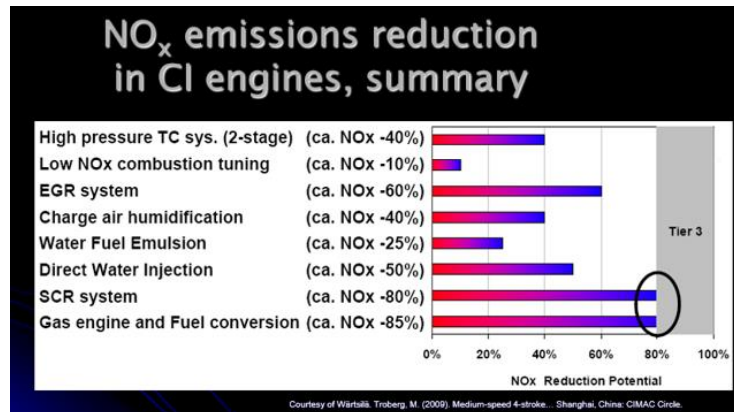
5.7.3. IMO-TIER III päästörajoitukset (NO_x)

Tämän työn kirjoitushetkellä uudet *IMO-TIER III* päästörajoitukset ovat astuneet voimaan Itämeren ja Pohjameren päästörajoitusalueilla (ECA) 1.1.2021. Tämän vuoksi tähän aiheeseen on tulossa käytännön tarvetta syventyä enemmän. Tällä vaatimuksella on systeminen vaikutus kaikkiin tuleviin konseptointi- ja suunnitteluprojekteihin.

Vaatimus: "Alusten, jotka on rakennettu 1. tammikuuta 2021 tai sen jälkeen ja jotka liikennöivät näillä päästöjenrajoitusalueilla, on oltava MARPOL-sopimuksen liitteessä VI olevassa 13.5 säännössä vahvistettujen *NOX Tier III -standardien mukaisia.*" [42]

Vaatimus tarkoittaa käytännössä sitä, että typenoksidien päästöt on saatava lähelle 0 % tasoa mm. Itämeren ECA- liikennöintialueilla liikkuvilla aluksilla, jotka on rakennettu ym. päivämäärän jälkeen. Vaatimustenhallinnan näkökulmasta tämä vaatimus pitää kirjata kohdeyrityksen moottorin valintaprosessimalliin yhteyteen yhdeksi uudeksi kriteeriksi. Käytännössä tällä hetkellä vain muutama moottorivalmistaja kykenee täyttämään nämä vaatimukset. Konseptisuunnittelun näkökulmasta on hyödyllistä tarkastella tarkemmin pakokaasujen

jälkikäsittelyyn liittyvää teoriaa, jotta tälle uudelle vaatimukselle voidaan myöhemmin laatia tähän sopivat malliratkaisut.



Kuva 5.7.3.1 Teknisiä ratkaisuja vähentää typen oksideja [Wartsila.com]

Typen haitalliset oksidit ovat erityisesti dieselmootoreihin liittyvä ongelma. Ongelman syntyyn on olemassa kaksi mekanismia: 1) terminen- NO_x ja 2) polttoaine- NO_x [43]. Terminen- NO_x aiheutuu liian korkeasta palolämpötilasta 1200°C-1500°C ja tämä on nykyaikaisten dieselmootoreiden tärkein typen oksidien syntymekanismi. Liian laiha A/F-suhde myötävaikuttaa korkeaan palolämpötilaan [43]. Polttoaine- NO_x riippuu polttoaineessa olevien kierrätys-/biokomponenttien tilavuus-% ja niiden typpipitoisuudesta polttoaineessa [43]. Kuvassa 5.7.3.1 on yhteenveto eri ratkaisujen kyvystä vähentää NO_x-päästöjä [43].

Typen oksidien vähentämiseen on olemassa neljä erilaista strategiaa [43]:

1. Polttoaineen koostumuksen teollinen muokkaaminen
2. Moottorin sisäiset muutokset: Palamisen optimointi, Pakokaasujen kierrätys (EGR)
3. Vesipohjaiset ratkaisut: a) paloilman esikostutus, b) Sylinterin sisäinen vesiruiskutus, c) Vesi-polttoaine-emulsio
4. Pakokaasujen jälkikäsittely (Selective Catalytic Reduction):
 - UWS-paino % 32.5 ("Adblue")
 - $4\text{NO} + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$

Yhteenvetona, SCR on nykyteknologioista edistynein ratkaisutapa saavuttaa tier III-vaatimukset dieselmootorissa. SCR-lisää entisestään konehuoneen varustelua ja aluksen monimutkaisuutta, hintaa ja painoa. Lisäksi katalyyttinen reaktio on uusi ylimääräinen lämmönlähde. Vaadittavat muutokset vaikuttavat aluksen hintaan ja suorituskykyyn.

6. YHTEENVETO

Diplomityön yhteydessä on tehty konseptointisuunnitteluun, järjestelmätekniikan teoriaan ja soveltamiseen liittyvää kirjallisuustutkimusta. Alkuperäisen asiakastarpeen syvälinen ymmärtäminen ennen suunnitteluvaatimusten laadintaa luo vahvan pohjan alusprojektille. Mallipohjainen järjestelmäsuunnittelu tukee konseptointityötä ja parantaa suunnittelutyön skaalautuvuutta, tunnistamalla systeemin neliosaisen rakenteen: vaatimukset, laskenta ja parametrit, toimintaperiaate sekä rakenne. Järjestelmämalli kapseloi kaiken oleellisen tiedon. Systemaattinen erilaisuuden vähentäminen ja vakioitujen standardiratkaisujen lisääminen vähentävät tarvittavaa suunnittelun määrää. Mallipohjainen suunnittelutapa tarjoaa vakiorakenteen elinkaaren aikaiseen järjestelmien hallintaan, jossa yrityksen strategiset tavoitteet, riskit, tuotannollisuus ja toiminnallisuus tulevat yhdessä arvioiduiksi. Kohdeyrityksen järjestelmätekniistä suorituskykyä arvioitiin tämän työn yhteydessä sekä sisäisen että ulkoisen sidosryhmäkyselyn avulla, koskien vuoden 2020 aikana toteutuneita alustoimituksia arvioiden.

Suunnittelutoimintojen nykytila-arvioinnissa tukeuduttiin 2018 tehtyyn laajaan aineistoon, jossa selvitettiin suunnittelu-, osto-, valmistus-, ja projektitoimintojen keskinäistä yhteistyötä ja suorituskykyä. Tämän diplomityön yhteydessä tehtiin katsaus tuohon aineistoon kyseessä olevien toimintojen edustajien kanssa. Siinä yhteydessä tunnistettiin sellaisia tekijöitä, jotka vielä pätevät alkuvuonna 2021.

Kuvitteellisessa konseptialusprojektissa sopivimman moottorin valintaan käytettiin AHP-menetelmää, ”ship mission” tavoitteisiin tähtäävillä monitahoisilla kriteereillä. Nettonykyarvomenetelmän avulla havainnollistettiin pääoman kierron vaikutusta projektin kannattavuuteen.

Konehuoneen tuuletusjärjestelmän mitoitus demonstroi mallipohjaisen järjestelmäsuunnittelun etuja. Järjestelmämallin luomiseksi aiemmin valitulle moottorimallille tehtiin reaktioyhtälön avulla stoikiometrinen laskenta ja tuloksia verrattiin moottorivalmistajan käsikirjaan ja toisen vastaavan tutkimuksen tuloksiin, tulosten vahvistamiseksi.

Tuuletuskapasiteetin mitoituksessa hyödynnettiin reaktioyhtälön tuloksia ja niitä verrattiin EN-ISO 8861 standardiin ja toisen moottorivalmistajan suositukseen tulosten vahvistamiseksi. Mallin avulla suoritettiin konehuoneen kanaviston ja tuulettimen mitoitus. Laskentatulosta verrattiin tuuletin valmistajan laiteluetteloon. Sieltä löytyi viiden parametrin perusteella täsmälleen tähän sovellukseen sopiva merikäyttöön tarkoitettu tuuletin. Tämän

tutkimuksen yhteydessä luotua järjestelmämallia on mahdollista käyttää vastaavanlaisiin mitoitustehtäviin.

Alhaisemmat suunnittelukustannukset eivät ole ensisijainen tavoite, vaan alhaisemmat kustannukset ja parempi tuottavuus ovat seurausta siitä, että tehdyn suunnittelutyön täsmällisyys ja uudelleenkäytettävyys, eli skaalautuvuus ja paranevat. Kohdeyrityksen asettamia strategisia tavoitteita on mahdollista tarkastella osana systeemikehitystä. Valmiit järjestelmä- / järjestelmämallit katselmoidaan yhteistyössä tuotannonedustajien kanssa, jolloin DFM, FMEA ja ”virheistä oppiminen” -näkökohdat tulevat huomioiduksi.

Tuottavuuden yleinen paraneminen perustuu siihen, että mallipohjainen työskentelytapa ohjaa järjestelmien perusteelliseen ymmärtämiseen organisaation kaikilla tasoilla. Täysimääräiseen mallipohjaiseen työskentelytapaan siirtyminen ei ole ongelmaton. Se vaatii koko organisaatiolta yhteistä tahtotilaa uudistaa tapaa, jolla yksittäisen systeemin olemus ymmärretään ja miten monimutkaista toimintaympäristöä halutaan hallita. Muutos ei tapahdu hetkessä ja muutosta johdetaan lopulta yrityksen valitsemalla strategialla. Monimutkaisuuden hallinta siirtyy seuraavaksi järjestelmätasolta johtamistasolle ja määritellyiksi tavoitteiksi organisaation eri tasoille.

Mallipohjaiseen järjestelmäsuunnitteluun siirtyminen ei vaadi alkuvaiheen investointeja, se on yrityksen motivoituneen henkilöstön yhteinen tahtotila rakentaa vahva kilpailukykyinen pohja tulevaisuuden hankkeille. Kannattava liiketoiminta eräkoko yhdellä voisi olla kohdeyrityksen strateginen tavoitetila.

Kaiken päätteeksi, mallipohjaisen järjestelmäteknikan (MBSE) ydinajatuksen voisi kiteyttää seuraavalla konseptillisesti varsin yksinkertaisella toteamuksella:

” Järjestelmän olemassaolo perustuu tarpeeseen. Se rakentuu toteuttamiskelpoiselle toimintaperiaatteelle, jolle on olemassa teoreettinen pohja. ”

-Allekirjoittanut-

LÄHDELUETTELO

- [1] Micouin, Patrice. Model Based Systems Engineering: Fundamentals and Methods, John Wiley & Sons, Incorporated, 2014. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/aalto-ebooks/detail.action?docID=1784136>.
- [2] INCOSE, and Wiley. INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, John Wiley & Sons, Incorporated, 2015. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/aalto-ebooks/detail.action?docID=4040424>.
- [3] Pries, Kim H., and Jon M. Quigley. Reducing Process Costs with LEAN, Six Sigma, and Value Engineering Techniques, Auerbach Publishers, Incorporated, 2012. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/aalto-ebooks/detail.action?docID=1165931>.
- [4] Friedenthal, Sanford, et al. A Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language, Elsevier Science & Technology, 2011. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/aalto-ebooks/detail.action?docID=787244>.
- [5] How to Fail at MBSE Matthew Hause – Atego Chief Consulting Engineer 2013. [Verkkodokumentti], PDF saatavana https://www.incose.org/docs/default-source/texas-gulf-coast/m_hause_how_to_fail_at_mbse.pdf
- [6] Ship Design and Construction Robert Taggart 1980. The Society of Naval Architects and Marine Engineers
- [9] Application of Operational Effectiveness Models in Naval Ship concept exploration and design Alan J. Brown Ship Science & Technology - Vol. 7 - n.º 13 - (9–21) July 2013, [Verkkodokumentti], PDF saatavana https://www.researchgate.net/publication/319173224_Application_of_Operational_Effectiveness_Models_in_Naval_Ship_concept_exploration_and_design
- [10] Soares, C. Guedes. Risk-Based Ship Design: Methods, Tools and Applications, edited by Apostolos Papanikolaou, Springer Berlin / Heidelberg, 2009. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/aalto-ebooks/detail.action?docID=438094>.
- [11] Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies Jeff A. Estefan Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology Pasadena, California, U.S.A. [Verkkodokumentti] PDF saatavana https://www.researchgate.net/publication/237302799_Survey_of_Model-Based_Systems_Engineering_MBSE_Methodologies
- [12] An Architectural Framework for Distributed Naval Ship Systems, Dorian Breffort et.al. University of Michigan, USA Agnieta, [Verkkodokumentti] PDF saatavana https://www.researchgate.net/publication/322178040_An_architectural_framework_for_distributed_naval_ship_systems

- [13] Aalto University Marine Technology MEC-E1004 Principles of Naval Architecture 2018 [Luentomateriaali]
- [14] Forman, Ernest, and Mary Ann Selly. Decision By Objectives: How To Convince Others That You Are Right, World Scientific Publishing Company, 2000. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/aalto-ebooks/detail.action?docID=1681311>.
- [15] Kroll, Ehud, et al. Innovative Conceptual Design: Theory and Application of Parameter Analysis, Cambridge University Press, 2001. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/aalto-ebooks/detail.action?docID=201761>.
- [16] Tuominen, Kari. Competitive Advantage through Mass-Customization - EFQM 2013, Oy Benchmarking Ltd, 2011. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/aalto-ebooks/detail.action?docID=3384327>.
- [17] Handling Complexity Aspects in Conceptual Ship Design Int'l Maritime Design Conference Glasgow, UK, June 2012 Henrique M. Gaspar et.al [Verkkodokumentti], PDF saatavana https://www.researchgate.net/publication/265621180_Handling_Complexity_Aspects_in_Conceptual_Ship_Design
- [18] Integration Principles of Complex Systems Joshua Logan Grumbach et.al. [Verkkodokumentti], PDF saatavana <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sys.21554>
- [19] Apostolos Papanikolaou Editor A Holistic Approach to Ship Design Volume 1: Optimisation of Ship Design and Operation for Life Cycle, [Verkkodokumentti] PDF saatavana https://www.researchgate.net/publication/327981297_A_Holistic_Approach_to_Ship_Design_Volume_1_Optimisation_of_Ship_Design_and_Operation_for_Life_Cycle
- [20] DNV-GL RULES FOR CLASSIFICATION High speed and light craft Edition July 2019 Part 5 Ship types Chapter 5 Patrol boats
- [21] IACS Interpretations of the International Convention on Load Lines, 1966 IACS Int. 2009
- [22] The Maritime and Coastguard Agency, International Code of Safety for High-Speed Craft (2000), 2000 HSC CODE AS AMENDED & APPLICABLE TO CRAFT BUILT ON OR AFTER 1ST JULY 2002 & BEFORE 1ST JULY 2008 Instructions for the Guidance of Surveyors
- [23] WÄRTSILÄ ENCYCLOPEDIA OF SHIP TECHNOLOGY, Second Edition by Jan Babicz ISBN 978-952-93-5536-5, [Verkkodokumentti] PDF saatavana <https://www.wartsila.com/docs/default-source/marine-documents/encyclopedia/wartsila-o-marine-encyclopedia.pdf>
- [24] Reddy, T. Agami, et al. Heating and Cooling of Buildings: Principles and Practice of Energy Efficient Design, Third Edition, Taylor & Francis Group,

2016. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/aalto-ebooks/detail.action?docID=5652948>.
- [26] Oppenheim, Bohdan W., and Bohdan W. Oppenheim. LEAN for Systems Engineering with LEAN Enablers for Systems Engineering, John Wiley & Sons, Incorporated, 2011. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/aalto-ebooks/detail.action?docID=697700>.
- [28] Merenkulun kattojärjestöt, [Verkkolähde], [viitattu 7.1.21] saatavilla <https://www.imo.org>
- [29] Luokituslaitokset, [Verkkolähde], [viitattu 7.1.21] saatavilla <https://www.iacs.org.uk/>
- [30] Luokituslaitosten toiminta, [Verkkolähde], [viitattu 7.1.21], saatavilla <http://www.iacs.org.uk/media/7425/classification-what-why-how.pdf>
- [31] Luokitustunnukset, [Verkkolähde], [viitattu 7.1.21] saatavilla <http://www.iacs.org.uk/media/2873/class-symbols.pdf>
- [32] Hsu, John, and Richard Curran. Advances in Systems Engineering, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/aalto-ebooks/detail.action?docID=4860402>.
- [33] Suomen NATO -yhteistyö [Verkkolähde], [viitattu 13.2.21], saatavilla https://www.defmin.fi/vastuualueet/kansainvalinen_puolustusyhteistyo/nato-yhteistyo#4b0385e7
- [34] Modular Open Systems Approach (MOSA) Reference Frameworks in Defense Acquisition Programs MAY 2020. Approved for public release. Distribution is unlimited. [Verkkodokumentti] saatavana pdf-tiedostona <https://ac.cto.mil/wp-content/uploads/2020/06/MOSA-Ref-FrameworkMay2020.pdf> [viitattu 6.1.2021]
- [35] MOSA- periaate [Verkkolähde], [viitattu 13.2.2021], saatavilla <https://www.dsp.dla.mil/Programs/MOSA/>
- [36] Aalto Yliopisto MEC-E2005 Ship Systems (2019), SFI-liite
- [38] John B Heywood: Internal Combustion Engine Fundamentals 2018 Second Edition Mc Craw & Hill
- [39] Q. Xin, C.F. Pinzon, Improving the environmental performance of heavy-duty vehicles and engines: particular technologies in Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance, 2014. [verkkodokumentti] saatavissa PDF-tiedostona <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/engine-thermal-efficiency>
- [41] STPA HANDBOOK Nancy G. Leveson John P. Thomas March 2018. [verkkodokumentti] saatavana pdf-tiedostona https://psas.scripts.mit.edu/home/get_file.php?name=STPA_handbook.pdf

- [42] IMO-Tier 3 vaatimukset [Verkkolähde], [viitattu 11.1.2021] saatavilla [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-Regulation-13.aspx)
- [43] UWASA- ENERFT3I30 (2019) Exhaust and flue gas after-treatment technologies [Luentoaineisto, jatkotutkimusaihe]
- [44] Monden, Yasuhiro, and Taiichi Ohno. Toyota Production System : An Integrated Approach to Just-In-Time, 4th Edition, Productivity Press, 2011. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/aalto-ebooks/detail.action?docID=1446651>.
- [45] ISO 8861:1998 Shipbuilding — Engine-room ventilation in diesel-engined ships — Design requirements and basis of calculations
- [46] Kehitys Koulutus (KeKo) Projektin hallintaprosessin kehittäminen T.Liukkonen et. al, 2018 [kohdeyrityksen aineisto]
- [48] Konduktion periaate [Verkkolähde], [viitattu 21.1.21] saatavilla https://energyeducation.ca/encyclopedia/Thermal_conduction
- [49] The Seven Samurai of Systems Engineering: Dealing with the Complexity of 7 Interrelated Systems 2008 James N Martin The Aerospace Corporation M/S CH1-410. [verkkodokumentti], saatavissa pdf-tiedostona https://www.researchgate.net/publication/229057077_312_The_Seven_Samurai_of_Systems_Engineering_Dealing_with_the_Complexity_of_7_Interrelated_Systems
- [50] Robert Scheurer Boeing Defense, Space and Security 2018 Mission Engineering, Digital Engineering, [verkkodokumentti], PDF-tiedosto saatavissa https://www.incose.org/docs/default-source/midwest-gateway/events/incose-mg_2018-11-13_scheurer_presentation.pdf
- [51] Engineering Elegant Systems: Theory of Systems Engineering M.D. Watson Marshall Space Flight Center, Huntsville, Alabama 2020 [verkkodokumentti] saatavissa pdf-tiedostona https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa_tp_20205003644_interactive2.pdf
- [52] Ship Design and System Integration Dipl.-Ing. Christina Vossen et a. 2013 Rolls-Royce Marine AS, Ship Technology – Offshore Systems. [verkkodokumentti], PDF saatavissa https://www.researchgate.net/figure/System-integration-by-Rolls-Royce-Marine-with-a-wide-product-range-of-in-house-equipment_fig4_273026917
- [53] Pyster, Arthur, et al. The Paradoxical Mindset of Systems Engineers: Uncommon Minds, Skills, and Careers, John Wiley & Sons, Incorporated, 2018. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/aalto-ebooks/detail.action?docID=5478987>
- [54] Parametripohjainen konseptointisuunnittelu [Verkkolähde], [Viitattu 1.2.2021] saatavilla <http://www.shiplab.hials.org/>

LIITTEET

Liite I Watercat-X Opinnäytetyön tavoitteet

- I. **Kartoittaa yrityksen nykyistä konseptointivaiheen työskentelyä järjestelmätekniikan näkökulmasta (Systems Engineering, SE)**
 - Tunnistaa hyväksi havaittuja vakiintuneita käytäntöjä sekä mahdollisia kehityskohteita
 - Löytää uusia mahdollisia käytäntöjä, joilla esimerkiksi esisuunnittelun määrää voitaisiin vähentää ja samalla mahdollistaa kilpailukykyisen projektin toteutuminen
 - Metodeina haastattelut, kyselyt ja aikaisempien projektien case-analysoinnit SE-näkökulmasta
 - Reflektointi kirjallisuuteen, alan tutkimuksiin ja käytännön tapauksiin ja sovelluksiin
 - => Ehdotuksia tavoitteiksi käytännön jatkotoimille
- II. **Kuvata esimerkinomaisesti case-pohjalta mallintamista, Model Based System Engineering (MBSE) viitekehyksestä.**
 - Periaatetasolla kuvattu mallinnus/mallinukset esim. aluksen HVAC-järjestelmistä, meriturvallisuusvaatimuksista tms. systeemikokonaisuuksista>> tarkempi rajaus tehdään tämän työn edetessä
 - Vaatimusten hallinta, systeemin rakenne ja käyttöympäristö, käyttäytyminen, reunaehdot, mallin uudelleen käytettävyys
 - Mallintamiselle mahdollisesti soveltuvat järjestelmät arviointi; rajoitteet, reunaehdot, edellytykset, ja niin edelleen
- III. **Työn lopputuloksena syntyvän aineiston mahdollinen soveltaminen**
 - Osana yrityksen perehdytysmateriaalia
 - Uudet käyttökelpoiset konseptointisuunnittelunmenetelmät / käytännöt tulevaisuudessa

Liite II Aikataulu

Tehtäv	Tehtävän nimi	Kesto	Aloit	Valmis	2020	4 tammi 2021						
					K	T	P	L	S	M	T	K
★	Aloituskokous	1 päivä	ke 11.11.2020	ke 11.11.2020								
★	DI-työ (kirjallinen)	105 päivää	ke 11.11.2020	ti 6.4.2021								
★	Kirjallisuustutkimus	73 päivää	ke 11.11.2020	pe 19.2.2021								
★	Sidosryhmäkysely U	11 päivää	ke 18.11.2020	ke 2.12.2020								
★	Sidosryhmäkysely S	19 päivää	ma 7.12.2020	to 31.12.2020								
★	KeKo-Retrospektiivi ja Sidos U/S katselmointi (I)	1 päivä	to 14.1.2021	to 14.1.2021								
★	Watercat X OHRY I	1 päivä	to 14.1.2021	to 14.1.2021								
★	Suunnittelutiimipalaveri (II)	1 päivä	pe 29.1.2021	pe 29.1.2021								
★	Suunnittelutiimipalaveri (III)	1 päivä	ma 15.2.2021	ma 15.2.2021								
★	Watercat X OHRY II	1 päivä	ti 16.2.2021	ti 16.2.2021								
★	Tiimikatselmointipalaveri(IV)	1 päivä	ti 23.2.2021	ti 23.2.2021								
★	Watercat X OHRY III	1 päivä	to 11.3.2021	to 11.3.2021								

Liite III Puhallinlait

Puhaltimen tilavuusvirta [24, s. 483]:

$$\frac{q_1}{q_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^3, \quad (1)$$

jossa q_1 = alkuperäinen tilavuusvirta, n_1 = kierrosluku ja d_1 = puhaltimen halkaisija

Puhaltimen dynaaminen paine (head) [24, s. 483]:

$$\frac{dp_1}{dp_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2, \quad [2]$$

jossa dp_1 = alkuperäinen puhaltimen tuottama dynaaminen paine, n_1 = kierrosluku ja d_1 = puhaltimen halkaisija

Puhaltimen ottama teho [24, s. 483]:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^5, \quad (3)$$

jossa p_1 = alkuperäinen puhaltimen ottama teho, n_1 = kierrosluku ja d_1 = puhaltimen halkaisija

Liite IV Moottorin valinta AHP-menetelmällä

Parivertailu aloitetaan arvioimalla arviointikriteerien keskinäinen vahvuus. Heikompi kriteeri saa arvon 1 ja vahvempi arvon 1 ja 9:n väliltä arvioitsijan subjektiivisen / omaan kokemukseen perustuvan arvion mukaan.

Parivertailun jälkeen muodostetaan $n \times n$ matriisi vertailtavien parien mukaisesti. Siinä lasketaan muodostettujen parivertailumatriisien eigen-vektoreiden arvot. Lopuksi lasketaan CI-arvo, joka on laskennallinen laatumittari laaditun matriisin sisällön johdonmukaisuudelle. Poikkeama ei saisi olla yli 10 %. Mikäli se on huomattavasti suurempi esim. 0.4 voidaan päätellä, että analyysin laadinnassa on tehty merkittäviä epä johdonmukaisia arviointoja [14]. Toinen tarkkailtava asia lopputuloksen analysoinnissa on eigen2 -vektorin kokonaislukua ilmaiseva numero, sen pitää olla samaa suuruusluokkaa tai suurempi kuin matriisin n , muutoin jotain on mennyt aiemmin pieleen.

1=sama		Aseta huonoimmalle 1 ja toiselle parille arvio kuinka paljon tärkeämpi			
3=kohtalaisesti tärkeämpi					
5=paljon tärkeämpi					
7=erittäin paljon tärkeämpi					
9=äärimmäisen paljon tärkeämpi					
	Valintakriteerit				
A1	Suorituskyky	3	1	A2	Hankintahinta
A1	Suorituskyky	4	1	A3	Maine/ Brandi
A1	Suorituskyky	4	1	A4	Ympäristöystävällisyys
A2	Hankintahinta	3	1	A3	Maine/ Brandi
A2	Hankintahinta	4	1	A4	Ympäristöystävällisyys
A3	Maine/ Brandi	3	1	A4	Ympäristöystävällisyys

Kuva IV.1 Arvioinnin periaate: Parivertailussa mitoitetaan ensin valintakriteerien keskinäinen tärkeysjärjestys parivertailujen avulla.

Tämän jälkeen parivertailusta laaditaan laskentamatriisi. *sarakeessa lasketaan rivin tekijöiden tulo. $n\text{Root}$ -sarakeessa otetaan n :s-juuri edellisen sarakkeen tulosta. Eigen1 arvo on normalisoitu arvo $n\text{Root}$ -sarakeesta ja luku saadaan jakamalla $n\text{Root}$ -rivin arvo koko sarakkeen summalla. Eigen1 sarake ilmaisee mikä parametreista A1-A4 on suhteellisesti vahvin. Eigen1 arvojen summan tulee olla 1, jotta normalisointi on laskettu oikein. Eigen2 sarake lasketaan kertomalla matriisin rivit A1:A4 Eigen1 -sarakeella rivi kerrallaan. Viimeinen sarake saadaan Eigen2 ja Eigen1 sarakkeiden osamäärästä. Consistency

Index CI on sarakkeen e_2/e_1 sisältämien lukujen keskiarvo. Tämä keskiarvo on **λ_{\max} -luku**, jota käytetään Consistency Indeksien laskennassa. Mikäli e_2/e_1 sarakkeen luvut olivat pienempiä kuin matriisin n , tässä ensimmäisessä tapauksessa 4, silloin tietää varmuudella, että jotain on mennyt aiemmin pieleen.

Laskennassa tarvitaan **Random consistency index, RI** ja luvut on valmiiksi taulukoitu matriisin n -luvun mukaisesti AHP-teoria-aineiston yhteydessä

Taulukko IV-1 Random consistency index, RI

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Taulukko IV-2 Parivertailun tuloksen laskenta taulukkolaskentaohjelman avulla. Lopuksi tehdään tuloksen laadullinen tarkastelu laskemalla CR-arvo

	A1	A2	A3	A4	*	nRoot	Eigen1	Eigen2	e_2/e_1	
A1	1,00	3,00	4,00	4,00	48,000	2,632	0,5130	2,185	4,260	
A2	0,33	1,00	3,03	4,00	4,000	1,414	0,276	1,157	4,197	
A3	0,25	0,33	1,00	3,00	0,248	0,705	0,137	0,578	4,206	
A4	0,25	0,25	0,33	1,00	0,021	0,379	0,074	0,316	4,284	
				SUM	52,268	5,131	1,000	Average	4,237	λ_{\max}
								CI=(λ_{\max} -n)/n-1		0,079
								CR=CI/RI		0,088
								RI		0,9

Consistency Ratio $CR < 10\%$, joten parivertailu on johdonmukainen.

Valintakriteereiden keskinäinen vahvuusjärjestys on tässä arvioinnissa seuraava: 1 = suorituskyky (0,513), 2 = hankintahinta (0,276), 3 = Maine/Brandi (0,137), 4 = Ympäristöystävällisyys (0,074)

Seuraavassa vaiheessa laaditaan moottoreiden parivertailut valittuja kriteereitä vasten. Tässä parivertailussa, suorituskykyä arvioidaan tehopainosuhteen, moottorin ratingin sekä tehon ja painon suhteen erikseen. Tällä tavoin arvioitsija voi ryhmitellä saman kategorian eri mittareita hieman eri näkökulmista, riippuen siitä mikä on ison kokonaistavoitteen, ”**ship missionin**” kannalta oleellisempaa. Esimerkiksi huippunopeus tai suuri toimintasäde tai suuri vuotuinen käyttötuntimäärä.

Moottorimallit ovat B1-B5 ja ensimmäinen parivertailu on tehty **suorituskyvyn** mukaan. painottuen moottorin hyvään teho painosuhteeseen sekä ratingin sallimaan 100 % käyttöalueen laajuuteen.

Yleisen teorian mukaan parivertailun laajuus määräytyy alla olevan kaavan mukaisesti, jossa n on vertailtavien yksiköiden lukumäärä. Tässä AHP- esimerkissä vertaillaan viittä moottoria, joten testattavia pareja on tällöin 10.

Taulukko IV-3 Suorituskyvyn arviointimatriisi ja hyvyysluku CR on 3.4 %

	B1	B2	B3	B4	B5	*	nRoot	Eigen1	Eigen2	e2/e1	
B1	1	3	2	3	5	90	2,460	0,411	2,176	5,296	
B2	0,33	1	2	1	4	2,64	1,214	0,203	1,038	5,116	
B3	0,5	0,5	1	0,5	2	0,25	0,758	0,127	0,657	5,186	
B4	0,33	1	2	1	3,5	2,31	1,182	0,198	1,007	5,097	
B5	0,2	0,25	0,5	0,285714	1	0,01	0,372	0,062	0,315	5,063	
						95,21	5,986	1,000	Average	5,152	λ_{max}
									CI=(λ_{max} -n)/n-1		0,038
									CR=CI/RI		0,034
									RI		1,12

Tässä parivertailussa CR-arvo on suositellun toleranssin sisällä CR<10 %. Lisäksi Eigen1 summa on 1, e2/e1 sarakkeen luvut ovat samaa kertalukua matriisin n-luvun kanssa (5), eli näistä voidaan päätellä, että perusasiat datan käsittelyssä on tehty oikein.

Taulukko IV-4 Hankintahinta

	B1	B2	B3	B4	B5	*	nRoot	Eigen1	Eigen2	e2/e1	
B1	1,000	0,500	4,500	2,500	3,000	16,875	1,760	0,279	1,464	5,246	
B2	2,000	1,000	5,000	3,000	3,200	96,000	2,491	0,395	2,057	5,205	
B3	0,222	0,200	1,000	0,250	0,222	0,002	0,301	0,048	0,254	5,319	
B4	0,400	0,330	4,000	1,000	0,500	0,264	0,766	0,122	0,633	5,206	
B5	0,330	0,313	4,500	2,000	1,000	0,928	0,985	0,156	0,830	5,310	
						114,070	6,304	1,000	Average	5,256951	λ_{max}
									CI=(λ_{max} -n)/n-1		0,064
									CR=CI/RI		0,057
									RI		1,12

Taulukko IV-5 Maine/brandi

	B1	B2	B3	B4	B5	*	nRoot	Eigen1	eigen2	e2/e1	
B1	1,000	0,330	0,330	2,000	3,000	0,653	0,918	0,156	0,853	5,459	
B2	3,000	1,000	0,330	2,000	3,000	5,940	1,428	0,243	1,329	5,467	
B3	3,000	3,000	1,000	3,000	3,000	81,000	2,408	0,410	2,180	5,317	
B4	0,500	0,500	0,330	1,000	0,500	0,041	0,529	0,090	0,475	5,282	
B5	0,330	0,330	0,330	2,000	1,000	0,072	0,591	0,101	0,548	5,446	
						87,707	5,874	1	Average	5,394	λ_{max}
									CI=(λ_{max} -n)/n-1		0,099
									CR=CI/RI		0,088
									RI		1,12

Taulukko IV-6 Ympäristöystävällisyys

	B1	B2	B3	B4	B5	*	nRoot	Eigen1	eigen2	e2/e1	
B1	1,000	2,000	2,500	3,000	0,330	4,950	1,377	0,229	1,179	5,148	
B2	0,500	1,000	1,000	2,000	0,330	0,330	0,801	0,133	0,669	5,021	
B3	0,400	1,000	1,000	2,000	0,286	0,229	0,744	0,124	0,627	5,062	
B4	0,330	0,500	0,500	1,000	0,250	0,021	0,460	0,077	0,390	5,096	
B5	3,000	3,000	3,500	4,000	1,000	126,000	2,631	0,437	2,263	5,174	
						131,529	6,013	1,000	Average	5,100	λ_{max}
									$CI=(\lambda_{max}-n)/(n-1)$		0,025
									CR=CI/RI		0,022
									RI		1,12

Liite V Konehuonetuuletuksen säännöt, standardi ja spesifikaatiot

Taulukossa V-1 koostettu yhteen ylätasoon vaatimuksia, joilla on vaikutuksia konehuoneen suunnittelussa ja toteutuksessa. Kaikki vaatimukset eivät vaikuta vielä konseptointisuunnitteluvaiheessa.

Taulukko V-1 Konehuoneen ilmanvaihdon mitoitusperusteita

	Suorituskykyvaatimukset		
ISO-EN 8861			
	Paloilma (incl. 50% marginaali)		0,00226 m ³ /kW
	Tuuletusilma(847kW:lle)		0,00671 m ³ /kW
	Konehuoneen lämpötila (max. Työskentelylämpötila)		35 c
	Konehuoneen paine (max.)		50 Pa
Valmistaja			
	mootorin suorituskyky		847 kW
	Ilmankulutus: (64kg/min)		0,00111 m ³ /kW
	Polttoaineenkulutus		0,22 kg/kW
	Pakokaasulämpötila		474 c
	Jäähdytyskapasiteetti (@2300 rpm, 5,3l/s)		1369 kW

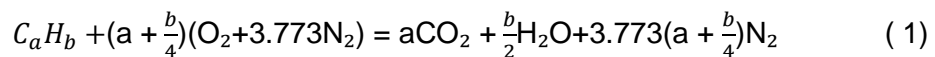
	Perusvaatimukset:		
	Load Line Convention (LLC)		
	•LL 7 Req 17(1) Machinery spaces and openings		
	•LL 10 Req 20(1) Air pipes	For ships assigned timber freeboards the air pipes should be provided with automatic closing appliances.	
	•LL 36 Minimum wall thickness of pipes rev.19, 20 & 22	For venting pipes in position 1 and 2 leading to spaces below the freeboard deck or to spaces within enclosed superstructures: - external diameter of pipes equal to or less than 80 mm: thickness not less than 6,0 mm - external diameter of pipes equal to or more than 165 mm: thickness not less than 8,5 mm intermediate sizes are to be determined by linear interpolation (ii) For venting pipes other than specified under (c): - external diameter of pipes equal to or less than 155 mm: thickness not less than 4,5 mm - external diameter of pipes equal to or more than 230 mm: thickness not less than 6,0 mm intermediate sizes are to be determined by linear interpolation.	
	•LL 49 Air pipe closing devices req. 20	Where required by Regulation 20 air pipe closing devices shall be weathertight the openings of air pipes to which these closures are fitted submerge at angles up to 40° or up to a lesser angle which may be agreed on the basis of stability requirements	
	•LL52 Water tight closing appliances for ventilators req.	Where required by Regulation 19, weathertight closing appliances for all ventilators in positions 1 and 2 are to be of steel or other equivalent materials. Wood plugs and canvas covers are not acceptable in these positions.	
	•LL 58 Machinery space and emergency generator room ventilator coaming heights req. 17(2), 19(3),19(4)	Regulation 17(2) requires that the coamings of machinery space ventilators situated in exposed positions on the freeboard and superstructure decks be as high above the deck as is reasonable and practicable.	
	RULES FOR CLASSIFICATION High speed and light craft: Chapter 5 Patrol Boats		
	•SECTION 1 GENERAL REGULATIONS		
	•2 Documentation	Sea water system S010 – Piping diagram (PD) Exhaust gas systems S010 – Piping diagram (PD) Air, sounding and overflow systems S010 – Piping diagram (PD)	
	•SECTION 2 ARRANGEMENTS		
	•4 Openings and closing appliances		
	•4 .2 Ventilators and Air intakes	4.2.1 Ventilators, air intakes and air pipes shall have openings minimum 2400 mm above water line. For service restriction R1 this height may be reduced to 1800 mm. For service restriction R2 or R3 this may be reduced to 1200 mm. 4.2.2 Openings shall be fitted with arrangement to prevent ingress of sea spray. Openings are normally to be facing aft, but may be accepted facing forward if a protecting grate with drains is arranged	
	•SECTION 4 MACHINERY AND SYSTEMS		
	•2.2 Engine Rating	2.2.1 Documentation shall be provided on requirements for ventilation of the engines related to rating and air temperature.	
	•SECTION 5 FIRE SAFETY		
	•3 Ventilation		
	•3.1. Operation of fans dampers and closing appliances	3.1.5 Each zone shall be designed to operate in the early stage of a fire. All essential components (ventilation fans, any dampers and control system for these) shall be designed to resist the smoke, moist and heat expected in the first 10 minutes of a fire Guidance note: Materials capable of operating at 200 °C can be used for supply ducts, steel or equivalent should be provided for exhaust ducts. Fans and electrical motors with a rating of IP56 or above and cables design according to IEC 332 are considered to meet this requirement, even when located inside the zone or exhaust ducts serving such zones.	
	•International Code of Safety for High-Speed Craft (2000)		
	•10.6 Engine air intake systems	Arrangements shall provide sufficient air to the engine and shall give adequate protection against damage, as distinct from deterioration, due to ingress of foreign matter.	
	•10.7 Ventilation systems	Machinery spaces shall be adequately ventilated so as to ensure that when machinery therein is operating at full power in all weather conditions, including heavy weather, an adequate supply of air is maintained to the spaces for the safety and comfort of personnel and the operation of the machinery. Auxiliary machinery spaces shall be adequately ventilated appropriate for the purpose of those spaces. The ventilation arrangements shall be adequate to ensure that the safe operation of the craft is not put at risk. For guidance some Classification Societies require enough ventilation air to: – limit the temperature rise in a machinery space to 10°C above ambient temperature , and – if the prime movers draw their combustion air from within the compartment , then the total ventilation air should not to be less than that required for combustion plus 50%.	
	10.8 Exhaust systems	Pressure loss calculations should be presented to show that the back pressure does not exceed the engine manufacturer's requirements. 10.8.2 Exhaust systems shall be so arranged as to minimise the intake of exhaust gases into manned spaces, air-conditioning systems, and engine intakes. Exhaust systems shall not discharge into air-cushion intakes. 10.8.3 Pipes through which exhaust gases are discharged through the hull in the vicinity of the waterline shall be fitted with erosion/corrosion-resistant shut-off flaps or other devices on the shell or pipe end and acceptable arrangements made to prevent water flooding the space or entering the engine exhaust manifold.	

Liite VI Konehuoneen stoikiometrisen ilmanmäärän laskenta

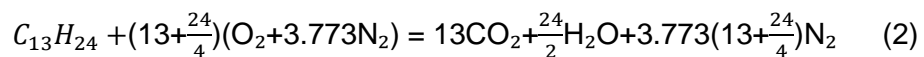
Wartsila Encyclopedia of Ship Technology, 2015 Jan Babicz [23, s. 227] antaa pikaohjeeksi konehuoneen ilmamäärän arvioimiseksi $\text{bhp} \times 6 \text{ m}^3 / \text{h}$, eli $\text{kW} \times 8,13 \text{ m}^3 / \text{h}$. (+ 50 % varailma). Kilowattikohtaisena vertailuarvona käytetään **kW @ 0,00226 m³/s, (a)**

Heywood J. 2018 [38] mukaan Diesel-öljyt koostuvat tyypillisesti useista eri HC-yhdisteistä, mutta yleisesti ottaen laskennassa voidaan käyttää molekyyliä $C_{13}H_{24}$, jonka moolimassa on noin 180 g/mol keskiarvoinen dieselpolttoaineiden tiheys Euroopassa ja USA:ssa on 840 g/dm³ [38]

Reaktioyhtälönä yleisessä muodossa: polttoaine + ilma = reaktiotuotteet [38]:



Reaktioyhtälö saa tällöin muodon:



yksi mooli polttoainetta vaatii $19 \times (1 + 3.773)$ mol. ilmaa, eli 90,687 moolia



Kuiva ilma [38]:

$$\text{Ilma} = 28,96 \text{ g/mol}$$

$$\text{Ilman tiheys: } 1,13 \text{ kg/m}^3 \text{ (EN-ISO8861)}$$

Paloilman moolikohtainen kulutus:

$$1 \text{ mol } C_{13}H_{24} = 90,687 \text{ mol} \times 28,96 \text{ g/mol} = 2626,2 \text{ g} \Rightarrow \frac{2.626 \text{ kg}}{1.13 \text{ kg/m}^3} = 2,32 \text{ m}^3$$

$$\text{stoikiometrinen ilma / polttoainesuhde (A/F) on } \frac{2626,2}{180} = 14,59$$

Kun valmistaja ilmoittaa moottorilleen ominaispolttoaineenkulutukseksi esimerkiksi 220 g/kWh, moottoritehon ollessa 847kW, arvioidaan mallissa tarvittavaa nettomääräistä paloilman tarvetta laskemalla moottorin kokonaispolttoaineenkulutuksen täydellä teholla:

$$847 \text{ kW} \times 220 \text{ g/kWh} = 186,3 \text{ kg/h, eli } 221,8 \text{ l/h} = 0,062 \text{ l/s}$$

$$\text{mooleina: } 186,3 \text{ (kg/h)} / 0,18 \text{ (g/mol)} = 1035 \text{ mol/h}$$

moottorin stoikiometrinen paloilmankulutus (kg) olisi tällöin:

$$1035 \text{ mol} \times 2,626 \text{ kg/mol} = 2718,0 \text{ kg/h (45.3 kg/min) tai } 2405,2 \text{ m}^3/\text{h (0,668 m}^3/\text{s)}$$

kilowattikohtaisena vertailuarvona on tällöin **0,000789 m³/s (b)**

Standardin ISO- EN 8861 *Engine-room ventilation in diesel-engined ships — Design requirements and basis of calculations* [45] mukainen paloilman kulutus on:

$$q_{dp} = \frac{P_{dp} \times m_{ad}}{\rho} \quad (4)$$

kaavassa käytetään seuraavia laskentaparametreja: P_{dp} = max. jatkuva teho (kW), M_{ad} on vakio 4-tahtimoottorille = 0,0020 kg/KWs ja ρ ilma = 1,13 kg/ m³

$$= 847 \text{ kW} \times 0,002 \text{ kg/kWs} / 1,13 \text{ kg/ m}^3 = \mathbf{1,914 \text{ m}^3/\text{s (excl. + 50 \% varailma)}}$$

kilowattikohtaisena vertailuarvona on tällöin **0,00226 m³/s, [c]**

Scania Handbook Marine Engines [46] ilmoittaa kyseisen moottorin ilman kulutukseksi 64 kg / min, joka on 3840 kg/h. Soveltamalla samaa ilman tiheyttä kuin standardi ISO EN 8861 käyttää (1. 13 kg/ m³) saadaan ilman kulutuksen volyymiksi arvon 3398 m³/h. Tämä tilavuusvirta on lähellä stoikiometristä laskentaa, jolloin ero on ainoastaan 211 l/h (5.8 %) ja ero mahtuu käytännössä laskennassa käytetyn ilmantiheysvakioiden vaihtelun sisälle (vaihtelee ilman lämpötilan mukana).

Stoikiometrisen ilmankulutuksen päälle tuleva ilmamäärä on hyödyllinen käytännössä pelkästään jäähdytyksessä. Näin ollen jäähdytyksessä on mahdollisuus soveltaa muitakin ratkaisuja.

Järjestelmämallissa sisään tulevalle moottorin imuilmalle käytetään yleistä arvoa 0,00118 m³/s per kW (b). Näin saadaan tuuletuksen ja jäähdytyksen suunnittelulle enemmän tilaa. Kun suunnittelija tekee lopullisia puhallinlaittevalintoja, hän tietää, että laskennan alkuarvo pitää sisällään +50 % varailma marginaalin stoikiometriseen paloilman lisäksi

Liite VII Moottorin terminen tarkastelu

Lämmönvaihtimelle sisään otettavan meriveden lämpötilaeroksi valitaan ($95-30^{\circ}\text{C} = 65^{\circ}\text{C}$) ja virtaamaksi 5 l/s => 18 m³/h.

Jäähdytysteho on vastaavasti:

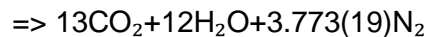
$$Q_2 = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (1)$$

$$4,19 \text{ kJ/C Kg} \times 18 \text{ m}^3 \times 1005 \text{ kg/m}^3 \times \Delta 65^{\circ}\text{C} = 4927 \text{ MJ (-1369 kWh)} \quad (2)$$

Jäähdytysteho riittää yksinään poistamaan kaiken hukkalämmön esimerkin (847kW) moottorista. Valmistajan käsikirja antaa kyseisen moottorityypin lämmön vaihtimelle virtaavan veden määräksi täydellä teholla 5.3 l/s.

Pakokaasut ja lämpöhäviöt:

Tunnin aikana esimerkin moottori kuluttaa maksimiteholla n. 186,3 kg polttoainetta, 1035 moolia. Reaktioyhtälön oikealta puolelta saadaan laskettua vastaavat pakokaasukomponenttien suhteelliset osuudet ja massat:



$$\text{CO}_2: 13 \times 44,0 \times 1035 = 592,0 \text{ kg (20.5 \%)} \quad (1)$$

$$\text{H}_2\text{O}: 12 \times 18,0 \times 1035 = 223,6 \text{ kg (7.7 \%)} \quad (2)$$

$$\text{N}_2: 71,69 \times 28,0 \times 1035 = 2077,6 \text{ kg (71.8 \%)} \quad (3)$$

Pakokaasun massa yhteensä: ~ 2893,2 kg/h (48.2 kg/min)

Diesel polttoaineen lämpöarvo on laskettavissa edellä käytetyn reaktioyhtälön avulla. Valmiit taulukot antavat kuitenkin polttoaineelle valmiit laskenta-arvot [38]. Diesel-polttoaineen ylempi lämpöarvo HHV on 46,1 MJ/kg ja alempi LHV on 43,2 MJ / kg. Käytännön laskennassa käytetään alempaa lämpöarvoa, LHV:tä, koska reaktiotuotteena syntyvä vesi on höyryn muodossa [38]. Reaktioyhtälön tuotteiden, tässä esimerkin tapauksessa $13\text{CO}_2 + 12\text{H}_2\text{O}$ sisäisen energian muutoksen kautta, eli entalpian avulla on laskettavissa polttoaineen lämpöarvo.

Diesel moottorin hyötysuhde [38]:

$$\eta = \frac{W_{out}}{Q_{HV*mf}} \quad (4)$$

jossa η = hyötysuhde, P_{out} = moottorin antoteho, $Q_{HV} = LHV$ ja m_f = polttoaineen massavirta

Esimerkin moottorin hyötysuhteeksi η saadaan:

$$\frac{847 \text{ kW}}{\frac{42,3 \text{ MJ}}{\text{kg}} / 3600 * (\frac{186,3 \text{ kg}}{\text{h}})} = 0,393 \quad (5)$$

Moottorin kuluttama energia tunnissa on:

$$186,3 \text{ kg/h} \times 42,3 \text{ MJ/kg} = 7882 \text{ MJ} \quad (6)$$

Moottorin tekemä työ tunnin aikana on:

$$W = 0,393 \times 7882 \text{ MJ} = 3098 \text{ MJ} (39,3 \%) \quad (7)$$

Moottorin kokonaishäviöt Q_{tot} (Lämpö + pakokaasu + säteily,) ovat tällöin:

$$(1-0,393) \times 7882 \text{ MJ} = 4784 \text{ MJ} (60,7 \%) \quad (8)$$

Häviöteho 1329 kW

Voimansiirron häviöt:

Käytössä ei ole absoluuttisen tarkkaa tietoa propulsiolinjan, eli vaihteiston ja vesisuihkupropulsio (jetin) hyötysuhteista (η). Käytämme laskennassa seuraavia arvoja:

$$\text{Vaihteisto } \eta = 0,97 \Rightarrow \text{häviöteho } 847 \text{ kW} \times 3 \% = 25,4 \text{ kW}$$

$$\text{JET } \eta = 0,98 \Rightarrow \text{häviöteho } 847 \text{ kW} \times 2 \% = 16,9 \text{ kW}$$

Moottorin ja voimansiirron häviöteho yhteensä 1371,3kW (4936,7MJ, 62.6 % kokonaisenergiasta)

- Akseliteho: $(1-0,03-0,02) \times 847 = 807,5 \text{ kW}$

Pakokaasujen reaktioyhtälöstä saatavalla kokonaismassalla ja pakokaasun arviolämpötilan n. 500°C (=täydellä teholla) avulla voimme laskea stoikiometrisen arvon paljonko lämpöenergiaa poistuu pakokaasuhuuhTELUN mukana aluksesta ja mikä osuus jäähtymisestä pitäisi vielä mitoittaa merivesijäähtymykselle ja ilman vaihdolle.

$$Q = c_{tot} \cdot m \cdot T \quad (9)$$

Pakokaasun ominaislämpökapasiteetin laskenta:

CO₂: c = 0,656 kJ/K Kg (20.5 %)

H₂O: c = 4.186 kJ/K Kg (7.7 %)

N₂: c = 0.743 kJ/K Kg (71.8 %)

$$c_{tot} = 0,205 \times 0,656 + 0,077 \times 4.186 + 0,718 \times 0,743 = 0,99 \text{ kJ/C Kg}$$

Pakokaasun lämpöenergia:

$$Q_{Ex} = 2893,2 \text{ kg} \times 0,99 \text{ kJ/}^\circ\text{C Kg} \times (500) ^\circ\text{C} = 1432 \text{ MJ}$$

- 29.9 % häviöistä
- 18.2 % moottoriin tulevasta energiasta

Tällöin arvio lämpö- ja säteilyhäviöistä on:

$$Q_{LH} = Q_{tot} - Q_{Ex} = 3352 \text{ MJ (70.1 \% moottorin häviöistä)}$$

- 42,5 % moottoriin tulevasta energiasta

Liite VIII EN-ISO 8861 mukainen mitoitus konehuoneen ilmanvaihdolle

EN-ISO 8861 Standardi [45] ohjeistaa dieselmoottorialusten konehuoneiden ilmanvaihdon mitoituksen erikseen paloilmalle* (kappale 6.3.1) ja lämpöhäviöille.

Konehuoneen tuuletuksen mitoitus lämpöhäviöille:

$$q_h = (\phi_{dp} + \phi_o + \phi_{el} + \phi_{gen} / \rho \times c \times \Delta T) - 0.4 \times q_{dp} \quad (1)$$

jossa q_h on tuuletusilmamäärä m³/s, ϕ_{dp} on moottorin säteilylämpö (kW), ϕ_o on muut laitteet ja ϕ_{el} on sähkölaitteet ja ϕ_{gen} on apukone, Ilma ρ on 1,13 kg/m³, ominaislämpökapasiteetti c on 1,01kJ/Kg C, q_{dp} on paloilma m³/s ja ΔT on 10 (ulkolämpötila +30°C).

Kaava saa muodon:

$$q_h = \frac{(40+17+10) \text{ kW}}{1.01e3 \times 1,13 \times 10} - 0,4 \times 1,0^* \text{ m}^3/\text{s} \sim 5.5 \text{ m}^3/\text{s} \quad (2)$$

(*stoikiometrinen kulutus @ 847kW incl. 50 % varailma)

Taulukkolaskentapohjainen konehuoneen ilmanvaihdon yleinen järjestelmämalli perustuu samoihin kaavoihin ja esilaskettuihin yleisiin parametreihin.

Liite IX Ulkoinen sidosryhmäkysely

Kysely: Alus C, 2020 Toimituskokonaisuus

Vuoden 2020 viimeisen toimituksen valmistuessa, tämän kyselyn tarkoituksena on kartoittaa projektissa tiiviisti mukana olleiden henkilöiden omaan kokemukseen perustuvaa näkemystä projektin kulusta ja toimituksista. (tilaajat I, aluskatsastajat II käyttäjät III)

Kyselyn tavoitteena on nykytilan arviointi sekä tunnistaa uusia mahdollisia kehityskohteita vuodelle 2021 projekti- ja valmistustoimintojen kehittämiseksi.

Tämä kysely kattaa neljä toimitusta 1H/2020 aikana, sekä kuusi toimitusta 2H/2020 aikana.

Arvioitsijan työkokemus merenkulkualalta (vuotta)

1-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-40

Arvosteluasteikko:

5 = Erinomaista

4 = Hyvä

3 = Kehityskelpoinen

2 = Välttävä

1 = Ei ole häävi

I. Tilaaja

Työmaakokousten järjestelyt

1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5

Mikä olisi paras yksittäinen kehityskohde/-kohteet:

III. Käyttäjät

Alusten katselmointitilaisuuksien aikataulutus ja järjestelyt

1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5

Alusten SAT-vaiheiden suoritus ja aikataulut

1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5

Poikkeavien tilanteiden hallinta, vikakorjaukset SAT:n aikana tms.

1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5

Alustoimintojen kokonaisarviointi käytön näkökulmasta (2019-20 toimitukset)

	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
Runko ja varustelu									
Jet -propulsio									
Moottorit									
Hydrauliikka									
Ohjaamon varustelu									
Miehistötila varustelu									
Navigointijärjestelmä									
Intercom-järjestelmä									
Kokonaisarvio									

Takuu- ja reklamaatioasioiden käsittely vuoden 2020 aikana

1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5

Ylimääräisten koulutus /harjoitus tms. tilaisuuksien toteutus

1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5

Kokonaisarvio projektin kulusta

1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5

Vapaasti valittava arviointikohde: _____

1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5

Mikä olisi paras yksittäinen kehityskohde/-kohteet:

Liite X Sisäinen sidosryhmäkysely

Kysely: Alus C 2020 Toimituskokonaisuus

Tämän kyselyn tarkoituksena on kartoittaa tuotannonjohdon sekä osto- ja hankintatoimintojen omaan kokemukseen perustuvaa näkemystä projektin kulusta ja toimituksista koskien vuoden 2020 toimituksia.

Kyselyn tavoitteena on nykytilan arviointi sekä tunnistaa uusia mahdollisia kehityskohteita vuodelle 2021 projekti- ja valmistustoimintojen kehittämiseksi.

Tämä kysely kattaa neljä toimitusta 1H/2020 aikana, sekä kuusi toimitusta 2H/2020 aikana.

Arvioitsijan työkokemus toimialalta (vuotta)

0-5	5-10	10-15	15-20	20-30

Arvosteluasteikko:

5 = Erinomaista

4 = Hyvä

3 = Kehityskelpoista

2 = Vältävää

1 = Miten meni noin niin kuin omasta mielestä?

Tiedon kulku projektin ja tuotannon välillä

1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5

FAT-HAT-SAT vaiheiden aikataulutuksen onnistuminen

1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5

Aluskohtaisten aikataulujen pitäminen

1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5

Mikä on arviosi käytössä olevan PAT-FAT-HAT-SAT -prosessin hyödyistä projektin aikana

1 = Vähäinen /olematon, siksi tarpeeton

2 = On siitä vähän apua, mutta teetättää liian paljon turhaa työtä

3 = On se ihan hyvä, ei siitä haittaakaan ole

4 = Selvästi auttanut vähentämään systemaattisia valmistusvirheitä

5 = Tämä prosessi olisi hyvä olla käytössä kaikissa projekteissa, vaikka sitä ei erikseen vaadittaisi

1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5

FAT-HAT-SAT vaiheiden tarkastuspöytäkirjojen laatu

Kommentteja:

	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
AI-työt									
Propulsio									
Koneisto									
KaPePa									
LVI									
Ohjaamo									
Sähkö									
SAT									
PAT									

Arvio oman vastualueen suoriutumisesta ja yhteistyöstä oman sidosryhmän kanssa

Kommentteja:

	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
Purkutyöt									
Varastointi									
Osto- ja hankinta									
Runko AI-työt									
Rungon pintakäsittely									
Koneistoasennukset									
Kansivarustelu									
Ohjaamon varustelu									
Sähköasennukset									
Yhteistyö Furuno									
Yhteistyö Savox									
Yhteistyö Promarine									
Yhteistyö Millog									
Yhteistyö Presto									
Yhteistyö Wenda									
Yhteistyö MAS									

Muutosten hallinta projektin edetessä, kokonaisarvio siitä mikä on kykymme hallita meistä riippumattomia muutoksia

1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5

Takuu- ja reklamaatioasioiden käsittely vuoden 2020 aikana, toteuttamisen näkökulmasta

1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5

Työtilojen turvallisuus ja siisteys

1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5

Kokonaisarvio projektin kulusta

1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5

Vapaasti valittava arviointikohde:

1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5

Liite XI Modulaarisuuden terminologiaa

Taulukko XI-1 Modulaarisuuteen liittyvää terminologiaa [34, s. 14]

Termi	Julkaistu määritelmä	Lähde
Modulaarinen arkkitehtuuri	Järjestelmäarkkitehtuuri, johon järjestelmä on pilkottu arkkitehtuurikomponenteilla, ja joilla on hyvä abstraktio sekä sisäinen yhteenkuuluvuus. Kytkeytyminen muihin komponentteihin on vähäistä ulkoisten järjestelmien kanssa. Arkkitehtuuri tiivistää järjestelmän sisäisen toteutuksen näkyvien rajapintojen takana.	Firesmith & Donohoe 2015
Modulaarinen järjestelmä	Modulaarinen järjestelmä on valmistettu itsenäisistä yksiköistä, jotka ovat helposti asennettavissa ja jotka käyttäytyvät tietyllä tavalla koko järjestelmässä	Baldwin and Clark 1997
Modulaarisuus	Modulaarisuus on tapa hallita monimutkaisuutta. Pilkotaan monimutkainen järjestelmä erillisiksi paloiksi, jotka voivat sitten olla vuorovaikutuksessa keskenään vain standardoitujen rajapintojen kautta standardoidussa arkkitehtuurissa.	Lanlois 2002
Moduuli	Monimutkainen ryhmä, joka tuottaa toiminnon tuotteelle ja mikä voidaan vaihtaa ja korvata helposti ja valmistaa riippumattomasti.	Wilhelm 1997
Tuotearkkitehtuuri	Järjestelmä, jolle tuotteen kyseinen tehtävä on allokoitu, sen fyysiset komponentit, toiminnallisten elementtien järjestely, toiminnallisten elementtien kartointus fyysisiin komponentteihin ja vuorovaikutteisten fyysisten rajapintojen määrittely komponentteihin	Sako & Murray 1999