



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

RASKAAN MAASTOAJONEUVON ETÄOH- JAUSJÄRJESTELMÄN PROJEKTIHALLINTA JA VAATIMUSMÄÄRITTELY

Harri Paju

Opinnäytetyö
Marraskuu 2017
Konetekniikka
Älykkäät koneet



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikka
Älykkäät koneet

PAJU, HARRI:

Raskaan maastoajoneuvon etäohjausjärjestelmän projektihallinta ja vaatimusmäärittely
Opinnäytetyö 35 sivua, joista liitteitä 1 sivua
Marraskuu 2017

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on ollut kirjoittaa yleispätevä kuvaus etäohjausjärjestelmän projektinhallinnasta ja vaatimusmäärittelystä raskaaseen maastoajoneuvoon. Työ tehtiin kohdeyrityksen tuotekehityshanketta varten. Se ei kuitenkaan sisällä kohdeyrityksen ajoneuvojen etäohjausjärjestelmässä käytettyjä ratkaisuja tai muita ajoneuvoihin liittyviä luottamuksellisia tietoja. Tämä johtuu siitä, että kaikki ajoneuvoihin liittyvät tai projektissa käytetyt ratkaisut eivät ole julkista materiaalia.

Työn fokuksena oli selvittää raskaiden maastoajoneuvojen ohjausjärjestelmien rakennetta, yleiseen projektinhallintaan liittyviä perustietoja sekä mekatronisten järjestelmien suunnittelussa käytettäviä työkaluja ja menetelmiä. Soveltavassa osiossa huomio kiinnitettiin Systems Engineering -malliseen lähestymistapaan sekä suunnitteluprosessin aikana ilmenneisiin epäkohtiin. Työstä muodostui tiivistetty ja yleispätevä ohjeistus raskaan maastoajoneuvon etäohjausjärjestelmän projektinhallinnasta ja vaatimusmäärittelystä.

Opinnäytetyön ratkaisujen havainnollistamista voitaisiin parantaa siten, että työn kohteeksi vaihdettaisiin sellainen ajoneuvo, jonka tekniset ratkaisut eivät ole salassa pidettävää materiaalia. Lukijalle voitaisiin täten hahmottaa paremmin järjestelmän kokonaiskuva, jolloin saataisiin havainnollistavampi, kuvaavampi ja yleisesti mielekkäämpi kokonaisuus. Opinnäytetyössä esitetyt ratkaisut ja ohjeistavat materiaalit voisivat täten sisältää myös tarkempia kuvauksia järjestelmästä, jotka olisivat kolmannen osapuolen hyödynnettävissä sellaisenaan.

Asiasanat: etäohjaus, projekti, raskas maastoajoneuvo, vaatimusmäärittely

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Intelligent Machines

PAJU, HARRI

Project management and requirement specification of Remote Control System for a Heavy Duty Off-Road Vehicle

Bachelor's thesis 35 pages, appendices 1 pages

November 2017

This bachelor's thesis is a generic-level study about project management and requirement specification for remote control system to a heavy duty off-road vehicle. This thesis does not provide the solutions or any other confidential information concerning the vehicle or the manufacturer because all the vehicle-related and the project-based solutions are not publicly available material. This study covers the basics of project management, tools and fundamentals of designing mechatronic systems. The problems and solutions related to the different design approaches are also discussed along with examples. Lastly the applied chapter discusses about the examples, solutions and problems with the different approaches towards the design.

This thesis was used as guidance material in a development project done at the vehicle manufacturer's project management department. It can also be used in other similar projects regardless of whether they are public or not.

The solutions could be extended furthermore to a vehicle whose technical solutions are not confidential or secret information. Thus, the reader could get a better overall picture of the system. The solutions and materials used in this study could thus include more detailed descriptions and provide a better understanding of the complete system.

Key words: remote control, project, heavy duty off-road vehicle, requirement specification

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	RASKAIDEN AJONEUVOJEN OHJAUSJÄRJESTELMÄT	6
2.1	Raskas maastoajoneuvo	6
2.2	Ohjausjärjestelmät yleisesti	7
2.3	Etäohjattavat järjestelmät.....	8
2.4	Autonomiset ja puoliautonomiset järjestelmät	10
3	KOMPLEKSISTEN JÄRJESTELMIEN SUUNNITTELEMINEN	11
3.1	Projektityön perusteet	11
3.2	Systems engineering prosessi	14
3.2.1	Suunnitteluprosessin päävaiheet	15
3.2.2	Työkalut	17
3.3	Mekatronisten järjestelmien suunnitteleminen	18
3.3.1	V-malli	18
3.3.2	Matemaattinen mallintaminen.....	19
3.3.3	Tietokoneavusteinen mallintaminen	21
3.3.4	Mallipohjainen systeemisuunnittelu.....	21
4	KOHDEYRITYKSEN TUOTEKEHITYSPROJEKTI.....	26
4.1	Tausta ja tavoitteet	26
4.2	Projektin perustaminen	26
4.3	Vaatusmäärittely	27
4.4	Työkalut	28
4.5	Konseptointi.....	28
4.6	Alustava suunnittelu	29
4.7	Tarkentava suunnittelu.....	30
4.8	Komponenttien määrittely	30
4.9	Verifiointi.....	31
5	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	32
	LÄHTEET.....	33
	LIITTEET	35

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on luoda yleismaailmallinen ohjeistus raskaan maastoajoneuvon etäohjausjärjestelmän projektinhallinnasta ja vaatimusmäärittelystä. Projektin suunnitteluprosessi perustui Systems Engineering-tekniikkaan, jonka elementtejä sekä työkaluja esitellään teoriaosiossa. Työn lopputarkoituksena on käyttää sitä kohdeyrityksen tuotehallinnan projektia tukevana materiaalina.

Opinnäytetyö perustuu kohdeyrityksessä suoritettavaan tuotehallinnan tuotekehitysprojektiin, mutta yrityksen toiveesta ja ajoneuvon salassa pidettävästä materiaalista johtuen, työssä käytettävä sisältö koostuu julkisesti saatavilla olevista teoksista ja materiaaleista. Ohjeistus käsittelee pääsääntöisesti tuotekehitysprojektiin liittyvää projektinhallintaa sekä vaatimusmäärittelyä. Raskas maastoajoneuvo on käsitteenä yleismaailmallinen ja monitulkinnallinen, joten opinnäytetyössä ei tarjota ratkaisuja tai sovelluksia, jotka pätevät tai sopivat kaikkiin raskaisiin maastoajoneuvoihin. Työssä lähestytään aihetta ohjausjärjestelmien, yleisen projektinhallinnan sekä mekatronisten järjestelmien suunnittelun teoreettisella yleiskatsauksella. Teoreettisten lähtökohtien jälkeen siirrytään tarkastelemaan kohdeyrityksen toteuttamaa projektinhallintaa sekä vaatimusmäärittelyä, tutustumalla tuotekehitysprojektin suunnitteluprosessiin.

Opinnäytetyön rakenne on seuraava: kansilehti, tiivistelmä, abstrakti, sisällysluettelo, johdanto, teoria, kompleksisten järjestelmien suunnittelu, kohdeyrityksen tuotekehitysprojekti, johtopäätökset ja pohdinta sekä lähteet. Työssä käytetään kuvia, kaavioita, taulukoita ja esimerkkejä, joiden tarkoituksena on yksinkertaistaa monimutkaisten järjestelmien rakennetta. Opinnäytetyössä pyritään tiivistämään laajamittaisen projektin sisältö yksinkertaisemmaksi ohjeistavaksi kokonaisuudeksi. Samalla pyritään luomaan pääpiirteittäinen kuvaus etäohjausjärjestelmän suunnittelusta, hyödyntämällä mekatronisten- ja kompleksisten järjestelmien suunnittelukirjallisuutta.

2 RASKAIDEN AJONEUVOJEN OHJAUSJÄRJESTELMÄT

2.1 Raskas maastoajoneuvo

Kohdeyrityksen ajoneuvoissa käytetyt tekniikat ja toteutukset ovat salattua materiaalia. Tästä syystä opinnäytetyötä muokattiin sellaiseksi, että kaikki lähdemateriaalit ovat julkisesti saatavilla. Työssä käytetyt lähteet on valittu siten, että ne pyrkivät kuvaamaan mahdollisimman hyvin kohdeyrityksen moderneja ajoneuvoja, sekä suunnittelutyökaluja.

Kohdeyrityksen ajoneuvot ovat oman tuoteryhmänsä kiistattomia markkinajohtajia ja ne sisältävät alan viimeisintä teknologiaa. Ajoneuvot ovat modulaarisia, eli niistä voidaan modifioida verrattain helposti erilaisia versioita, asiakkaan toiveiden mukaisesti. Opinnäytetyössä ei oteta kantaa raskaita maastoajoneuvoja koskeviin lakeihin, asetuksiin, standardeihin tai muihin tieliikennekelpoisuuteen vaikuttaviin säännöksiin.

Raskasta maastoajoneuvoa ei ole määritelty suomen tieliikenne- tai ajokorttilaissa, eikä sille ole olemassa omaa ajoneuvoluokkaa, johon se yksiselitteisesti kuuluisi. Määritelmän tarkoituksena on rajata opinnäytetyössä käsiteltävän raskaan maastoajoneuvon ajoneuvo-tekniikkaa ja käyttöympäristöä. Raskas maastoajoneuvo käsittää tässä opinnäytetyössä sellaiset maastoajoneuvot, jotka pohjautuvat kokonaismassaltaan yli 12 tonnia painaviin kuorma-autoihin. Opinnäytetyössä keskitytään nykyaikaiseen, väyläpohjaiseen ajoneuvon ohjausjärjestelmään.



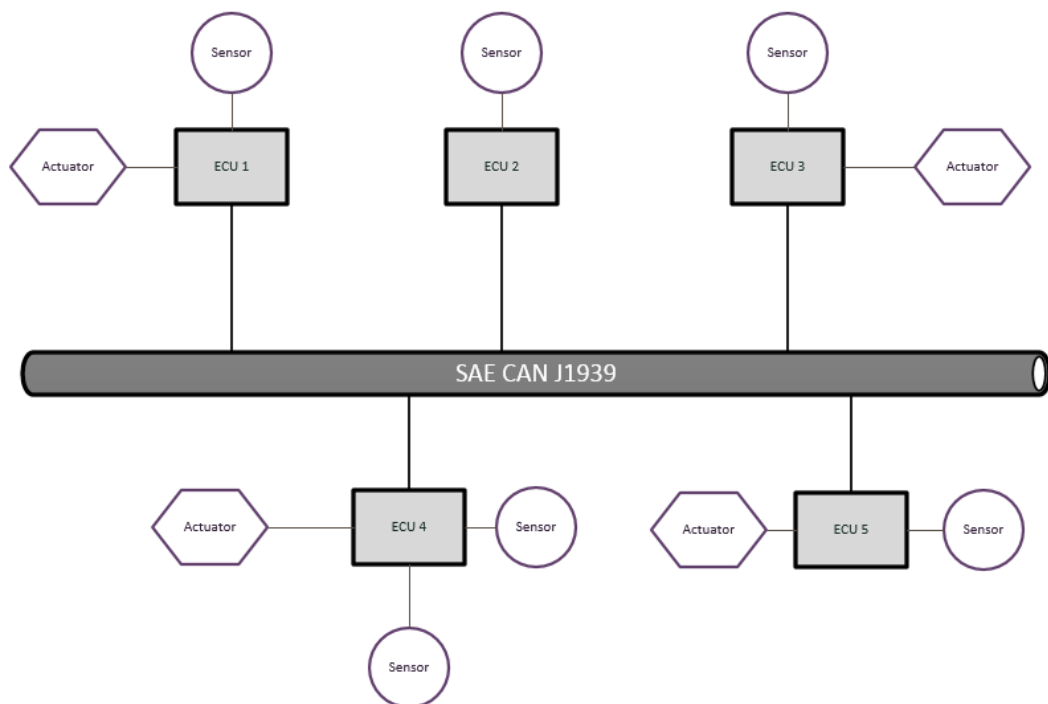
KUVA 1. Raskas maastoajoneuvo AMV XP (Materiaalipankki 2017)

2.2 Ohjausjärjestelmät yleisesti

Miltei kaikkia, modernin raskaan ajoneuvon, alikomponentteja valvotaan ja ohjataan sekä elektronisesti, että sähköisesti. Täten ajoneuvojen suorituskykyä, käyttöikä ja turvallisuutta pystytään parantamaan merkittävästi. (Bennett & Sean 2011, 120, 332.) Tässä kapaleessa pyritään yksinkertaistamaan väyläpohjaisen ohjausjärjestelmän toimintaa ja rakennetta.

Ajoneuvon elektroninen ohjausjärjestelmä rakentuu useasta elektronisesta säätöyksiköstä (Electronic Control Unit). Ne kontrolloivat ohjausjärjestelmän alijärjestelmiä mikrokontrollereiden muistiin asennettujen ohjelmistojen avulla. Ohjelmisto lukee ajoneuvoväylään liitetyiltä antureilta, mittalaitteilta ja muilta säätöyksiköiltä tulevaa dataa viesti-protokollan mukaisesti. Elektroniset säätöyksiköt ovat hajautettu ympäri ajoneuvoa ja niiden avulla hallitaan esimerkiksi: polttoaineensyöttöä, voimalinjaa, kojelaudan näyttöä, alustaa, renkaiden lukkiutumisenestojärjestelmää ja luistonestoa. (Bennett & Sean 2011, 333, 995.)

Electronic control system



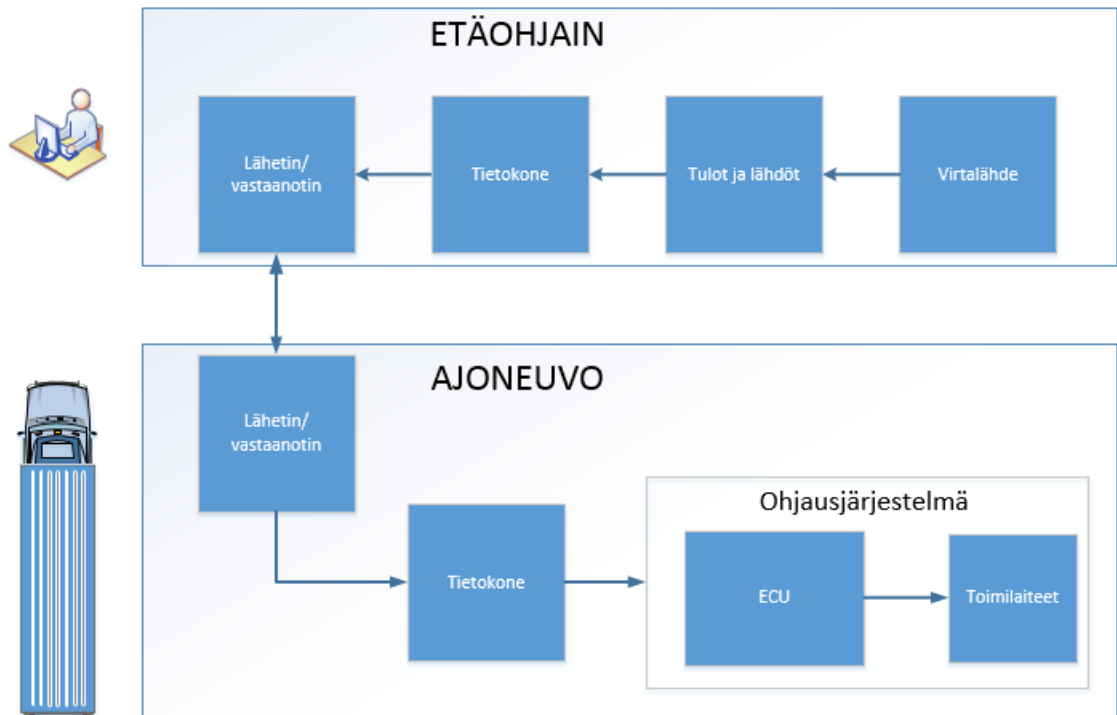
KUVIO 1. Esimerkki ohjausjärjestelmän arkkitehtuurista (Harri Paju 2017)

Ajoneuvon elektroniset säätöyksiköt kommunikoivat yhteisen CAN-väylän (Controlled Area Network) avulla. Ajoneuvoissa käytetään kahta CAN 2.0-väylän versiota, normaalimuotoista 11:n bitin ja laajennettua 29:n bitin tunnistetta. Normaalimuotoisessa väyläviestissä siirtodatakehys on 130:tä bittiä ja laajennetussa 150:tä bittiä pitkä. Väyläliikenne toimii multimaster -periaatteella, eli kaikki säätöyksiköt pystyvät sekä lukemaan, että lähettämään väyläviestejä muille väylälle kytketyille laitteille. Säätöyksiköt kommunikoivat protokollan mukaisesti. Vain ne viestit, jotka kuuluvat niiden vastuualueeseen luetaan ja loput viestit välitetään eteenpäin muille CAN-väylään liitetyille laitteille. Tämä mahdollistaa järjestelmien rinnakkaisen toiminnan sekä lisää ajoneuvon viestiliikenteen toimintavarmuutta verrattuna esimerkiksi tähti- tai ympyrätopologiaan. (Bosch 2002, 989-990; Bennett & Norman 2011, 333.)

ABS-järjestelmä on hyvä esimerkki elektronisen säätöyksikön toiminnasta. Ajoneuvon jarrujen lukkiutumisenestojärjestelmä toimii siten, että elektroninen ohjainyksikkö laskee ja vertailee renkaiden pyörimisnopeutta. Renkaiden lukkiutuessa, ohjainyksikkö lähettää ohjaussignaalin jarrupainetta säätävän venttiilin solenoidille. Solenoidin aktivoiminen avaa venttiilin, joka laskee jarrupainetta, jolloin lukkiutuneet renkaat alkavat taas pyöriä. Ohjainyksikkö mittaa jokaisen renkaan pyörimisnopeutta yksilöllisesti, useita kertoja sekunnissa. Lukkiutumisenestojärjestelmän ansiosta ajoneuvon hallitseminen on helpompaa äkillisissä jarrutustilanteissa. (Bennett & Norman 2011, 335, 986–987.)

2.3 Etäohjattavat järjestelmät

Etäohjattava järjestelmä on sellainen järjestelmä, jonka toimintoja voidaan hallita tai ohjata etäisyyden päästä. Etäohjain on laite, jolla ohjataan etäohjausjärjestelmän toimintoja. (Dictionary 2017b.) Etäohjauksen avulla voidaan etäisyys kasvattaa sellaiseksi, että ope-roi- jalla ei ole suoraa näköyhteyttä ajoneuvoon. Tästä syystä etäohjausjärjestelmää varten tarvitaan mittalaitteistoa, jonka avulla saadaan tietoa ympäristöstä ja ajoneuvon liikkeistä. Kontrollointia varten tarvitaan yhteys sekä ohjausraja- pinta. (Murphy 2000, National Research Council (U.S) 2002, 20 mukaan.) Etäohjattavat järjestelmät vaativat ohjauspyyntö- jän välittävän käyttäjän toimiakseen.



KUVIO 2. Etäohjausjärjestelmän arkkitehtuurikuvaus (Harri Paju 2017)

Ajoneuvojen ja niihin verrattavissa olevien laitteiden etäohjausjärjestelmiä käytetään nykyisellään vain tieliikenteen ulkopuolisissa sovelluksissa, kuten maa- ja metsätalouskooneissa sekä kaivosteollisuudessa. Järjestelmät yleistyvät ja niitä koskeva lainsäädäntö tulee varmistumaan lähivuosina (TEKES 2016). Etäohjausjärjestelmä tarjoaa mahdollisuuden siirtyä haitallisesta ympäristöstä turvalliseen käyttöympäristöön (liite 1; CAT 2017). Ympäristönvaihdos tarjoaa myös mahdollisuuden rekrytoida sellaisia etäohjattavien laitteiden operoijia, jotka eivät aikaisemmin olleet kiinnostuneet alasta haitallisen käyttöympäristön johdosta.

National Research Council (U.S) (2002, 94) mukaan miehittämättömien sotilasajoneuvojen, operaatiokykyisten etäohjausjärjestelmien toteuttamiseen vaaditaan enemmän, kuin pelkästään teknologian kehittymistä. Etäohjausteknologian integroimiseen vaaditaan System Engineering -tyyppistä lähestymistapaa sekä järjestelmän elinkaaren tukitoimintojen, ohjelmistotekniikan, ohjelmointitekniikan, mallintamisen sekä simuloimisen hallintaa (National Research Council (U.S) 2002, 94). Tätä ajatusmallia voidaan hyödyntää myös siviilikäyttöisten etäohjausjärjestelmien suunnittelu- ja toteutustyössä.

2.4 Autonomiset ja puoliautonomiset järjestelmät

Autonomista ajoneuvoa ohjataan tietokonejärjestelmän avulla ilman, että tarvitaan ihmistä kontrolloimaan ohjaustoimintoja (Dictionary 2017a). Ajoneuvon itsenäinen toiminta vaatii keinotekoisia älykkyyttä, jotta toimintakyky säilyy myös sellaisissa tilanteissa, joita ohjelmistossa ei ole määritelty. Puoliautonomiset järjestelmät sisältävät autonomisia ominaisuuksia, mutta eivät vapauta ihmistä täysin järjestelmän valvomisesta tai ohjaamisesta. Etäohjattavien- ja autonomisten toimintojen integraatio mahdollistaa sellaisen puoliautonomisen järjestelmän, jossa kuljettaja voidaan vapauttaa yksinkertaisten ohjaustoimintojen taakasta. (National Research Council 2002, 111.)

SAE (Society of Automotive Engineers) on jakanut autonomiset ominaisuuden kahteen luokkaan (taulukko 1). Ensimmäisellä luokalla, asteikolla 0-2 ihminen vaaditaan ajamaan tai ohjaamaan ajoneuvoa. Toiseen ryhmään kuuluvat portaat välillä 3-5, jolloin ajoneuvo on osittain- tai kokonaan autonominen. (SAE 2017.) Kohdeyrityksen ajoneuvot sisältävät ohjaustoimintoja avustavia järjestelmiä sijoittuen taulukossa 1 autonomian tasolle 1.

Taulukko 1. Autonomian tasot (SAE 2017)

SAE level	Name	Narrative Definition	Execution of Steering and Acceleration/Deceleration	Monitoring of Driving Environment	Fallback Performance of Dynamic Driving Task	System Capability (Driving Modes)
Human driver monitors the driving environment						
0	No Automation	the full-time performance by the <i>human driver</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even when enhanced by warning or intervention systems	Human driver	Human driver	Human driver	n/a
1	Driver Assistance	the <i>driving mode</i> -specific execution by a driver assistance system of either steering or acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	Human driver and system	Human driver	Human driver	Some driving modes
2	Partial Automation	the <i>driving mode</i> -specific execution by one or more driver assistance systems of both steering and acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	System	Human driver	Human driver	Some driving modes
Automated driving system ("system") monitors the driving environment						
3	Conditional Automation	the <i>driving mode</i> -specific performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> with the expectation that the <i>human driver</i> will respond appropriately to a <i>request to intervene</i>	System	System	Human driver	Some driving modes
4	High Automation	the <i>driving mode</i> -specific performance by an automated driving system of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even if a <i>human driver</i> does not respond appropriately to a <i>request to intervene</i>	System	System	System	Some driving modes
5	Full Automation	the full-time performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> under all roadway and environmental conditions that can be managed by a <i>human driver</i>	System	System	System	All driving modes

Copyright © 2014 SAE International. The summary table may be freely copied and distributed provided SAE International and J3016 are acknowledged as the source and must be reproduced AS-IS.

3 KOMPLEKSISTEN JÄRJESTELMIEN SUUNNITTELEMINEN

3.1 Projektityön perusteet

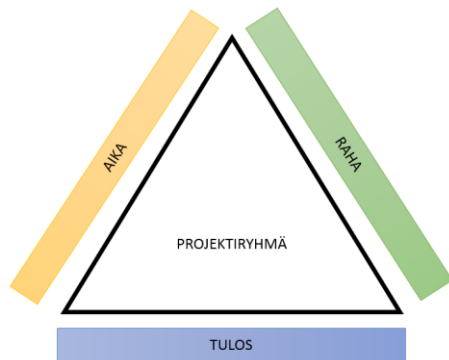
Onnistuneen projektin edellytyksenä on keskeisten vaatimusten ja tavoitteiden täyttyminen sekä sisällöllisesti, että laadullisesti ylittämättä projektille annettuja resursseja. Tällaisissa uniikeissa projekteissa on vaikea ennustaa tarkkoja tuloksia ja kustannuksia, varsinkin kun työ vaatii runsaasti uusien ratkaisujen kehittämistä ja järjestelmien integroimista. Seurantajärjestelmän avulla hallitaan projektin resursseja sekä vastuita koko prosessin elinkaaren ajan. (Pelin, 2011, 29, 293–294.)

Etäohjausjärjestelmän toteuttamisesta tehdään projektisuunnitelma, jossa kuvataan projektin vaiheiden sisältö ja eteneminen, varatut resurssit, vastualueet ja muut projektin kannalta oleelliset asiat. Projektisuunnitelman laatii projektipäällikkö tai hänen nimeämänsä henkilö. Yleisesti suunnitelman laatimiseen varataan n. 1-4 viikkoon aikaa, jotta itse projekti saadaan aloitettua. (Pelin 2011, 83.) Esimerkkinä etäohjausjärjestelmän projektisuunnitelman otsikkotason sisällysluettelosta voidaan pitää kuvaa kaksi.

1	Määritelmät, termit ja lyhenteet
2	Johdanto
3	Järjestelmän kuvaus
4	Projektin organisaatio ja vastuut
4.1	Organisaation rakenne ja sidosryhmät
4.2	Projektin vastuut
5	Projektin ohjaus
5.1	Projektin tavoitteet ja priorisointi
5.2	Projektin seuranta
5.3	Projektin päättämisen- ja keskeytyskriteerit
5.4	Järjestelmän kriittisyysluokka
6	Dokumentointi
6.1	Standardit
7	Aikataulu ja budjetti
7.1	Määrittelyvaihe
7.2	Toteuttaminen
7.3	Riippuvuudet ja rajaukset
7.4	Budjetti
8	Riskienhallinta
9	Muut projektikohtaiset asiat
9.1	Koulutustarpeet
10	avoimet kohdat
11	Viitteet

KUVA 2. Projektisuunnitelman esimerkipohja (Harri Paju 2017)

Voidaan ajatella, että projekti on onnistunut, kun kaikki sille asetetut tavoitteet ovat täytetty. Projektisuunnitelmassa luodaan selkeät tulostavoitteet, jotka asettavat selkeät rajaukset resursseille. Tavoitteet voidaan katsoa koostuvan kolmesta päätavoitteesta, rahasta, ajasta ja laadusta, joiden välinen suhde määrittelee projektin lopputuloksen. (Pelin 2011, 86.)



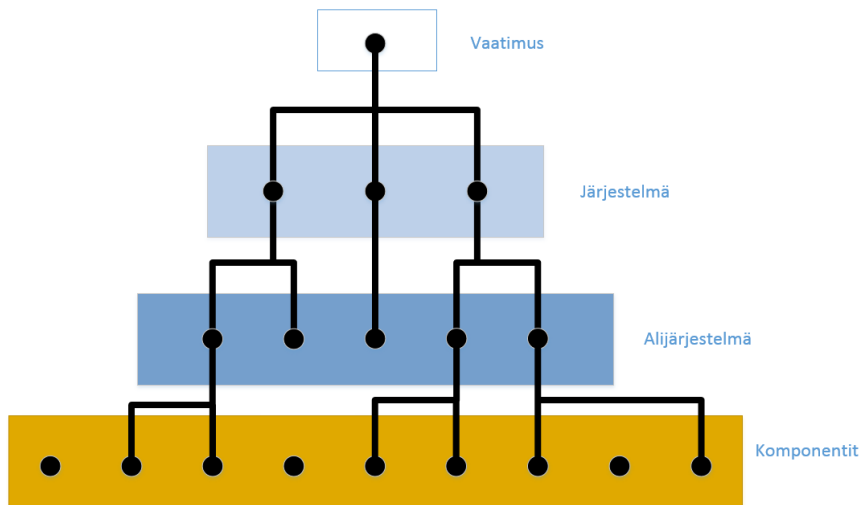
KUVIO 3. Projektin tulostakolmio (Pelin 2011, 35, muokattu)

Etäohjausjärjestelmän vaatimuksien määrittelyssä listataan projektin omistajien (asiakkaat, toteuttava organisaatio, sijoittajat jne.) järjestelmätoiveet ja -vaatimukset vaatimushallintaa varten. Ylemmän tason vaatimukset jakaantuvat alemman tason vaatimukseen eli tarkentuvat alaspäin mentäessä otsikkotasolla. Jos alemman tason vaatimukset täyttyvät, niin tällöin oletetaan, että ylemmän tason vaatimus täyttyy. Vaatimusmäärittelyn otsikkotasoinen sisällysluettelo voidaan rakentaa esimerkiksi kuvan 3 mukaisesti.

- 1 Määritelmät, termit ja lyhenteet
- 2 Johdanto
- ▲ 3 Järjestelmän kuvaus
 - 3.1 Järjestelmän toiminnallisuudet
 - 3.2 Ajoneuvon sisäiset rajapinnat
 - 3.3 Ulkoiset rajapinnat
 - ▷ 3.4 Käyttäjät
 - 3.5 Oletukset ja riippuvuudet
- ▲ 4 Vaatimukset
 - ▷ 4.1 Toiminnalliset vaatimukset
 - ▷ 4.2 Ei toiminnalliset vaatimukset
 - 4.3 Safety vaatimukset
 - ▷ 4.4 Vikatilanteet
 - ▷ 4.5 Reunaehdot ja rajoitteet
 - ▷ 4.6 Laitteistovaatimukset
- 5 Viitteet

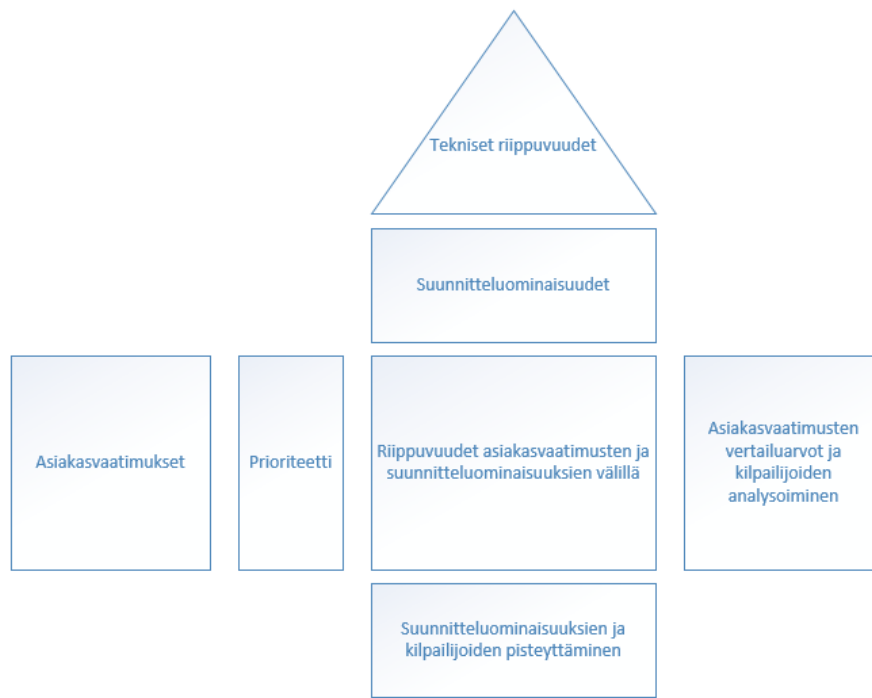
KUVA 3. Vaatimusmäärittelyn sisällysluettelo (Harri Paju 2017)

Vaatimuksien määrittelyssä käytetään apuna erilaisia vaatimushallintatyökaluja, joiden avulla varmistetaan vaatimusten oikeellisesta täyttymisestä. Työkalujen avulla voidaan esimerkiksi linkittää vaatimuksia komponentteihin. (Project Management Institute 2016, 7.3.3.) Tästä on hyötyä etenkin silloin, jos komponenttitasolle tulee muutoksia ja halutaan varmistaa, että korvaava komponentti täyttää kaikki ylemmän tason vaatimukset. Vastavuoroisesti, jos vaatimukset muuttuvat, esimerkiksi käyttöympäristö muuttuu vaativammaksi, täytyy tarkastella vaatimuksen vaikutus kaikkiin järjestelmän komponentteihin sekä alemman tason vaatimuksiin (kuvio 4).



KUVIO 4. Vaatimusten sidonnaisuus järjestelmän muihin osiin (Harri Paju 2017)

Vaatimushallinnassa voidaan käyttää apuna esimerkiksi laatutalometriisiä (kuvio 5). Laatutalometriisi on tehokas vaatimushallinnassa käytetty työkalu. Laatutalometriisillä voidaan tutkia esimerkiksi asiakasvaatimusten ja toteuttamisvaihtoehtojen välisiä riippuvuuksia. Asiakasvaatimukset voivat olla lähtöjään hyvin pääpiirteittäisiä, joten ne tulee muuntaa yksinkertaisimmiksi, mitattaviksi ja toteuttamiskelpoisiksi vaatimuksiksi. Esimerkiksi, jos kahvinkeittimelle asetetaan vaatimukseksi ”keittää hyvää kahvia”, täytyy se purkaa sellaisiksi vaatimuksiksi, joiden lopputuloksena on kupillinen hyvää kahvia. Tällaisia vaatimuksia voi olla, lämmin, pitää hereillä, hyvä aromi, matala hinta, tuoksu hyvältä. Vaatimusten purkamisessa on tärkeää, että ne täyttävät alkuperäisen vaatimuksen laatijan asettamat ehdot eivätkä lisää tai muokkaa niitä. Vaatimusten ja toteuttamisvaihtoehtojen listaaminen laatutalometriisiin helpottaa suhteiden ja riippuvuuksien hahmottamista sekä hallintaa. Laatutalometriisi kertoo myös vuorovaikutusten ja sidonnaisuuksien väliset vahvuudet. (Franceschini 2001, 28–29).



KUVIO 5. Laatutalomatriisi (Franceschini 2001, 28–29, muokattu)

3.2 Systems engineering prosessi

Systems engineering on moniammatillinen menetelmä ja lähestymistapa toimivien systeemien aikaansaamiseksi. Systems engineering keskittyy asiakasvaatimusten huomioimiseen suunnittelun elinkaaren alkuvaiheessa, dokumentoimalla vaatimuksia, etenemällä systemaattisesti ja iteroivasti V-mallin mukaisesti (kuvio 6). Ajatus perustuu kokonaisvaltaiseen järjestelmäsuunnitteluun, jossa pyritään huomioimaan, toiminta, suorituskyky, verifiointi, valmistaminen, kustannus ja aikataulus, koulutus, tukitoiminnot sekä hävittäminen. (Daihai 2015, 10). Kompleksinen järjestelmä, kuten etäohjausjärjestelmä, on monen osajärjestelmän kokonaisuus. Daihai (2015, 3–4) määrittelee kirjassaan systeemin joukoksi komponentteja, joiden välillä vallitsee vuorovaikutus sekä riippuvuus yhteisen toiminnallisuuden aikaansaamiseksi. Hänen mukaansa, systeemi voidaan myös kategorisoida useammaksi alasyteemiksi sekä se voi olla yksi suuremman systeemin komponenteista.

3.2.1 Suunnitteluprosessin päävaiheet

Suunnitteluprosessi käynnistyy jo projektin määrittelyvaiheessa. Projektille asetetaan yleiset tavoitteet ja vaatimukset, esimerkiksi niin kuin luvussa 3.1. Vaatimusten määrittelyyn osallistuu projektin sidosryhmät, kuten asiakkaat, omistajat, käyttäjät sekä suunnittelijat. Asiakkaat ja omistajat laativat yleensä korkeamman tason vaatimuksia, jotka täytyy jaotella alemman tason vaatimuksiksi. Korkeamman tason vaatimukset eivät lähtökohtaisesti ole hyödynnettävissä sellaisenaan, koska ne ovat liian epätarkkoja. (Daihai, 2015, 43.) Vaatimukset siis kehittyvät suunnitteluprosessin aikana ja niiden täyttymistä tarkastellaan V-mallin mukaisesti läpi projektin.

Konsepti on vain kuvaus toteuttamistavasta, jota tarkennetaan järjestelmä- ja komponenttitasoisessa kuvauksessa. Tekniset toteuttamistavat ja tekniset ratkaisut on syytä erottaa tässä vaiheessa projektia, koska konseptoinnissa ei ole tarkoitus sitoutua liikaa tiettyyn toteuttamistapaan tai rakentaa ratkaisua jonkun tarkoin määritellyn komponentin ympärille. Konseptoinnin pyrkimyksenä ei ole siis löytää sovellukselle valmista ratkaisua vaan luoda pohja myöhempää kehitystyötä ja tarkentavaa suunnittelua varten. Konseptien avulla saadaan luotua ensimmäinen kokonaiskäsitelmä suunnitteilla olevasta järjestelmästä/järjestelmän osasta ja sen toiminnasta, jonka perusteella voidaan tehdä karkeita arvioita lopputuloksesta. (Defense System Management, 1999, 4–5.) Konsepti voi olla sanallinen kuvaus/ehdotus järjestelmän toiminnallisuuden toteuttamisesta, esimerkiksi:

- Jarrujärjestelmän hallinta toteutetaan ajoneuvon paineilmajärjestelmää hyödyntäen. Pneumaattista sylinteriä ohjaamalla vaikutetaan ajoneuvon jarrupolkimen asentoon. Asentotietoa voidaan tarkkailla sylinterin pituutta mittaavalta anturilta ja säätää sylinterin pituutta mahdollisella suljetulla säätöpiirillä.

Konseptointivaiheen aikana suunnitellaan erilaisia vaihtoehtoja vaatimusten täyttämiseksi. Toteuttamisvaihtoehtoja pohtiessa voidaan käyttää apuna kilpailevien tuotteiden ratkaisuja, käännteistä insinööriä sekä uusia suunnitteluratkaisuja. Prosessia ohjaa vaatimukset ja resurssit, jotka luovat rajat suunnittelutyölle ja erilaisille ratkaisuille. Konseptointivaiheen tarkoituksena on tuottaa ideoita ja havaintoja, joita voidaan hyödyntää seuraavassa suunnitteluvaiheessa, alustavassa suunnittelussa (Franceschini 2001, 28–29.)

Konseptien välisessä päätöksenteossa voidaan hyödyntää PUGH-matriisia (taulukko 2). PUGH-matriisilla tarkastellaan konseptivaihtoehtojen välisiä ominaisuuksia painotetun summan avulla. Jokaiselle konseptille määritellään ominaisuuksia ja näille ominaisuuksille oma painokerroin. Jokaisen konseptin ominaisuus pisteytetään (esimerkiksi asteikolla 0-5), jonka jälkeen päätösmatriisista saadaan selville jokaisen konseptin painotettu summa sekä suhteellinen arvo, verrattuna muihin konsepteihin. Päätösmatriisi helpottaa päätöksentekoa ja toimii hyvänä dokumentaationa, esimerkiksi jos päätöksentekohistoriaa halutaan tarkastella (miksi päädyttiin tiettyyn ratkaisuun). Valitut konseptit siirtyvät alustavaan suunnitteluvaiheeseen. (AKP-2016 Älykkäät Koneen Projektityöt (14i228) 2017.)

TAULUKKO 2. Esimerkki PUGH-matriisista (AKP-2016 Älykkäät... 2017, muokattu)

Päätös matriisi		<i>Verrokki</i>	<i>Konsepti 1</i>	<i>Konsepti 2</i>	<i>Konsepti 3</i>	<i>Konsepti 4</i>	<i>Konsepti 5</i>	<i>Konsepti 6</i>		
		Kriteeri	Painok.							
	<i>Toimintavarmuus</i>	22 %	4	3	2	5	1	2	2	
	<i>Edullisuus</i>	9 %	1	2	3	1	2	4	3	
	<i>Huollettavuus</i>	8 %	5	2	4	5	1	1	2	
	<i>Yhteensopivuus</i>	14 %	4	3	1	3	2	3	1	
	<i>Tehovaatimus</i>	20 %	1	5	2	1	5	2	5	
	<i>Tilavuus</i>	5 %	1	4	1	2	2	2	3	
	<i>Paino</i>	5 %	1	3	1	1	1	1	2	
	<i>Käyttöliittymä</i>	10 %	5	2	5	4	4	3	4	
	<i>Äänekkyyys</i>	2 %	3	1	1	1	2	5	2	
	<i>Viive</i>	5 %	5	2	5	5	3	2	3	
		100 %								
	Painotettu summa		3,04	3,09	2,44	3,03	2,5	2,35	2,85	
	Suhteellinen arvo		16 %	16 %	13 %	16 %	13 %	12 %	15 %	100 %

Alustavan suunnittelun tarkoituksena on tarkentaa konsepteja, niiden toteuttamistapoja, komponentteja sekä alijärjestelmiä. Tämän prosessin aikana pyritään pitämään kokonaiskuva järjestelmästä ja vaatimuksista selkeänä ja edetään systemaattisesti ylemmältä tasolta alemmalle tasolle. Suunnittelutyökaluina voidaan käyttää simulaatioita, mallipohjaisia systeemisuunnittelua ja testaamista. Alustavan suunnittelun päätavoitteena on löytää optimaalisin konsepti, jonka kehittämistä jatketaan. Se toimii välivaiheena konseptoinnin ja tarkentavan suunnittelun välillä. (Daihai, 2015, 29, 60.)

Tarkentavassa suunnitteluvaiheessa edetään järjestelmän alimmalle tasolle. Prosessi etenee sekä ylhäältä alaspäin, että alimmalta tasolta ylöspäin iteroivasti, V-mallin mukaisesti siten, että lopputuloksena on mahdollisimman täydellinen kuvaus järjestelmän komponenteista, ohjelmistosta, toiminnoista, vaatimuksista ja käyttäjistä. Tässä vaiheessa suunnitteluprosessia varmistetaan siitä, että valinnat ja ratkaisut täyttävät kaikki ylemmän tason vaatimukset. Komponenttivalintoja tehdessä varmennutaan järjestelmän integraation onnistuneesta toteuttamisesta, tarkastelemalla järjestelmän ohjelmistojen ja laitteistojen yhteensopivuutta (Daihai, 2015, 61). Valintojen perustelut on syytä dokumentoida tässä vaiheessa, jotta jatkokehitysvaiheessa voidaan tarkastella syitä ja perusteluja ratkaisuille. Perusteellinen määrittely ja dokumentointi helpottavat myös vaihtoehtoisten komponenttien ja järjestelmien myöhempää integraatiota systeemiin.

Tarkentavassa suunnitteluvaiheessa on syytä hyödyntää malleja ja simulaatioita, joiden avulla voidaan tutkia järjestelmän toiminnollisuuksia sekä ohjelmistojen ja komponenttien välistä integraatiota. Malleja voidaan rakentaa yhdistämällä prosessin aikana syntyneitä dokumentaatioita, jolloin lopputuloksena on vankka, joustava ja tehokas suunnittelutyökalu. Simulointituloksien luotettavuuteen vaikuttaa mallin yksityiskohtaisuus ja tarkkuus verrattuna aitoon systeemiin. (Daihai, 2015, 62.)

3.2.2 Työkalut

Innoslate on PLM-työkalu (Product Lifecycle Management), jonka avulla voidaan toteuttaa tehokasta tuotteen elinkaarenhallintaa. Innoslate tarjoaa työkaluja Systems Engineering suunnitteluun, vaatimushallintaan, prosessinhallintaan, projektinhallintaan sekä tuotesuunnitteluun. Se pyrkii tarjoamaan yhdellä ratkaisulla kaikki ohjelmistot järjestelmän koko elinkaaren ajaksi. (Innoslate 2017.)

Teamcenter on Siemensin PLM-työkalu, joka tarjoaa kokonaisvaltaisen, suljetun piirin ja mallipohjaisen PLM kehitysympäristön. Teamcenterin avulla voidaan tehdä arkkitehtuurikuvaus, malleja, simulaatioita sekä toteuttaa vaatimustenhallintaa. Sen avulla voidaan suunnitella ja hallita kompleksisten järjestelmien suunnitteluprosesseja. (Teamcenter 2017.)

Muita Systems Engineering työkaluja ovat muun muassa:

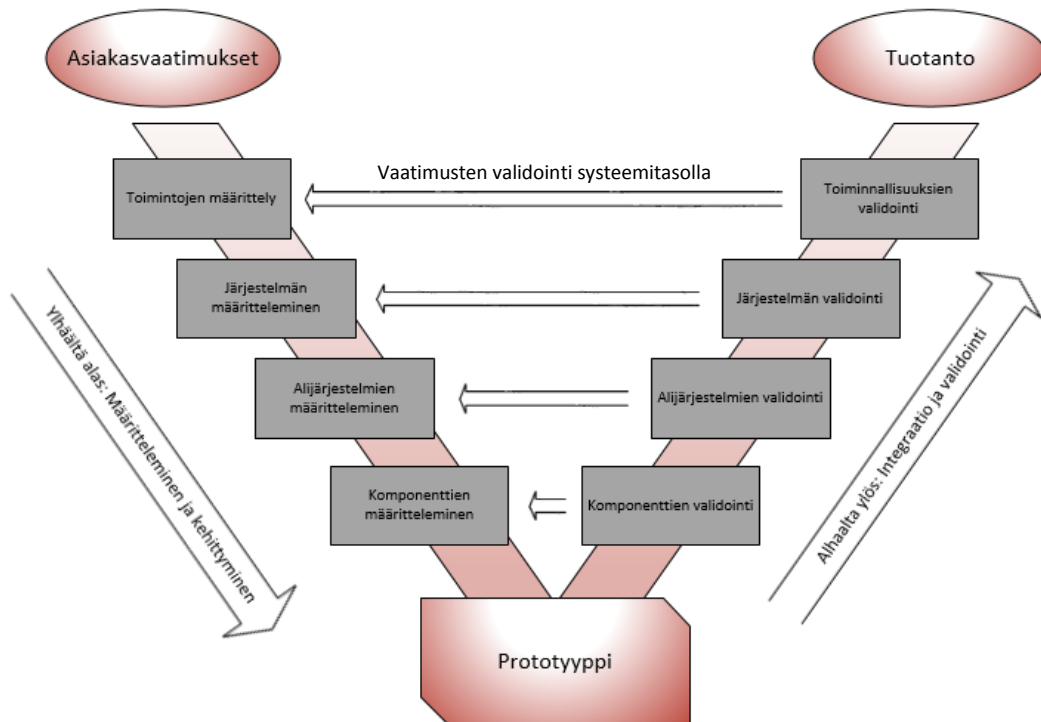
- MagicDraw
- Enterprise Architect
- Rational System Architect
- Rational Rhapsody Architect for Systems Engineers
- Rational DOORS
- Vitech GENESYS
- Vitech CORE

3.3 Mekatronisten järjestelmien suunnittelu

Mekatronisten järjestelmien suunnittelussa vaaditaan systemaattista ja iteroivaa työskentelymenettelyä sekä modernien ohjelmistotyökalujen hyödyntämistä (Isermann 2005, 24). Nykyaikaisten ajoneuvojen ohjausjärjestelmä on hyvä esimerkki mekatronisesta järjestelmästä. Niiden suunnitteluun vaaditaan moniammatillista osaamista, eli monen eri tekniikan alan, kuten: konetekniikan, tietotekniikan sekä sähkötekniikan tuntemusta. Mallintaminen ja simuloiminen ovat oleellisia työkaluja mekatronisten järjestelmien analysoimisessa. Butler (2002) mukaan mallintamisen ja simuloimisen vaikutukset ovat merkittävimpiä konseptointivaiheessa (National Research Council (U.S) 2002, 103).

3.3.1 V-malli

V-malli yhdistää järjestelmän määrittelyvaiheen, komponenttien verifiointin sekä validoinnin. Se tarjoaa systemaattisen työskentelytavan, joka mahdollistaa järjestelmämuutosten tehokkaan toteutuksen. V-mallin lisäksi on olemassa vesiputous- ja spiraalimalli, joita käytetään Systems Engineering suunnitteluprosessin toimintamallina. Mekatronisten järjestelmien suunnitteluprosessi on luonteeltaan iteroiva. Suunnitteluprosessi etenee ylemmän tason kokonaiskuvasta aina alimmalle tasolle asti. (Daihai 2015, 29, 72.)



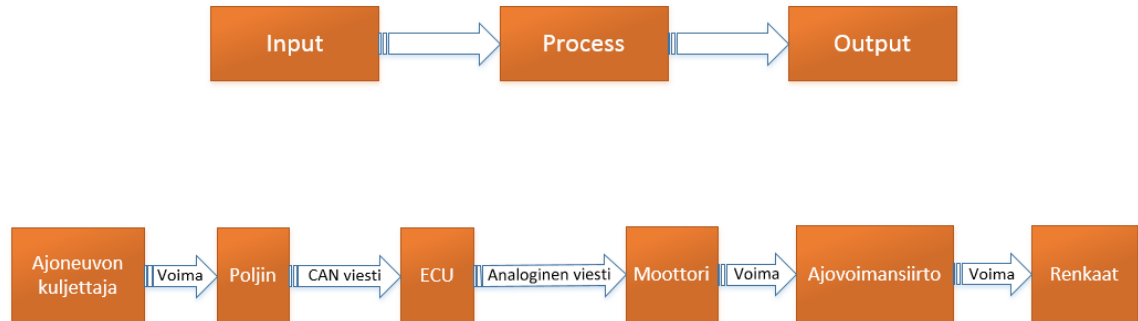
KUVIO 6. V-malli (Isermann 2005, 29; Daihai 2015, 72, muokattu)

V-mallin vasen puoli kuvaa systeemin vaatimuksien määrittelyprosessia ylhäältä alaspäin. Määrittely aloitetaan siis ylimmältä tasolta (asiakasvaatimukset) ja edetään kohti yksityiskohtaisempia, alemman tason vaatimuksia (komponenttitason vaatimukset). Oikea puoli kuvaa järjestelmän integraatiota ja sen validointia. Validointiprosessi etenee vastavuoroisesti alhaalta ylöspäin siten, että validoiminen aloitetaan alimmalta tasolta (komponenttitason vaatimukset) ja edetään kohti ylemmän tason (järjestelmätaso, asiakasvaatimukset) vaatimuksia. Malli tarkentuu siirtyessään vasemmalta oikealle, iteroivaa luonnetta kuvataan taasen oikealta–vasemmalle osoittavin nuolin (vaatumusten validointi systeemitasolla). (Isermann 2005, 24–29.)

3.3.2 Matemaattinen mallintaminen

Tutkittavasta järjestelmästä luodaan yksinkertaistettu teorettinen malli, joka perustuu matemaattisesti muodostettuihin luonnonlakeihin, tätä mallia kutsutaan myös teorettiseksi analyysiksi. Analyysi aloitetaan malliin vaikuttavien luonnonvoimien tunnistamisella. Teorettista tarkastelua varten malli jaotellaan tarvittaessa osa- ja kokonaisprosesseihin, erillistä tarkastelua varten. (Isermann 2005, 34.) Teorettinen analyysi pitää

sisällään aina virheen, koska teoreettisessa tarkastelussa joudutaan tekemään olettamuksia ja yksinkertaistuksia. Olettamuksien takia kaikkia systeemin vaikuttavia asioita ei voida huomioida, joka vähentää luotettavuutta.



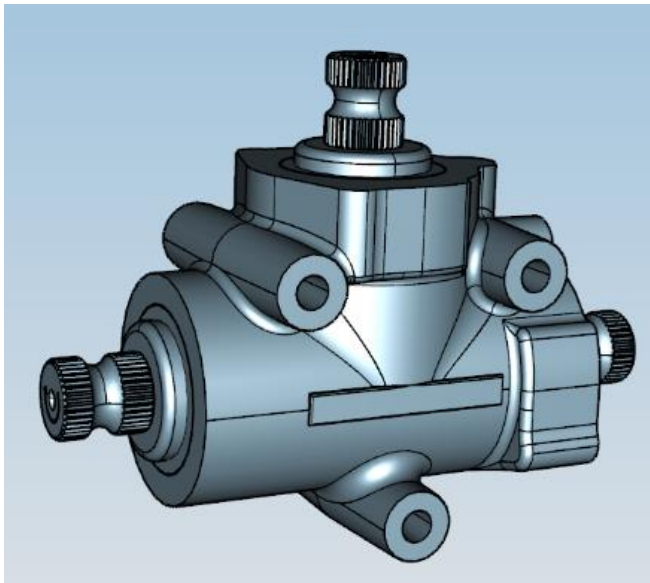
KUVIO 7. Lohkokaavioesitys prosessiin vaikuttavista suureista (Harri Paju 2017)

Tila- ja aikariippuvuuden avulla voidaan muodostaa osittaisia differentiaaliyhtälöitä ja jos, prosessit ovat vain ajan suhteen riippuvaisia, voidaan niistä silloin muodostaa tavallisia differentiaaliyhtälöitä. Osittaisia- ja tavallisia differentiaaliyhtälöitä yhdistelemällä muodostetaan teoreettinen prosessimalli, jolle voidaan esittää muuttujia. (Isermann 2005, 34.) Differentiaaliyhtälöiden avulla voidaan kuvata järjestelmän dynaamista käyttäytymistä. Yleisesti mallia täytyy kuitenkin yksinkertaistaa myöhempiä sovelluksia varten. Teoreettisen mallintamisen lisäksi järjestelmästä voidaan luoda kokeellinen malli.

Kokeellisessa mallissa tutkitaan tulojen ja lähtöjen välistä riippuvuutta esimerkiksi mittauksin, jota voidaan vertailla teoreettiseen malliin. (Isermann 2005, 34–35). Malleista on olemassa eritasoisia versioita: black box, white box sekä gray box. Black box-mallissa nähdään vain järjestelmän sisäänmenot ja ulostulot ilman, että itse järjestelmän teoreettista toimintaa pystytään mallintamaan. White box mallissa, järjestelmän prosessista on olemassa dataa, jonka avulla pystytään simuloimaan järjestelmän toimintaa. Gray box on yhdistelmä black- ja white box malleista, jossa systeemin toimintaa ei pystytä kuvaamaan täysin teoreettisen mallin avulla. Gray box on yhdistelmä kokeellista ja teoreettista mallintamista. (NBS System 2017).

3.3.3 Tietokoneavusteinen mallintaminen

CAD (Computer Aided Design, tietokoneavusteinen mallintaminen) -ohjelmien avulla komponenteista voidaan piirtää 3D-malleja ja niitä yhdistelemällä rakentaa kokoonpanoja. CAD-mallien avulla ajoneuvon rakenteiden muutoksia voidaan tarkastella tietokoneella, joka mahdollistaa uusien komponenttien sovittamisen sekä rakenteiden muokkaamisen kustannustehokkaasti, ilman fyysisiä muutostöitä (Daihai 2015, 62). CAD-ohjelmat on tarkoitettu pääosin mekaanisten kappaleiden/mallien suunnitteluun. Kohdeyrityksessä käytetään Siemensin – NX ja Teamcenter – PLM (Product Lifecycle Management) -ohjelmia. Näiden ohjelmien avulla tehdään 3D-malli kaikista ajoneuvon komponenteista ja yhdistetään ne kokoonpanoksi. Ajoneuvo on jaettu myös osakokoonpanoihin, joka helpottaa tarkastelua ja muutostöitä. Erityisen kätevää on se, että kaikki komponentit ovat oikeissa mittasuhteissa, joten tilasuunnittelussa voidaan sovittaa ja järjestellä komponentteja pienellä työpanoksella. (Defense System Management 1999, 106–107.)



KUVA 4. Kuvakaappaus NX-ohjelmistolla tehdystä 3D-mallista (Harri Paju 2017)

3.3.4 Mallipohjainen systeemisuunnittelu

Alustavassa suunnitteluvaiheessa tutkittiin, mitä toimintoja järjestelmä vaatii toimiakseen ja miten nämä vaatimukset saadaan täytettyä. Jotta ymmärretään, miten järjestelmä toimii, täytyy ymmärtää myös toimintoihin vaikuttavien alijärjestelmien vaatimukset ja toiminnollisuudet. Alustavassa suunnittelussa hyödynnetään mallipohjaista systeemisuunnittelua, joka tarjoaa erilaisia malleja vaatimuksista, toiminnollisuuksista, hierarkiasta, fyysisestä rakenteesta, ohjelmakierrosta sekä lukuisista muista järjestelmäkuvauksista.

SysML-kieltä voidaan käyttää apuna, kun määritellään järjestelmän arkkitehtuuria sekä komponentteja toisin, kun UML-kieli, joka keskittyy enemmän ohjelmiston toiminnalliseen suunnittelemiseen. Molemmat edellä mainituista kielistä kuuluvat GPML (general-purpose modeling language) kielisiin ja niitä käytetään kuvaamaan järjestelmän arkkitehtuuria sekä sanomanvaihtoa. UML-kielille on olemassa oma CCITT:n standardi (CCITT Z.120). (Haikala & Märijärvi 2004, 152; Daihai 2015, 51–52.)

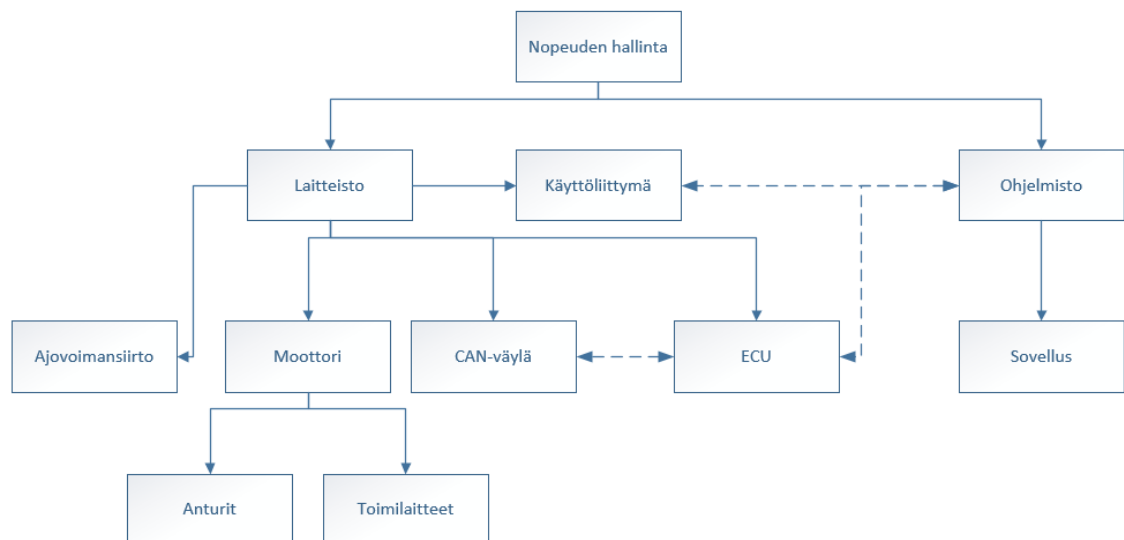
SysML tarjoaa työkalun, jolla voidaan rakentaa malleja erilaisista systeemeistä rajoittumatta pelkästään ohjelmistoon. SysML-mallilla on kaksi näkökohtaa, rakenne sekä käyttäytyminen. (Holt, Perry & Brownsword 2012, 33.) Mallit voivat sisältää komponentteja, ohjelmistoja, informaatiota, prosesseja, käyttäjiä sekä työskentelytiloja joiden avulla kuvataan niiden välisiä riippuvuuksia.



KUVIO 8. SysML-kaaviot (Harri Paju 2017)

Rakennetta kuvaavia SysML-malleja ovat (Holt ym. 2012, 33):

- Lohkokaavio
 - Kuvaa järjestelmän/komponenttien hierarkiaa ja luokittelua. Mahdollistaa järjestelmän ominaisuuksien ja käyttäytymisen muuntamisen malleiksi
- Pakettikaavio
 - Mallin organisoimista varten
- Sisäinen lohkoavio
 - Kuvaa järjestelmän sisäistä rakennetta, komponenttien, rajapintojen ja porttien avulla
- Parametrinen kaavio
 - Esittää järjestelmän ominaisuuksien rajoituksia. Parametrisen kaavion avulla voidaan esittää monimutkaisia suhteita, joita voidaan hyödyntää vaatimuksien todentamisessa ja validoinnissa
- Vaatimuskavio
 - Vaatimuksien hierarkiaa ja syntymistä kuvaava kaavio. Yhdistää ja varmentaa vaatimuksia mallin elementteihin

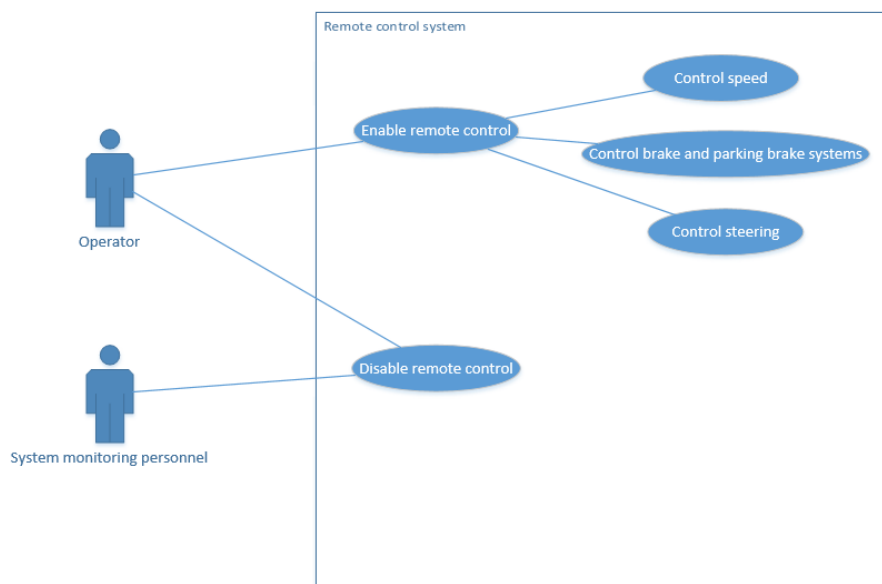


KUVIO 8. Nopeuden hallintajärjestelmien lohkoavioesitys (Harri Paju 2017)

Käyttäytymistä kuvaavia SysML-malleja ovat (Holt ym. 2012, 33):

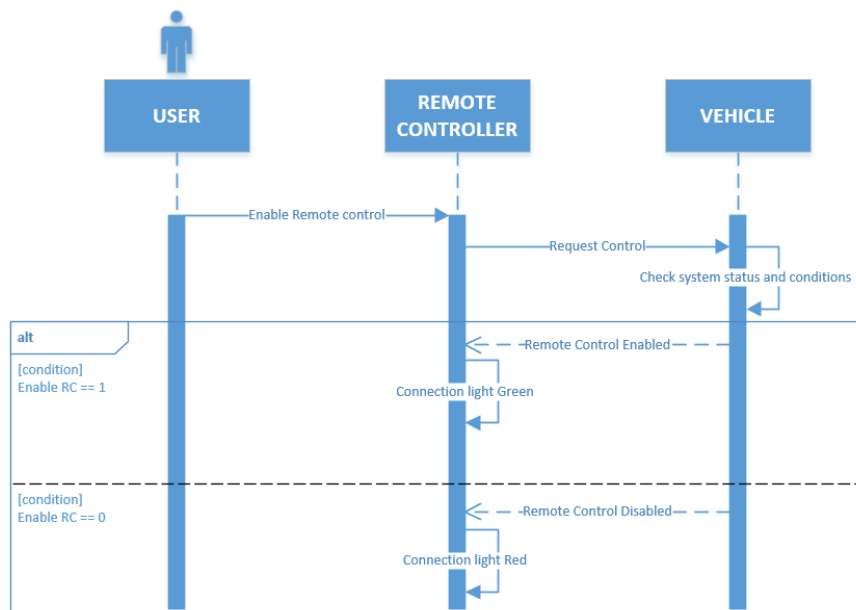
- Käyttötapauskavio
 - Korkean tason kuvaus järjestelmän toiminnasta. Kuvaa järjestelmän systeemien välisiä vuorovaikutuksia

- Sekvenssikaavio
 - Järjestelmän osien välistä sanomanvaihtoa kuvaava kaavio. Sekvenssikaavioiden avulla mallinnetaan erilaisia skenaarioita järjestelmän toiminnoista
- Tilakonekaavio
 - Kuvastaa järjestelmän tilanvaihtoon liittyviä tapahtumia ja toimenpiteitä
- Aktiviteettikaavio
 - Datan- ja ohjauspyyntöjen kulkua kuvaava kaavio. Käytetään yleisesti kuvaamaan järjestelmän sisäistä käyttäytymistä ja toimenpiteitä



KUVIO 9. UML-käyttötapauskavaavio (Harri Paju 2017)

UML kielen sekvenssikaavioiden (UML-sequence diagram) avulla järjestelmän ohjelmiston toiminnan kuvaaminen on paljon informatiivisempaa, verrattuna tekstipohjaiseen dokumenttiin. UML-sekvenssikaaviot kertovat tapahtumien aikajärjestyksen ja riippuvuudet, joten sekvenssikaavion avulla saa hyvän käsityksen järjestelmän toiminnasta. Erilaisia järjestelmää kuvaavia monimutkaisia kaavioita voidaan tehdä esimerkiksi Microsoft Vision avulla.



KUVIO 10. UML-sekvenssikaavio järjestelmän käynnistämisestä. (Harri Paju 2017)

4 KOHDEYRITYKSEN TUOTEKEHITYSPROJEKTI

4.1 Tausta ja tavoitteet

Kohdeyrityksen salassa pidettävästä materiaalista johtuen, projektin yksityiskohtaista kuvausta ei voida dokumentoida tähän opinnäytetyöhön. Esimerkeissä pyritään kuitenkin käyttämään raskaiden ajoneuvojen yleisimpiä tekniikoita, jotta tämän opinnäytetyön sisältöä voidaan hyödyntää myös muissa samankaltaisissa projekteissa. Ajoneuvo, johon etäohjausjärjestelmä suunnitellaan, on yli 12 tonnia painava, kuorma-auton tekniikkaan perustuva, diesel-käyttöinen maastoajoneuvo.

Toteutuksessa pyrittiin minimoimaan järjestelmän ulkopuolella jäävät rajapinnat, jotta huoltotoimenpiteet, laajentaminen ja kolmannen osapuolen liittyminen järjestelmään on helpompaa. Kohdeyrityksen ajoneuvossa käytetään sekä mekaanisesti-, että sähköisesti ohjattavia järjestelmiä. Tavoitteena oli muuttaa nämä mekaaniset järjestelmät sähköisesti ohjattaviksi ja yhdistää ne samalle fyysiselle laitteelle yhteisen rajapinnan kautta.

Etäohjausjärjestelmän suunnittelutyö aloitettiin kohdeajoneuvon tarkastamisella, jonka aikana listattiin teknisiä ominaisuuksia ja rajoitteita. Kaikki selvitystyössä ilmenneet asiat dokumentoitiin, jonka pohjalta projektisuunnitelma ja vaatimusmäärittely kirjoitettiin. Suunnittelun alkuvaiheessa varmistettiin, että työtehtävät ja vastuut ovat selvillä sekä kaikki tarvittavat ohjelmat ja työkalut saatavilla. Projektisuunnitelmaan laadittiin aikataulu, jossa suunnittelutyö jaoteltiin osakokonaisuuksiksi. Järjestelmän suunnittelu eteni Systems Engineering-toimintamallin ja V-mallin mukaisesti.

4.2 Projektin perustaminen

Projektioorganisaatio kokoontui ensimmäisen kerran yhteisesti työsuhteeni alkaessa. Tämän palaverin tarkoituksena oli määritellä projektiin osallistuvien avainhenkilöiden päävastuut ja roolit. Roolini projektissa oli Systems Engineering Manager, vastaten toteutettavan järjestelmän teknisestä suunnittelusta ja vaatimusmäärittelystä. Palaverissa nimitettiin myös projektipäällikkö sekä ohjausryhmä. Ensimmäisen tapaamisen tavoitteena oli

käynnistää suunnitteluprosessi sekä aloittaa projektiorganisaatioon kuuluvien henkilöiden perehdyttäminen.

Perustamisvaiheen keskeisimpiin tavoitteisiin kuuluivat projektisuunnitelman- ja vaatimusmäärittelyn kirjoittaminen sekä baseline-aikataulutuksen laatiminen. Tässä vaiheessa projektia perustettiin kohdeyrityksen PLM-järjestelmään projekti, johon kyseiset dokumentit ja muut tuotokset voitiin linkittää. Lisäksi projekti luotiin PDM-järjestelmään.

Ennen projektisuunnitelman kirjoittamista varmistettiin hankkeeseen osallistuvien henkilöiden, tilojen, työkalujen sekä muiden yhteiskäytössä olevien resurssien saatavuus. Vaatimusmäärittelyn tekeminen aloitettiin tutustumalla aiheesta tehtyihin tutkimuksiin ja hanke-ehdotuksiin. Suunnitelma sekä vaatimusmäärittely kirjoitettiin valmiille, otsikkotasot sisältävälle pohjalle, jotta se olisi yhtenäinen muiden yrityksen dokumenttien kanssa.

4.3 Vaatimusmäärittely

Vaatimusmäärittelyn laatiminen aloitettiin perehtymällä kohdeyrityksen ajoneuvosta tehtyihin autonomiatutkimuksiin. Tutkimuksissa selvitettiin erilaisia käyttötilanteita, tarpeita ja toteuttamistapoja autonomisille ja etäohjattaville ajoneuvoille. Vaatimuksien laadimisessa näiden tutkimuksien merkitys oli oleellinen, koska Systems Engineering suunnitteluprosessia ohjataan pitkälti vaatimuksien perusteella.

Tutkimusten pohjalta laadittiin toiminnollisia ja ei-toiminnollisia vaatimuksia, joita etäohjausjärjestelmän tulee täyttää. Vaatimuksienhallintaa toteutettiin vaatimuksien sidonnaisuuksia ilmentävien taulukoiden ja matriisien avulla, kirjaamalla kaikkien vaatimuksien tarkoitus, toiminnollinen kuvaus, todentaminen sekä vaikutus järjestelmään. Kaikki ylemmän tason vaatimukset luotiin yhteistyössä tuotehallinnan sekä tuotesuunnittelun kanssa, jotta vaatimukset olisivat linjassa ajoneuvon kehityksen ja tulevaisuuden teknologiaratkaisujen kanssa. Prosessin aikana dokumentaatiota katselmoitiin, muokattiin ja päivitettiin ennen hyväksyttämistä, V-mallin mukaisesti. Vaatimusmäärittelyn hyväksyi projektipäällikkö yhteistyössä ohjausryhmän kanssa. Muutokset vaatimusmäärittelyyn vaativat dokumentin uudelleenkatselemisen ja -hyväksymisen, tällöin tutkitaan muutoksien aiheuttamat toimenpiteet kaikkiin järjestelmän osiin. Täten oli erityisen tärkeää, että

vaatimusmäärittelyn rinnalla dokumentoitiin myös vaatimusten keskinäiset sidonnaisuudet, hierarkia, prioriteetit ja esiehdot. Lisäksi kohdeyrityksessä dokumentoitiin vaatimusten syntymiseen liittyvät perustelut, jotta mahdollisessa muutosprosessissa tiedetään, mikä johti kyseiseen spesifikaatioon. Esimerkiksi, jos päädytään valitsemaan 11” näyttö kojetauluun siksi, että kyseisen valmistajan 10” näytön toimitusaika kyseisellä hetkellä oli useita viikkoja ja näyttö tarvittiin välittömästi. Tällöin saattaa syntyä virheellinen käsitys siitä, että näytön koko on spesifikaation mukaisesti oltava 11”. Tämä voi vaikuttaa virheellisesti tulkittuna merkittävästi esimerkiksi mahdollisen jatkokehitysprojektin kojetaulun tilankäyttöön.

4.4 Työkalut

Projektissa käytettiin useita erilaisia suunnittelutyökaluja ja ohjelmistoja. Dokumentit laadittiin pääsääntöisesti MS-Office ohjelmistoilla, kuten Word, Excel, Visio sekä PowerPoint. 3D-mallit suunniteltiin Siemens NX-ohjelmalla, joka on linkitettyä Teamcenter PLM-työkaluun. Projektinhallintaan liittyvään dokumentaatioon käytettiin apuna ATON PDM-työkalua (Product Data Management).

4.5 Konseptointi

Etäohjausjärjestelmän toiminnollisuuksien konseptointi osoittautui hyvin haastavaksi. Ajoneuvon mekaanisesti toimivien laitteiden muuntaminen etäohjattavaksi sellaisessa ympäristössä, jonka tilasuunnittelu on hyvin optimoitua, aiheuttaa väistämättä muutostöitä ajoneuvorakenteisiin. Muutostyöt rakenteisiin taasen aiheuttavat lisätyötä, kun tarkastellaan muutoksien aiheuttamat vaikutukset esimerkiksi lujuuslaskelmiin ja jäykkyyteen. Konseptivaiheessa pyrittiin löytämään erilaisia toteuttamisvaihtoehtoja, jotka täyttävät sekä vaatimusmäärittelyn ylemmän tason vaatimukset, että projektisuunnitelman resurssivaatimukset.

Tarkoituksena oli suunnitella vaihtoehtoisia tai rinnakkaisia järjestelmiä ajoneuvon toiminnollisuuksien etäohjaamiseksi. Ensimmäiseksi etäohjausjärjestelmä jaoteltiin alijärjestelmiksi, kuten suunnan, nopeuden, jarruttamisen sekä vaihteiston etäohjausjärjestel-

miksi. Näiden alijärjestelmien etäohjauksen suunnittelu aloitettiin perehtymällä ajoneuvon rakenteisiin, tekniikkaan ja ohjausjärjestelmään. Suunnitteluprosessin alkuvaiheessa tukeuduttiin yrityksen suunnittelijoiden asiantuntemukseen ja visioihin, järjestämällä suunnittelupalavereita sekä osallistumalla ajoneuvotekniikka käsitteleviin koulutuksiin. Näiden palavereiden ja koulutuksien pohjalta listattiin erilaisten vaihtoehtojen positiivisia ja negatiivisia puolia Excel-taulukkoon, katselmointia varten.

4.6 Alustava suunnittelu

Konseptikierroksella syntyneet visiot kerättiin yhteen ja esiteltiin ohjausryhmälle, asiantuntijoille sekä projektipäällikölle. Katselmoinnissa valittiin ne konseptit, jotka siirtyvät jatkokehiteltäväksi seuraavaan vaiheeseen. Tässä vaiheessa suunnitteluprosessia aloitettiin rakentamaan malleja valituista konsepteista, tarkentamaan toiminnollisuuksia, päivittämään dokumentteja sekä tekemään ensimmäisiä hankintoja. Hankintoja varten määriteltiin komponenteille vaatimuksia, laskelmoitiin suorituskykyä, tarkasteltiin yhteensopivuutta ja muokattiin ajoneuvon 3D-mallia. Alustavan suunnittelun tarkoituksena oli varmistaa järjestelmien toiminnollisuutta sekä suorituskykyä, jotta voitiin varmistua niiden oikeellisesta toimivuudesta.

Järjestelmien toimintoja tarkentaessa tarkasteltiin systemaattisesti, että kaikki ylemmän tason vaatimukset täyttyvät. Prosessin aikana jouduttiin muokkaamaan joitakin toiminnollisuuksia sekä komponentteja, mutta hyvin määriteltyjen vaatimuksien ja suunnitelmien ansiosta muutoksenhallinta pystyttiin toteuttamaan verrattain vähäisellä työmäärällä. Kohdeyrityksen projektinhallinta ja projektijohtaminen ovat erittäin korkealla tasolla, jonka ansiosta pystyttiin ennakoimaan mahdollisia ongelmatilanteita ja reagoimaan varhaisessa vaiheessa muiden projektien aiheuttamiin negatiivisiin vaikutuksiin. Etäohjausjärjestelmän alustavan suunnittelun rinnalla pystyttiin huolehtimaan myös kokonaisvaltaisesta projektinhallinnasta sekä toteuttamaan Systems Engineering-toimintamallia suunnitellulla tasolla.

4.7 Tarkentava suunnittelu

Järjestelmien tarkentavassa suunnittelussa määriteltiin kaikki toimintaan vaikuttavat asiat aina yksittäisistä sähkökaapelien kytkennöistä – yksittäisten komponenttien toimitusaikoihin. Tarkentavan suunnittelun haasteeksi osoittautui yrityksen vähäiset suunnitteluresurssit, koska muut projektit sitoutuivat osaa avainhenkilöistä. Tässä vaiheessa projektia järjestettiin katselmointi jokaiselle alijärjestelmälle, jossa varmistettiin, että suunnittelytyössä ja dokumentoinnissa on huomioitu toimintaan liittyvät asiat tarpeeksi yksityiskohtaisesti. Katselmuksen jälkeen edettiin iteroivasti, testaten ja muokaten suunnitelmia ja dokumentaatiota, kunnes järjestelmän toiminta saatiin halutun kaltaiseksi.

Yksityiskohtaisessa suunnitteluprosessissa syntyi runsaasti dokumentteja, jotka liitettiin ATON tuotehallintajärjestelmään. Järjestelmän toimintaa kuvattiin SysML ja UML kaavioiden avulla. Näiden mallipohjaisten järjestelmäkaavioiden avulla pystyttiin mallintamaan järjestelmän rakennetta ja komponenttien sidonnaisuuksia, joka helpotti kokonaiskuvan hahmottamista. Kaaviot myös avustivat ohjelmistosuunnittelua ja helpottivat moniammatillista keskustelua. Kaavioiden avulla nähdään ohjelmiston ohjauspyyntöjen ja komponenttien toimintojen väliset vuorovaikutukset, jolloin eri asiantuntijat pystyvät hahmottamaan järjestelmän loogista toimintaa oman teknillisen vastualueensa osalta.

4.8 Komponenttien määrittely

Tarkentavan suunnittelun lopputuloksena oli miltei täydellinen kuvaus järjestelmän toiminnasta. Kuvauksen perusteella pystyttiin määrittelemään järjestelmän jokaiselle komponentille omat vaatimukset ja sidonnaisuudet. Määrittelyn lopputuloksena oli spesifikaatio, jossa listattiin ne vaatimukset, jotka kyseisen komponentin tulee täyttää. Näiden vaatimuksien lisäksi listattiin sellaisia ominaisuuksia, jotka tulee tai on hyvä ottaa huomioon mahdollisessa jatkokehityshankkeessa.

Spesifikaatioiden ulkoasu riippui määrittelystä komponentista. Määrittely on syytä tehdä yksiselitteisesti ja kattavasti, mutta siinä tulee välttää ylimääräisten tai liioiteltujen vaatimuksien listaamista. Komponenttien kuvauksien tulee olla mahdollisimman tarkkoja ja jos ne sisältävät minimi- tai maksimivaatimuksia on nämä syytä sisällyttää spesifikaatioon.

4.9 Verifiointi

Suunnittelun ja toteuttamisen jälkeen tulee järjestelmän toimivuus todentaa. Verifiointilla tarkoitetaan vaatimusten ja tavoitteiden täyttymisien varmentamista, eli testataan ja dokumentoidaan järjestelmän toiminta. Verifiointilla ei tarkoiteta projektin tavoitteiden täyttymistä, vaan puhtaasti järjestelmän toiminnallisten ja ei-toiminnallisten toimintojen varmentamista. Verifiointin jälkeen kirjoitetaan loppuraportti, jossa voidaan esittää projektin päättämistä. (Pelin 2011, 346–348.)

Osa järjestelmän vaatimuksista perustuu yksiselitteisiin, mitattaviin suureisiin joiden täytyminen on yksinkertaista varmentaa. Joidenkin vaatimusten tai toimintojen todentaminen voi riippua testaushenkilöstä tai asiakkaasta, mikä saattaa johtaa erimielisyyksiin järjestelmän oikeellisesta toimivuudesta. Testaussuunnitelmassa tulee kuvata järjestelmälle asetettujen tavoitteiden ja vaatimusten täytyminen siten, että mahdolliset tulkinanvaraiset asiat voidaan ehkäistä. Standardien mukaiset testaussuunnitelmat ja vaatimukset avustavat järjestelmän toimintojen verifiointissa. Järjestelmän testaamisessa tärkeintä on todentaa järjestelmän toiminta objektiivisesti ja vertailla tuloksia asetettuihin vaatimuksiin. Täten saadaan oikeellinen kuva järjestelmän toiminnasta ja tulokset voidaan tarvittaessa suorittaa uudelleen. Todentamisessa ja laadunvarmistuksessa voidaan käyttää apuna erilaisia standardeja, jolloin järjestelmän laadunvarmentaminen on myös kolmannen osapuolen näkökulmasta helpompaa. Verifiointin lopputuloksista tehdään loppuraportointi ja päätetään projekti. Projekti voi myös verifiointin jälkeen jatkua, mutta yleensä tässä vaiheessa perustetaan jatkokehittelyä varten uusi projekti. Projektiorganisaatiosta määrätään yksi testausvastaava, joka huolehtii testien dokumentoinnista ja raportoinnista, testihenkilöstön määrä riippuu testien laajuudesta ja luonteesta- (Defense System Management 1999, 57–61.)

5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Opinnäytetyössä perehdyttiin raskaan maastoajoneuvon etäohjausjärjestelmän projektinhallintaan ja vaatimusmäärittelyyn yleisellä tasolla. Työtä oli tarkoitus hyödyntää kohdeyrityksen tuotekehitysprojektissa suunnittelun ja toteuttamisen tukimateriaalina. Työn haasteeksi osoittautui raskaan maastoajoneuvon määrittelemisen siten, että työtä voitaisiin aidosti hyödyntää sellaisenaan kohdeyrityksessä. Kirjoitusprosessin aikana työn aihealue muokkaantui, kun pyrittiin kirjoittamaan johdonmukaista ja ohjeistavaa dokumenttia ilman, että pystyttiin tukeutumaan varsinaiseen kohdeyrityksen projektimateriaaliin. Lopputuloksena oli opinnäytetyö, jonka teoriaosuuteen löytyi nykyaikaisia ja kansainvälisiä lähteitä. Tuotekehitysprojektia koskevan osion lähdemateriaalin puutteen vuoksi, opinnäytetyön luotettavuus ja alkuperäinen käyttötarkoitus kärsivät.

Onnistuneen etäohjausjärjestelmän vaatimusmäärittely ja projektinhallinta vaativat erityisesti projektijohtamista, Systems Engineering suunnitteluprosessin tuntemista sekä nykyaikaisten suunnittelutyökalujen ja tekniikoiden hallintaa. Suunnittelutyökalujen tehokas käyttäminen helpottaa projektiorganisaation sisäistä kommunikaatiota sekä avustaa muun muassa vaatimuksienhallintaa sekä dokumentointia. Systems Engineering työkalut helpottavat dokumentaatiota ja resurssihallintaa.

Opinnäytetyötä voitaisiin parantaa valitsemalla kohdeajoneuvo siten, että kaikki ratkaisut sekä tekniikat voitaisiin dokumentoida raporttiin sellaisenaan. Lisäksi työssä voitaisiin tutkia lisää etäohjausjärjestelmien hyödyllisyyttä vertaamalla etäohjausta perinteiseen ohjaustapaan. Työ on ollut tekijälleen erittäin mielenkiintoinen ja palvellut tosielämän tarpeita. Haasteena oli ajoneuvon tekniikkaan liittyvä salainen materiaali ja sen myötä järjestelmän kokonaiskuvan hahmottaminen lukijaystävällisellä tavalla.

LÄHTEET

- AKP-2016 Älykkäät Koneet Projektityöt (14i228). 2017. Tampereen ammattikorkeakoulu: Tabula.
- Bennett, S. & Norman, I-A. 2011. Heavy vehicle systems 5. painos. New York: Cengage Learning.
- Bosch, R. 2002. Autoteknillinen taskukirja. 6. painos. Jyväskylä: Gummerrus Oyj.
- Butler, D.C. 2002. The integration of models and simulations: A life cycle approach. Presentation by David C. Butler, George Mason University, to the INCOSE Mid-Atlantic Regional Conference, Sheraton Reston Hotel, Reston, Va., April 5–8.
- CAT. 2017. COMMAND FOR DOZING – WHEN TO USE LINE-OF-SIGHT CONTROL. Luettu 13.11.2017
https://www.cat.com/en_US/by-industry/mining/articles/line-of-sight-rd.html
- Defense System Management College press. 1999. System Engineering Fundamentals. Virginia. Luettu 10.7.2017
- Dictionary. 2017a. Autonomous. Luettu. 22.09.2017
<http://www.dictionary.com/browse/autonomous>
- Dictionary. 2017b. Remote Control. Luettu. 22.09.2017
<http://www.dictionary.com/browse/remote-control>
- Franceschini, F. 2001. Advanced Quality Function Deployment. 1. painos. CRC Press
- Haikala, I. & Märijärvi, J. 2004. Ohjelmistotuotanto. 10. painos. Hämeenlinna: Karisto Oy.
- Innoslate. 2017. Systems Engineering PLM. Luettu 6.11.2017.
<https://www.innoslate.com/>
- Isermann, R. 2005. Mechatronic systems: fundamentals. 1. painos. Lontoo: Springer-Verlag.
- Holt, J., Perry S-A. & Brownsword, M. 2012. Model-Based Requirements Engineering. Lontoo: The Institution of Engineering and Technology.
- Murphy, R.R. 2000. Introduction to AI Robotics. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- National Research Council (U.S). 2002. Technology Development for Army Unmanned Ground Vehicles. Washington D.C: National Academic Press.
- NBS System. 2017. Black box, grey box, white box testing: what differences? Luettu 13.11.2017.
<https://www.nbs-system.com/en/blog/black-box-grey-box-white-box-testing-what-differences/>

Materiaalipankki. 2017. Patria AMV XP. Luettu 4.5.2017.
<http://patria.mediabank.fi/en/material/single/6736>

Pelin, R. 2011. Projektihallinnan käsikirja. 7. painos. Helsinki: Projektijohtaminen Oy.

Project Management Institute. 2016. Requirements Management: A Practice Guide. Pennsylvania: Newtown Square. eBook.

SAE. 2017. Automated driving standard J3016. Luettu 22.05.2017.
https://www.sae.org/misc/pdfs/automated_driving.pdf

Dahai, L. 2015. Systems Engineering. New York: CRC Press.

Teamcenter. 2017. Systems Engineering. Luettu. 6.11.2017.
<https://www.plm.automation.siemens.com/en/products/teamcenter/systems-engineering-software/index.shtml>

TEKES. 2016. Suomesta miehittämättömän liikenteen huippuosaajien kohtaamispaikka. Luettu. 22.09.2017
<https://www.tekes.fi/nyt/uutiset-2016/suomesta-miehittamattoman-liikenteen-huippu-osaajien-kohtaamispaikka/>

LIITTEET

Liite 1. When to use line-of-sight control (CAT 2017)

CAT® MINESTAR™

COMMAND FOR DOZING – WHEN TO USE LINE-OF-SIGHT CONTROL

Command for Dozing with Line-of-Sight (LOS) control is a valuable tool to have on your mine site. In certain applications, it pays to have the operator on site watching the machine in person, but not working inside the cab. Here are a few examples of ideal uses for an LOS remote dozing solution.

	HAZARDS	ADVANTAGES
 CLEANING UP UNDER A HIGHWALL	Falling rocks, slumping and landslides	Operators are well AWAY FROM THE HAZARD area
 GRADING ON A STEEP SIDE SLOPE	Operator fatigue Rollover	Operators DO NOT HAVE TO BRACE THEMSELVES Allows operators to WORK MORE SAFELY and confidently
 CRUSHER LOADING FROM A STOCKPILE	Unstable material near the hopper Packed material can hide a feeder cavity	Allows a DIFFERENT VANTAGE POINT for operators Operators work from a SAFE DISTANCE OFF THE MACHINE
 RIPPING	Operator fatigue Whole-body vibration	NO PHYSICAL STRAIN looking back at the ripper Operators are off the machine and AWAY FROM VIBRATION
 UNDETONATED BLASTHOLES	Undetonated explosive in blastholes	MAINTAINING MINE PRODUCTIVITY by quickly and safely remedying unexploded blastholes
 UNANTICIPATED DANGERS	Special situations, evolving safety hazards Rock falls, slides and other sudden site changes You won't know you need it until you do	When a dangerous situation arises, Command for dozing will be ready to help KEEP YOUR PEOPLE SAFE Allows restricted-duty personnel to operate a dozer, effectively EXPANDING YOUR SITE'S WORKFORCE

IMPROVE YOUR SITE SAFETY

Interested in learning more about the safety and efficiency improvements you can get from Cat® Command for dozing? [Click here.](#)

Want to learn more about the benefits of using remotely controlled and autonomous mining equipment? [Click here for an in-depth video.](#)

© 2016 Caterpillar. All Rights Reserved.
 CAT, CATERPILLAR, BUILT FOR IT, their respective logos, "Caterpillar Yellow," the "Power Edge" trade dress and Product Link, as well as copiers and product identity used herein, are trademarks of Caterpillar and may not be used without permission.