

**MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU**

**LAYKKA-AMPGV:N INKREMENTAALINEN KEHITYSPROSESSI  
RUNKOVERSIO X.2:STA X.3:EEEN SEKÄ KEHITYKSEN SEURANTA  
KENTTÄTESTEILLÄ JA -KOEELLA**

Pro gradu -tutkielma

Yliluutnantti  
Christian Anttoni Andersson

SM10  
Maasotalinja

Maaliskuu 2022

## MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi Sotatieteiden maisterikurssi 10	Linja Maasotalinja
Tekijä Yliluutnantti Christian Anttoni Andersson	
Tutkielman nimi <b>Laykka-AMPGV:n inkrementaalinen kehitysprosessi runkoversio X.2:sta X.3:een sekä kehityksen seuranta kenttätesteillä ja -kokeella</b>	
Oppiaine, johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka MPKK:n kirjasto
Aika Maaliskuu 2022	Tekstisivuja 72 Liitesivuja 36

### TIIVISTELMÄ

Laykka-AMPGV (Autonomous Multi Purpose Ground Vehicle) on tutkijan Suomen Puolustusvoimia varten kehittämä pienikokoinen miehittämätön maastoajoneuvo. Sen ensisijainen tehtävä on toimia tiedustelussa ja panssarintorjunnassa uhrattavana järjestelmänä, mutta modulaarisuutensa ansiosta sitä voidaan hyödyntää monissa eri tehtävissä älykkäästä miinakentästä automatisoituihin vartioinnin ja logistiikan tehtäviin. Tämän tutkimuksen aikana Laykka on demonstraattorivaiheessa, jossa sitä kehitetään kohti prototyyppivaihetta. Laite on toistaiseksi vain tutkimuskäytössä ja sitä hyödynnetään tutkimusalustana muiden moninaisten järjestelmien kehitystyössä.

Laykka-AMPGV:n kehittämisessä käytettiin inkrementaalisen kehittämisen mallia, jossa seuraavalle kehitysasteelle voidaan siirtyä ennaltamääritettyjen minimivaatimusten täytyessä. Siksi tämän tutkimuksen aikana Laykka-AMPGV:tä kehitettiin täyttämään asetettuja suorituskykyvaatimuksia ja tutkimuksen tavoite oli selvittää kuinka monta suorituskykyyn kohdistuvista vaatimuskohdista Laykka-AMPGV täyttää. Lisäksi tutkimuksessa mallinnettiin Laykkan maastoliikkuvuuskyvykkyudet ja tulokset varmennettiin kenttätesteissä.

Tutkimusraportissa käytetty aineisto kerättiin tutkimuksen aikana suoritetuista kenttätesteistä ja -kokeesta sekä demosta. Aineisto sisältää kuva- ja videomateriaalia sekä tutkijan kirjalliset muistiinpanot järjestelmän rakenteiden kestävydestä ja toimivuudesta tehdyistä havainnoista.

Tutkimuksessa havaittiin kehitysmallin soveltuvan tämän tason järjestelmän kehittämiseen. Laykka-AMPGV onnistui täyttämään 83 % välttämättömistä (minimitavoite 50 %) ja 62 % kaikista suorituskykyvaatimuksista. Maastoliikkuvuusmallinlaskuista saadut tulokset osoittautuivat täsmällisiksi kenttäteissä tehtyjen havaintojen perusteella.

### AVAINSANAT

miehittämätön, maastoajoneuvo, UGV, Laykka, AMPGV, kenttäkoe, kenttätesti, inkrementaalinen, kehitys, kauko-ohjattu, robotti, ase, maastoliikkuvuus

# SISÄLLYS

<b>1</b>	<b>JOHDANTO.....</b>	<b>1</b>
1.1	TUTKIMUKSEN TAUSTA.....	3
1.2	TAVOITTEET JA TUTKIMUSKYSYMYKSET .....	4
1.3	KONSTRUKTIIVINEN TUTKIMUSPROSESSI.....	5
1.4	TUTKIMUSMENETELMÄT .....	6
1.5	RAJAUKSET.....	9
1.6	AIKAISEMMAT TUTKIMUKSET .....	10
1.7	LAITTEEN TAKTINEN KÄYTTÖ JA SUUNNITTELU.....	14
<b>2</b>	<b>MENETELMÄT .....</b>	<b>17</b>
2.1	LAYKKAN RUNKOVERSION VALINTA TUTKIMUKSEEN.....	17
2.2	TIEDONKERUU JA LÄHTEET.....	17
2.3	KENTTÄTESTIEN JA KENTTÄKOEEN TOTEUTUS .....	18
2.4	ANALYSOINTIMENETELMÄT SEKÄ LUOTETTAVUUSTARKASTELU .....	18
2.5	INKREMENTAALINEN KEHITTÄMINEN .....	19
2.6	TEKNOLOGIAN VALMIUSASTE TRL-ASTEIKOLLA .....	21
<b>3</b>	<b>LAYKKA-AMPGV:N INKREMENTAALINEN KEHITYS.....</b>	<b>23</b>
3.1	LAYKKAN TRL-TASO .....	23
3.2	PROJEKTIN KOKONAISAIKATAULU .....	23
3.3	RUNGON KEHITYMINEN .....	25
3.3.1	Runkoversioon X.2 siirtyminen.....	26
3.3.2	Runkoversioon X.3 siirtyminen.....	27
3.4	RUNGON ELEKTRONIIKKA.....	27
3.4.1	Servot, sähkömoottorit, suoraohjausmoottori.....	28
3.4.2	Virtalähteet .....	30
3.4.3	Kamerat .....	31
3.4.4	Moottoriohjausyksiköt.....	32
3.4.5	Tietokone ja muut sähkölaitteet.....	34
3.4.6	Uudet kytkentäratkaisut.....	35
3.5	OPERAATTORIN PÄÄTELAITE JA OHJAIN.....	35
3.6	YHTEENVETO LAYKKA X.1-X.3 LAYKKAN RUNKOMALLIEN EROISTA .....	37
<b>4</b>	<b>MAASTOLIKKUVUUSKYVYKKYYDEN LASKEMEMINEN SEKÄ MALLINTAMINEN .....</b>	<b>38</b>
4.1	MAASTOLIKKUVUUDEN MALLINTAMINEN .....	38
4.1.1	Pyörän pyörimistä vastustavat voimat.....	39
4.1.2	Järjestelmän kulkukyky maastossa.....	42
4.2	MMP JA CI <sub>L</sub> -MALLI .....	45
<b>5</b>	<b>TESTIASETTELU .....</b>	<b>49</b>
5.1	8-RATA .....	49
5.2	KENTTÄKOEEN ASETTELU .....	52
5.3	AGLILITY-RATA .....	52
5.4	AMPUMINEN .....	53
<b>6</b>	<b>KENTTÄTESTIEN JA -KOEEN TULOKSET.....</b>	<b>55</b>
6.1	KENTTÄTESTI 1 22.11.2020.....	56
6.2	KENTTÄKOE 8.12.2020.....	58
6.3	KENTTÄTESTI 2 3.4.2021 .....	59
6.4	KENTTÄTESTI 3 23.07.2021 .....	61
6.5	PANSsarIMUSEO DEMONSTRAATIO 18.10.2021.....	64
6.6	TESTEISSÄ JA KOEISSA VAHVISTETTU MAASTOLIKKUVUUSKYKY .....	65
<b>7</b>	<b>POHDINTA.....</b>	<b>66</b>
7.1	OBJEktiivisuus .....	66
7.2	TULOSTEN UUTUUSARVO JA HYÖDYNNETTÄVYYS.....	67
7.3	JATKOTUTKIMUSAIHEET JA TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT .....	68
7.4	SEURAAVA LAYKKA-AMPGV VERSIO .....	69
<b>8</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET.....</b>	<b>70</b>
	LÄHTEET .....	73

**LIIKTEET****LAYKKA KYVYKKYYSVAATIMUKSET****LAYKKA TEKNISET SPESIFIKAATIOT****KENTTÄTESTI 1, SUNNUNTAI 22.11.2020****UGV-LAYKKAN KENTTÄKOERAPORTTI 8.12.2020****KYSELY****KENTTÄTESTI 2, LAUANTAI 03.04.2021****KENTTÄTESTI 3, PERJANTAI 23.07.2021**

## KUVALUETTELO

KUVA 1. URAN-9 ON VENÄJÄN ASEVOIMIEN HYVÄKSYMÄ TAISTELUUN TARKOITETTU UGV. [1] .....	2
KUVA 2. VASEMMALLA ETUALALLA LAYKKA X.1 OIKEALLA RUNKOVERSIO X.3 .....	4
KUVA 3. KONSTRUKTIIVINEN PROSESSI JA KYSEISEN TUTKIMUSTYÖNVAIHE OSANA PROSESSIA OJASALOA MUKAILEN .....	6
KUVA 4. GOLIATH SDKFZ 302 [7].....	11
KUVA 5. HEIDAR-1 [8].....	12
KUVA 6. MINI CRUSHER JA TAUSTALLA CRUSHER [9] .....	13
KUVA 7. PV:N KÄYTÖSSÄ OLEVAT RAIVAUSROBOTIT TEODOR JA IROBOT 510 [13] [14].....	14
KUVA 8. INKREMENTAALINEN KEHITYS JA ETENEMINEN OSANA LAYKKA.....	20
KUVA 9. MOOTTORI MY1016Z3 [20].....	29
KUVA 10. DS322MG-SERVO [21].....	29
KUVA 11. BBB JA EXIDE 12V AGM -AKUT [22] [23].....	30
KUVA 12. IR-KAMERA MALLIA ELP 720P H.264 USB [24].....	31
KUVA 13. DIABLO 55A & SABERTOOTH 2X32A [25] [26] .....	32
KUVA 14. LAYKKAN VIIMEISIN LAITTEIDEN KYTKENTÄRATKAISU ROBOTIN PÄÄSSÄ .....	35
KUVA 15. YLEISKUVA OPERAATTORIN PÄÄTELAITTEEN KYTKENTÄRATKAISUSTA .....	36
KUVA 16. PITKITTÄINEN 8-RATA ASETELMA. ....	50
KUVA 17. POIKITTAINEN 8-RATA TESTIASETELMA. ....	51
KUVA 18. AGILITY RATA ROBOTTIEN KETTERYYS TESTAUSTA JA HENKILÖSTÖN KOULUTUSTA VARTEN. ....	53
KUVA 19. KETJUNKIRISTIN MALLIA 3, 3D-TULOSTETTU PLASTA SEKÄ RULLAT NYLONISTA.....	60
KUVA 20. LAYKKA X.3 VAANIMASSA OJASTA BMP-1 VAUNUA SEKÄ NOUSEMASSA MÄKEÄ YLÖS. ....	64

## TAULUKKOLUETTELO

TAULUKKO 1. LAYKKAN INKREMENTAALINEN KEHITYS.....	21
TAULUKKO 2. TRL TASOT MUKAILLEN NASA:N JA GOLDENSEN ESITYKSIÄ TRL TASEISTA [18] [19] .....	22
TAULUKKO 3. LAYKKA-PROJEKTIN GANTT-TAULUKKO PROJEKTIN JA SEN VAIHEIDEN KESTOSTA.....	24
TAULUKKO 4. LAYKKA RUNKOJEN ERO SEKÄ KEHITYS.....	37
TAULUKKO 5. PYÖRÄN SUORITUSKYKY KERTOIMET. [27] .....	43
TAULUKKO 6. LAYKKAN ARVOJA MAASTOLIKKUVUUDEN OSALTA. ....	45
TAULUKKO 7. LIIKKUMISKYKY ARVOJA. [30].....	46
TAULUKKO 8. MAAN KESTÄVYYSLUOKITUKSET. [31] .....	46
TAULUKKO 9. VAADITTU MMP ARVO KPA TANKKI OHJAUKSELLE ERI MAAPERÄ TYYPEILLÄ. [32] [33] .....	46

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

ABS	Acrylonitriilibutadieenistyreeni
AGM	Absorbent glass mat, imeytetty lasivillamatto
AMPGV	Autonomous Multi Purpose Ground Vehicle, autonominen monikäyttöinen maastoajoneuvo
CAD	Computer aided design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CBRN	Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, Kemikaali, biologinen, säteilevä ja radioaktiivinen
CIL	Limiting Cone Index, rajoittava kartio indeksi
DARPPA	Defence Advanced Research Project Agency, Yhdysvaltojen asevoimien tutkimisorganisaatio
EPO	Emergency Power Off, hätä seis
GB	Gigabitti
HD	High Definition, suuri tarkkuus
IMU	Inertial Measurment Unit, kiihdytys ja asentoanturi
IR	Infra red, infrapuna
ISO	International Organization of Standardization, kansainvälinen standardisoimisjärjestö
I2C	Inter-Integrated Circuit, kaksisuuntainen ohjaus- ja tiedonsiirtoväylä
JAMK	Jyväskylän ammattikorkeakoulu
KES	Kevyt kertasinko
LIDAR	Light detection and ranging, valotutka
LiFePO4	Litium-rautafosfaati
MMP	Mean Maximum Pressure, maksimi keskipaine
MPKK	Maanpuolustuskorkeakoulu
NREC	National Robotic Engineering Center, Yhdysvaltojen kansallinen robotiikan suunnittelu keskus
PLA	Polylaktidi
PV	Puolustus voimat
PVAH	Puolustusvoimien asianhallintajärjestelmä
PVLOGL	Puolustusvoimien logistiikkalaitos
RK	Rynnäkkökivääri
Rpi	RaspberryPi
SM	Sotatieteidenmaisteri
STANAG	Standardisation Agreement, vakiointisopimus

TRL	Technology Readiness Levels, Teknologian valmiusaste
TTY	Tampereen Teknillinen Yliopisto
UGV	Unmanned Ground Vehicle, miehittämätön maastoajoneuvo
USB	Universal serial bus, sarjaväyläarkitehtuuri
VBS	Virtual Battle space, virtuaalinen taistelu tila
wi-fi	Wireless Fidelity, langaton lähiverkko
A	Ampeeri; luvussa 4: renkaan kosketuspinta-ala (m <sup>2</sup> )
a	Kiihtyvyys (m/s <sup>2</sup> )
Ah	Ampeeritunti
b	Koneen leveys (m)
C	Maan koheesio (kPa)
cm	Senttimetri
COS	Kosini
d	Renkaiden halkaisija (m)
F	Voima (N)
F <sub>G</sub>	Rinnevastus (N)
F <sub>H</sub>	Estevastus (N)
F <sub>net</sub>	Nettovoima (kN)
F <sub>T</sub>	Kulkuvastus (N)
F <sup>^</sup>	Hitausvastus (N)
h	Korkeus (m); luvussa 4 kumin paksuus (m)
k <sub>l</sub>	Akselien lukumäärä vakio
kg	Kilo
kN	Kilo Newton
kPa	Kilo Pascal
kW	Kilo Watti
L	Kuorman paino (kN)
l	Koneen pituus (m)
lbs	Pound, pauna
m	Metri; luvussa 4 koneen kokonaismassa (kg)
mm	Millimetri
N	Newton; luvussa 4 esteiden lukumäärä (kpl/m <sup>2</sup> )
Nm	Newton metri
P	Teho (kW)
r	Pyörän säde (m)



S	Rinnekaltevuus (%)
SIN	Sini
T	Tartuna (N)
TAN	Tangentti
V	Voltti
v	Kulmanopeus (m/s)
W	Watti; luvussa 4 pyöräkuorma (N), ja koneen paino (kN) kaavoissa (1.12) ja (1.14)
$W_{Tw}$	Ajoneuvon paino (kN)
z	Renkaan painauma (m)
$\alpha$	rinnekaltevuus ( $^{\circ}$ )
$\mu_G$	Rinnevastuskerroin
$\mu_R$	Vierintävastuskerroin
$\mu_T$	Tartuntakerroin
$\delta$	Renkaan litistymä (m)
$\sigma$	Renkaan painauma kovalla maaperällä (m)
$\phi$	maan sisäinen kitkakulma
%	Prosentti

## 1 JOHDANTO

Nykypäivän taistelukenttä on kehittymässä teknisemmäksi ja nopeatempoisemmaksi. Moninaiset teknologiat mahdollistavat erilaisten asejärjestelmien tehokkaamman käytön ja luovat uusia käyttösovellutuksia olemassa oleville järjestelmille. Sotilaallisessa toiminnassa robotiikan ja tekoälyn avulla on mahdollista vapauttaa sekä ihmis- että henkilöstöresursseja ja tehostaa niiden käyttöä. Uudet läpilyönnit materiaalitekniikassa tuovat uusia rakenteellisia elementtejä taistelukentälle. Esimerkiksi kehitys on merkittävää miehittämättömissä järjestelmissä ja varsinkin niiden tekoälyssä.

Voidaan kysyä, kuinka arvokkaana ihmishenkeä voidaan pitää? Onko se mitattavissa sotilaan saadun koulutuksen määrällä ja rahalla tai mitä henkilö on maksanut yhteiskunnalle vai onko henkilön arvo mitattavissa jollakin muulla eettisellä tavalla? Vaikka tämän työn tarkoitus ei ole kartoittaa ihmishengen arvokkuutta, voidaan siitä olla silti samaa mieltä, että nykypäivän arvoihin peilaten, varsinkin länsimaisessa kulttuurissa ihmishenkeä pidetään äärimmäisen arvokkaana. Tästä johtuen, monen eri maan asevoimat ovatkin pyrkineet kehittämään erinäisiä miehittämättömiä järjestelmiä sotakäyttöön, joilla voidaan suojata omia sotilaita ja tehostaa omaa sotilaallista toimintaa.

Miehittämättömien järjestelmien käytöllä on tarkoitus tuottaa edelleen tarvittava tulivoima tai tiedustelutieto ilman, että järjestelmää käyttävät henkilöt olisivat suoranaissessa vaarassa tai uhkatilanteessa. Etäisyys ja näkösuoja tarjoavat yhden parhaimmista suojista kineettiseltä vaikutukselta (suoja aseelliselta vaikutukselta), jolta pyritään suojautumaan monin eri keinoin. Teknologian ripeä kehitys elektroniikan ja ohjelmoinnin puolella on mahdollistanut, että erinäisten elektroniikka komponenttien hinnat, saatavuus ja tekniset ominaisuudet ovat kehittyneet sille tasolle, jotta nykyään on mahdollista aloittaa kehittämään miehittämättömiä maa-ajoneuvoja sotilaskäyttöönkin (UGV- Unmanned Ground Vehicle).

Miehittämättömissä maa-ajoneuvoissa on vuosien aikana ollut haasteena saada toimivat yhteydet robotin ja operaattorin välille. Lisäksi luoda järjestelmä, joka olisi tarpeeksi robusti sietämään taistelukentän sille tuottamat haasteet. Katvealueet, suuren datamäärän reaaliaikainen siirtäminen ja yhteyksien ylläpitäminen ovat haitanneet erityisesti maassa toimivien järjestelmien toimintaa. Tekniikan kehitys on tuonut tähänkin paljon uusia ratkaisuja, kuten televerkot ja langattomat internet-yhteydet. Samaten tekoälyjen kehitys on mahdollistanut entistä automatisoitujen järjestelmien käytön. Ohjelmistojen kehitys mahdollista entistä paremmat teknisten

resurssien käytön järjestelmässä. Suurvallat kuten Yhdysvallat ja Venäjä, ovat varsinkin panostaneet UGV kehitykseen. Varsinkin jälkimmäinen on myös hyväksynyt muutamia UGV-malleja osaksi virallista taistelukulustoa, kuten esimerkiksi URAN-9, joka on esitetty kuvassa 1 [1].



Kuva 1. URAN-9 on Venäjän asevoimien hyväksymä taisteluun tarkoitettu UGV. [1]

Laykka, joka on miehittämätön panssaritorjunta- ja tiedusteluajoneuvo, on saanut inspiraationsa Neuvostoliiton toisessa maailmansodassa käyttämästä miinakoirinakin tunnetuista panssaritorjuntakoirista. Koirilla pyrittiin saamaan panssarivaunuun merkittävä aseellinen vaikutus sen heikompaan kohtaan eli pohjaan. Vaikka idea oli varsin hyvä, toteutus kärsi biologisen järjestelmän heikkouksista. Koirien kuljettamat räjähteet saattoivat lauetta väärässä paikassa, sillä koirat eivät osanneet erotella omia vaunuja vihollisten vaunuista tai vaunuista lähtevä melu säikäytti koiria juoksemaan takaisin isäntiensä luo. Samalla on vähintäänkin moraalisesti kyseenalaista käyttää eläimiä tällä tavalla. [2] Tästä huolimatta konsepti on varsin nerokas, ja kenties silloin aikaansa edellä. Nykypäivänä koirat voidaan helposti korvata tehtävässä mekaanisella laitteella, kuten robotilla. Kun robottiin lisätään tekoäly, voidaan saada merkittävästi tehokkaampi, korvattava ja ennakoitavampi järjestelmä.

Laykka-AMPGV (Autonomous Multi Purpose Ground Vehicle) on suunniteltu panssaritorjunta- ja tiedustelukykyjen parantamista varten. Tavoitteena oli luoda sellainen järjestelmä, joka olisi uhrattavissa, halpa, yksinkertainen, modulaarinen ja helppokäyttöinen. Vaikka vastaavan tyyppisiä laitteita on kehitetty, toimintakonseptit tai suunnitteluratkaisut eivät ole va-

kiintuneet, vaan sotilasalalla kehitetään mitä erinäisempiä UGV-malleja ja -tyyppjä. Kyseisistä UGV:stä ei löydy tarkkoja teknisiä tietoja, miten järjestelmät käytännössä toimivat ja mitä puutteita niissä saattaa olla. Tietysti asioita voi päätellä ja tuottaa valistuneita arvauksia, mutta se tieto ei ole aivan eksaktia. Näistä syistä Laykka on Suomen olosuhteisiin ja tarpeisiin suunniteltu itsenäinen ratkaisunsa.

Tutkimustyön päätarkoituksena on testata Laykka-AMPGV -projektin konseptin toimivuus käytännössä sekä Laykkan demonstraattorin kehittäminen. Lisätavoitteena on tuottaa tietoa vastaavien järjestelmien mahdollisista haasteista ja toiminnallisuuksista yleisellä tasolla, koska tiedon saatavuus aiheesta on heikkoa. Suomen Puolustusvoimilla on EOD-raivausrobotteja, mutta panssarintorjuntaan, tiedostelutoimintaan tai muuhun tukitoimintaan suunniteltuja robotteja ei vielä ole.

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Tutkimus on jatkoa Christian Anderssonin diplomityölle, joka tehtiin silloiselle Tampereen teknilliselle yliopistolle (TTY) vuonna 2018 [3]. Diplomityössä luotiin piirustukset, laitelista, mitoituslaskut ja mallinnukset, sekä muodostettiin alustavat vaatimukset kehitystyön aloittamisen mahdollistamiseksi. Vaatimusten laadintaa varten etsittiin ja haastateltiin Puolustusvoimien henkilökunnan jäseniä, joilla oli kenttätietoa siitä, mistä laitteen pitäisi kyetä suoriutumaan. Viralliset vaatimukset voidaan luoda vain viralliselle hankkeelle tai sen alaprojekteille. Näin ollen luodut vaatimukset ohjaavat kehitystyötä alustavasti Puolustusvoimien tarpeiden mukaisesti.

Diplomityössä suoritettiin tarvittavat laskutoimitukset, joilla voitiin mitoittaa laitteen komponentit ja suorituskyky maastossa ja tiellä. Mitoituslaskujen jälkeen laadittiin piirustukset ja CAD-mallit (Computer aided design). CAD-mallien pohjalta suoritettiin Matlab-ohjelmalla simulaatiot, joilla arvioitiin rakenteiden kestävyys ja laitteen yleinen toimintakyky. Simulaatioiden pohjalta tehtiin tarvittavat muutokset rakenteisiin ja piirustuksiin. Diplomityön pohjalta rakennettiin ensimmäinen demonstraattori tehtyjen laskujen ja hinta-arvioitten puitteissa.

Laykkan kehitysprosessi jakautuu kirjoittajan usealle lopputyölle. Diplomityön ja tämän sotatieteen Pro Gradun lisäksi kehitystyötä jatketaan kirjoittajan kahdessa aloitetussa väitöskirjatutkimuksessa. Tässä Pro Gradussa oli alun perin tarkoitus todistaa ”proof of concept” -diplomityössä tehtyjen suunnitelmien perusteella rakennetulla demonstraattorilla. Tämä testaus kui-

tenkin tehtiin jo ennen maisteriopintoja alkua. Löydettyjen kehitystarpeiden pohjalta suunniteltiin toinen runkoversio, joka rakennettiin ja jatkokehitettiin tämän työn puitteissa. Rinnakkaisessa väitöskirjatutkimuksessa kehitetään muun muassa laitetta ohjaava tekoäly.

Laykkasta laadittiin ensimmäiset simulaatiot ja piirrokset Anderssonin diplomityössä vuonna 2018, jossa määriteltiin konseptin alkuvaiheet, alustavat vaatimukset sekä toteutustavat. Sen pohjalta rakennettiin ensimmäinen demonstraattori Laykka X.1, josta kehitettiin Laykka X.2 -runkoversio tässä tutkimuksessa käytettäväksi. Kuvassa 2 on esitetty Laykka X.1 ja X.3 -runkoversiot, joista jälkimmäinen on tutkimuksen päättyessä kehittynein versio.



Kuva 2. Vasemmalla etualalla Laykka X.1 oikealla runkoversio X.3

## 1.2 Tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tässä tutkimustyössä halutaan selvittää pääasiassa laitteen mekaaniset kyvykkyydet ja miten laite suoriutuu testeissä ja kenttäkokeissa. Ohjaavana tekijänä toimivat robotille asetetut kyvykkyyksivaatimukset sekä tekniset spesifikaatiot, joiden täyttymisen varmistamiseksi suoritetaan testejä ja kokeita. Kyseiset vaatimukset ja spesifikaatiot on esitetty liitteissä 1 & 2. Suoritettujen testien ja kokeiden perusteella voidaan joko parantaa Laykkaa ja sen rakenteita tai muokata robotille asetettuja vaatimuksia. Johtuen projektin monivaiheisuudesta ja monipuolisuudesta tullaan tutkimustyötä jatkamaan ja jakamaan useampaan osa-alueeseen. Projektin aikana tutkimustyötä tullaan tekemään myös laitteen tekoälyn saralla, mutta tekoälyjen ja niiden yhdistämistä, kehittämistä, opettamista ja jalostamista ei käsitellä tässä työssä vaan kirjoittajan väitöskirjassa.

Päätutkimuskysymyksenä on: Kuinka monta tämän hetkistä suorituskykyyn kohdistuvaa ehdotonta vaatimuskohtaa Laykkan runkoversio X.2 tai kehittynein versio rungosta kykenee täyttämään?

Hypoteesi: Laykka runkoversio X.2 tai kehittyneempi versio kykenee täyttämään ainakin 50 %

ehdottomista vaatimuksista. Todennäköisesti laite suoriutuu mekaanisesti käytännön sovelluksiin riittävällä tasolla, mutta ohjelmallisia ongelmia voi ilmetä.

Tutkimusta tukeva kysymys on: Kuinka monta tämän hetkistä suorituskykyyn kohdistuvaa muista vaatimuskohdista Laykka runkoversio X.2 tai kehittynein versio rungosta kykenee täyttämään?

Hypoteesi: Laykka runkoversio X.2 tai kehittynein versio rungosta kykenee täyttämään muista vaatimuksista ainakin 10 %.

Lisäkysymyksiä:

- Kestävätkö robotin rakenteet pienkaliiberiseen aseeseen sarjatulesta aiheutuvan rasituksen?
- Kestävätkö robotin rakenteet suunnitellut kantamukset?
- Halutaan selvittää miten hyvin robotin runko kestää yleiset rasitukset ampuma-aseesta ja suunnitellusta kantamuksesta ajon aikana.
- Mikä on Laykka runkoversio X.2:n tai kehittyneimmän runkoversion maastoliikkumiskyky?
- Miten inkrementaalinen kehitysmalli soveltuu robottijärjestelmän kehittämiseen?

Jos laite läpäisee 50 % ehdottomista vaatimuksista ja 10 % muista vaatimuksista, konsepti on toimiva ja voidaan siirtyä kehitystyössä seuraavalle teknologian valmiusasteelle. Jos laite ei täytä riittäviä vaatimuksia, korjataan havaitut virheet ja suoritetaan testit uudestaan. Ehdottomille vaatimuksille valittu 50 % suoritusvaatimus on valittu projektihallinnollista syistä, jotta koko projekti voidaan ajoittaa mahdollisimman nopeaksi. Tekoälyn kehitys vaatii arviolta pisimmän aikajakson, mutta riittävän mekaanisen toimintakyvyn saavuttaminen on välttämätön tekoälyn testaamiselle. Samanaikaisesti tekoälyn kehittämisen kanssa voidaan puolestaan korjata ohjelmallisia puutteita.

Vaikka asetettujen vaatimusten pohjalta halutaan ensisijaisesti selvittää ja testata konseptin toimivuutta, varmennetaan samalla sille asetettujen vaatimusten tarkkuutta, yksiselitteisyyttä ja tarkoituksenmukaisuutta. Työssä ei kuitenkaan tulla laatimaan uusia vaatimuksia tai tarkentamaan niitä.

### 1.3 Konstruktiivinen tutkimusprosessi

Kenttätutkimus on empiirisen tutkimuksen menetelmä, joka tarkoittaa luonnollisissa olosuhteissa tehtyä havaintoaineistoa keräämistä, esim. mittauksin, näytteitä ottamalla, tarkkailulla,

tai kun tutkimuksen kohteena ovat ihmiset, haastatteluilla, vuorovaikutuksilla ja kyselyillä. Menetelmä on käytössä kaikilla empiirisen tutkimuksen aloilla kuten myös teknistieteissä. [4]

Konstruktivisessa tutkimuksessa pyritään hyvin käytännönläheiseen ongelmanratkaisuun luomalla uusi rakenne tai rakennelma, jonka luomiseksi tarvitaan kuitenkin teoreettista ja uutta käytännöstä kerättyä (empiiristä) tietoa. [5] Se soveltuu lähestymistavaksi, jos kehittämistehtävänä on luoda jonkinlainen konkreettinen tuotos tai esim. suunnitelma, mittari tai malli. [5]

Konstruktivisen tutkimuksen tarkoituksena on saada käytännön ongelmaan uudenlainen ja teoreettisesti perusteltu ratkaisu, joka tuo myös tiedeyhteisöön uutta tietoa. Konstruktivisessa tutkimuksessa on oleellista sitoa käytännön ongelma ja sen ratkaisu teoreettiseen tietoon, ja tämän lisäksi ratkaisun on osoitettava toimivaksi. [5] Taustavaikuttaksi voidaan monesti mieltää pragmaattinen tai käytännöllinen totuuskäsitys, jossa taustateorian totuus vahvistuu sen pohjalta toteutettujen ratkaisujen toimiessa. [5]

Konstruktivisen tutkimuksen prosessi on esitetty kuvassa 3, johon on kuvattu tutkimusmetodin liityntä pinta ja tämänhetkisen tutkimuksen tila. Prosessissa erityisesti ratkaisun laatiminen vaatii teoreettisia perusteluita. Koska konstruktivinen tutkimus perustuu myös uusiin ideoihin ja innovointiin, uutta ideaa kannattaa testata mahdollisin esikokein ennen varsinaista testaamista [5]. Tutkimus ja prosessi on hyvinkin pitkä, jolloin se vaatii kohdeorganisaatiolta ja kehittäjältä/tutkijalta sitoutumista ja pitkäjänteisyyttä [5]. Prosessin kautta tuotetun tuotos on arvioitava käytännössä testaamalla joko markkinoilla tai organisaation sisällä [5].



Kuva 3. Konstruktivinen prosessi ja kyseisen tutkimustyönvaihe osana prosessia Ojasaloa mukailen

#### 1.4 Tutkimusmenetelmät

Johtuen prosessin vaiheesta ja työn luonteeseen soveltuvamaksi metodeiksi valikoituvat kenttätestaus ja kenttäkoe. Jorma Jormakka kysyy tekniset tutkimusmenetelmät Maanpuolustusko-reakoululla kirjassa, että onko testaus tutkimusta, vaikka se onkin oleellinen osa uuden tuotteen kehitystä. Tähän hän toteaa, että kysymys herää siitä johtuen, että testausta ei useinkaan

mainita tutkimusmenetelmänä. Hän myös näkee, että tekniikan tutkimus on tuotekehitystä ja testaus on tekniikan tutkimusta ainakin silloin, kun kyseessä on uuden tai paremman menetelmän, järjestelmän tai laitteen kehittäminen [6]. Koska Laykkan testit ovat osa uuden laitteen kehitystä, voidaan näin ollen tätä työtä pitää teknisenä tutkimuksena.

Testauksella tarkoitetaan virheiden määrätietoista etsimistä, joka on oleellinen osa uuden laitteen luomiseen liittyvää kehitystyötä. Tässä yhteydessä eritellään virhe ja vika erillisiksi asioiksi. Kun puhutaan testauksella löydetyistä virheistä, tarkoitetaan rakeenteelista ominaisuutta, joka ei ilmaannu eikä katoa itsestään. Viialla puolestaan tarkoitetaan laitteen vikaantumisen seurauksena syntyneitä poikkeamia. On huomioitava, että laitteelle ja sen osille voidaan laskea vikatodennäköisyys ja vikojen välille jäävä keskimääräinen aika. [6]

Testauksessa voidaan käyttää montaa eri testaustyyppiä samanaikaisesti. Tässä tutkimuksessa on kolme eri testaustyyppiä käytössä, jotta kyetään todentamaan laitteen toiminta ja vastaamaan tutkimuskysymyksiin. Keskeisin näistä testaustyypeistä on järjestelmätestaus (eli systeemitestaus), joka tarkoittaa koko järjestelmän testausta. Tutkimusta ja järjestelmätestausta tukee regressiotestaus, jolla testataan miten Laykka-järjestelmä toimii. Kolmantena testaustyyppinä halutaan suorittaa kuormitus/stressitesti, jolla mitataan minkälaisen kuorman ja rasitteen uusin laitteen versio kestää [6]. Nämä kaksi jälkimmäistä testaustyyppiä tukevat kokonaisjärjestelmän testausta, jakamalla sen pienempiin halittavimpiin osiin. Moduulitestausta, eli yksikkötestausta, ei suoriteta tämän työn piirin sisällä, sillä moduulien ja kunkin erillisen osan toiminnan testausta erikseen on tehty, kun laitetta on rakennettu, jokaisen pienvaiheen yhteydessä [6].

Kenttäkokeet ovat tärkeä osa organisaatiolle hankittavan materiaalin testausta. Ennen erityisesti sotavarustukseksi hyväksymistä hankittavalle tai hankitulle materiaalille suoritetaan kenttäkokeilut, testi ja soveltuvuuden tutkimus. Kenttäkokeet ovat osa tuotteen testausta. Ensinäkin kenttäkokeilla osaltaan tarkistetaan se, että tuote täyttää käyttäjän vaatimukset. Toisaalta kenttäkokeiden perusteella voidaan käyttäjän vaatimuksia muuttaa tai tuotetta kehittää. [6]

Kenttäkokeet voivat liittyä kehittämishankkeisiin, joissa kenttäkokeet palvelevat teollisuutta järjestelmien ergonomian, kestävyiden ja suorituskyvyn kehittämisessä. Kenttäkokeet voivat myös liittyä evaluointihankkeisiin, joissa kilpailutetaan valmiita järjestelmiä. Tässä työssä kenttäkoe liittyykin laitteen kehittämisprosessiin. Kenttäkokeet ovatkin äärimmäisen tärkeitä hankkeiden ja projektien osia, sillä järjestelmien käytettävyydellä taistelutilanteessa on ratkaiseva merkitys. [6]



Kenttätestauksissa ja kenttäkokeissa käytetään havainnointia toimintojen tarkasteluun. Havainnointi on mahdollista käyttää myös, kun kehittämiskohteena ovat esineet ja laitteet. Havainnoinnin avulla tutkija kykenee selvittämään miten laite tai esine toimii sen todellisessa ympäristössä. Havainnoimalla selvitetään, mitä kohde tekee, miten sitä käytetään tai mitä siinä tapahtuu. Menetelmä mahdollistaa lisäksi välittömän suhteen luomisen tutkittavaan kohteeseen luonnollisissa oloissa. [5]

Tämän tutkimuksen osalta on oleellista todentaa ja dokumentoida laitteen senhetkinen toimintakyky ja selvittää mahdollisesti kokeiden aikana ilmenevien ongelmien syyt. Havaintojen perusteella tehdään päätös vaatimuksen täyttymistä. Päätöksenteossa auttaa sellainen testaus ja sellaiset kenttäkokeiden järjestelyt, jotka ohjaavat päätöksentekoa binääriseen suuntaan, eli toteutuiko vai eikö jokin vaatimus. Ongelmana testauksessa tulee, ettei testausta ole useimmissa kehitysmenetelmissä kuvattu lainkaan. Siksi selkeää ja yleiskattavaa pohjaa tai ohjeistusta testauksen dokumentoinnin laatimiselle ei ole. [6]

Sotateknisessä kontekstissa kenttätestin ja -kokeen välinen ero voi vaikuttaa hiuksenhienolta ja monesti niitä käytetäänkin virheellisesti rinnasteisina termeinä. Kenttätesteissä vallitsevat luonnolliset olosuhteet, joissa tutkija voi olla tarkkailijana tai osallistujana. Tällöin pyritään keräämään monipuolista aineistoa, eikä välttämättä niinkään tarkkoja tuloksia. Saaduilla tuloksilla kehitetään tai parannetaan esimerkiksi laitetta tai testattua osa-aluetta tai haetaan mahdollisia virheitä mitä ei osattu suunnittelussa huomioida. Toteutettavien testien määrä on testaavan tahon resurssien ja tarpeen mukaisesti määrättävissä.

Kenttäkoe sisältää samoja elementtejä kuin kenttätesti, mutta suurena erona siihen on kokeen absoluuttisuus. Kenttäkokeen aikana voidaan samanlailla kerätä dataa ja aineistoa, mutta kenttäkokeelle on suunniteltu kenttätestejä tarkemmat premissit. Lisäksi kenttäkokeessa tutkittavan laitteen on läpäistävä tietyt sille asetetut vaatimukset. Läpäistyjen vaatimusten perusteella laite voi esimerkiksi voittaa kilpailutuksen tai tulla hyväksytyksi käyttöön. Kokeella on huomattavasti painavimmat seuraamukset kuin testissä. Testiä voidaan myös käyttää esivalmisteluna koetta varten, sillä kokeita järjestetään usein vain rajattu määrä.

Osana kehitystyötä on hyvä kerätä ulkopuolisilta palautetta ja havaintoja kyselyn muodossa. Kyselyn avulla voi parantaa toimintaa tai löytää kohtia, joihin kehittäjätahto ei välttämättä itse olisi kiinnittänyt huomiota [5]. Kyselyn avulla voidaan kerätä laajasti tietoa nopeasti suurelta määrältä ihmisiä [5]. Kysely myös edesauttaa hahmottamaan vaatimuksien tarkkuutta sekä tar-

vittaessa tarvetta muokata niitä. Kysely suoritetaan lomakkeella, joka sisältää avoimia kysymyksiä ja on rakenteeltaan puoliavoin. Lomake on esitetty liitteessä 5.

Kysely toteutettiin puoliavoimena, ja se suoritettiin sanallisen, laadullisen tiedon keräämiseksi. Valinta tehtiin sillä perusteella, että sanallistettujen huomioiden katsotaan tämän tutkimuksen kontekstissa olevan numeraalisia arvioita tärkeämpiä. Kehitystyön osana on suositeltavaa käyttää monenlaisia menetelmiä ja joskus jopa sellaisia menetelmiä, joita ei yleensä käytetä kovien tieteenalojen tutkimuksissa [5]. Tutkija voi toimia hyvin lähellä tutkittavia ja usein osallistuu toimintaan [5].

Tässä tutkimuksessa kyselyllä pyrittiin kehitystyön tueksi keräämään tietoa Laykka-järjestelmästä uuden käyttäjän näkökulmasta sekä kyseisen laitteen ja ihmisen yhteistoiminnasta [5]. Kysely suoritettiin osana kenttäkoetta ja siihen vastasivat kyseiseen kenttäkokeeseen osallistuneet MPKK:n sotatieteiden maisterikurssin 10 (SM10) opiskelijat henkilöt. Tutkija laati kyselyn, eikä itse osallistunut sen vastaamiseen. SM10-opiskelijat valikoituvat vastaamaan kyselyyn, sillä heidän ammattiosaamisena on merkityksellisetä järjestelmän kehityksen ohjaamisessa oikeansuuntaiseksi sekä tunnistamaan olennaisia puutteita ja onnistumisia.

## 1.5 Rajaukset

Testatessa laitetta, sen suorituskyvyn ulottuvuuksia ja ominaisuuksia, voi tutkittavien asioiden määrä olla hyvin laaja. Kuitenkaan käytettävissä oleva aika tai muut resurssit eivät välttämättä mahdollista kaikkien osa-alueitten testausta yhden Pro Gradun puitteissa. Tästä johtuen on välttämätöntä rajata työtä, jotta se palvele parhaiten usealle lopputyölle jakautuvaa tutkimusprosessia.

Tässä tutkimustyössä tarkastellaan Laykkan mekatroniikkaa, eli tarkastellaan robotin mekaaniisia sekä rakenteellisia osia sekä niiden kestävyyttä ja toimivuutta. Laitteen kehitysprosessin sekä kokonaistutkimuksen kannalta on olennaista keskittyä laitteen liikkumiskykyyn vaikuttaviin järjestelmiin, keskittyen erityisesti voimansiirtoon liittyviin osiin. Kaikkiaan robotissa on paljon erinäisiä liikkuvia komponentteja, piirejä, ohjelmistoja ja muita osia, mutta niitä kaikkia ei ole mahdollista tai tarkoituksenmukaista tarkastella yhdellä kerralla. Laykka-järjestelmän runkoversion valinta käsitellään luvussa 2.1.

Maastoliikkuvuuslaskuilla rajoitutaan tarkastelemaan Laykkan maastoliikkuvuuskykyä, kuten

pitoa sekä maastoylityskykyä sellaisilla maaperillä, joita esiintyy Laykkan potentiaalisilla ope-  
rintialueilla Suomessa.

Tutkimuksessa testataan lisäksi rungon ja RK-moduulin (rynnäkkökivääri) kestävyys sekä toi-  
mivuus, jotka vaikuttavat laitteen liikkumiskykyyn. Koska nämä rakenteet ovat sidoksissa kes-  
kenään, on niiden testaaminen syytä toteuttaa samassa yhteydessä. Laitteen moduuleihin kuu-  
luvista lisäosista rajoitutaan testaamaan vain RK-moduulia, siinäkin vain yleisellä tasolla RK-  
moduulin toimivuuden toteutukseksi suhteessa teknisiin spesifikaatioihin ja rakenteellisen kes-  
tävyuden varmentamiseksi. RK-moduulin tarkempia rakenteellisia ominaisuuksia ja toiminalli-  
suuksia ei tarkastella tässä työssä. Muut moduulit, kuten miina-, ase-, KES- ja drone-moduuli,  
testataan jatkotutkimuksissa. Robotti on tarkoitus varustaa vakiona miinamoduulilla (tyhjänä),  
mutta sen toiminnallisuutta ei ole tarkoitus testata tässä tutkimuksessa.

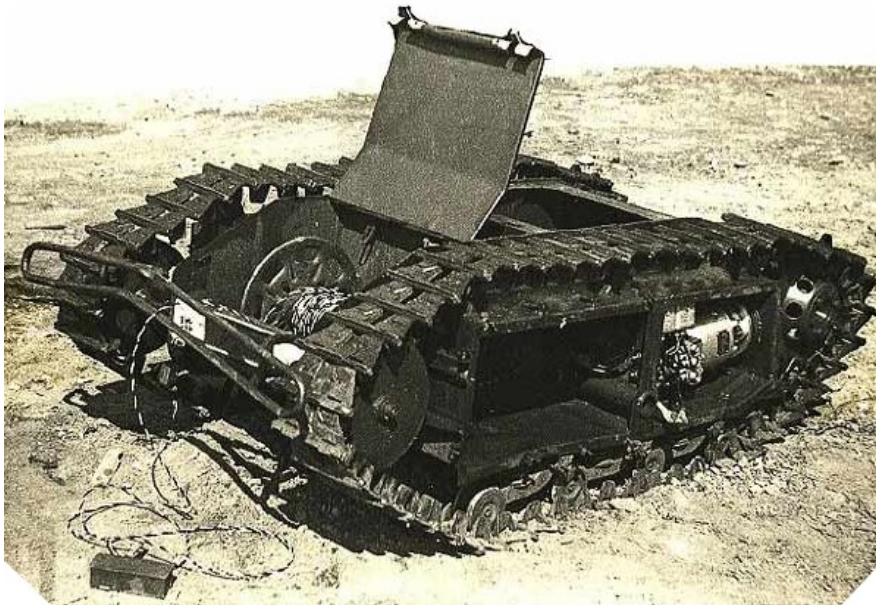
Elektroniikkaa testataan ja käsitellään vain sen yleisen toimivuuden ja yhteensopivuuden osalta.  
Robotin liikkumiseen liittyvä elektroniikka, kuten moottoriohjausyksiköt sekä varsinainen oh-  
jelmistoja suorittava mikropiiri ovat tarkastelun keskiössä. Muut piirit täydentävät järjestelmää  
ja niitä tarkastellaan vain, jos niillä on vaikutusta järjestelmän kokonaistoiminnan kannalta vai-  
kutusta esimerkiksi vikaantumisen johdosta. Ohjelmistoja tarkastellaan vain yleisellä tasolla:  
toimivatko ne vai eivät. Ohjelmistoja korjataan ja parannetaan siinä tapauksessa, että sille on  
tarvetta järjestelmän toiminnan kannalta. Ohjelmistoarkkitehtuuria, ohjelmiston yksityiskoh-  
taista rakennetta tai yksittäisiä koodeja ei kuitenkaan tarkastella tämän työn puitteissa. Testeissä  
ei myöskään tulla tarkastelemaan ohjelmistojen robustiutta.

Robotin taktista käyttöä ei myöskään tulla käsittelemään tämän tutkimuksen puitteissa. Kon-  
septin toimintoja käsitellään luvussa 1.7, jotta lukija ymmärtäisi paremmin valitut testit ja nii-  
den rajauksen konseptin perusteella. Laykkan tarkempia taktisia periaatteita ja toiminnallisuuk-  
sia tullaan käsittelemään tutkijan väitöskirjatutkimuksessa, jossa hyödynnetään muun muassa  
VBS-simulaatioita (Virtual Battle Space) laitteen toiminnan testaamiseksi erilaisissa skena-  
rioissa. Rajaukset on pyritty tekemään niin, että tässä tutkimustyössä keskitytään vahvasti liit-  
teissä 1 ja 2 esitettyihin vaatimusten testaamiseen ja niiden täyttämiseen.

## 1.6 Aikaisemmat tutkimukset

Ensimmäiset tunnetut miehittämättömät ajoneuvot otettiin käyttöön toisen maailmansodan ai-  
kana. Näistä ensimmäinen oli Saksan kehittämä Goliath [7], joka toimi samalla käyttöperiaat-  
teella kuin Neuvostoliittolaisten miinakoirat. Goliath oli laajalti käytössä saksalaisilla, mutta se

ei saanut suurta suosiota johtuen suuresta tuotantohinnasta, alhaisesta liikenopeudesta (9,7 km/h), huonosta maavarasta (11.4 cm) sekä liian useasti jo ennen kohteen saavuttamista katkeavasta ohjauskaapelista. Saavuttaessaan kohteensa tulos oli kuitenkin aina taattu ja tuhoisa. Goliath oli myös hyvin painava (430 kg), jotta se olisi ollut helposti siirrettävissä ja kannettavissa miesvoimin. Kuvassa 4 on esitetty Goliath. Tähän vanhaan tekniikkaan ja ideaan perustuvat monet nykypäivän autonomiset asejärjestelmät. [3] Goliathia ei pidetty sotarintamalla menestyksenä ja kaukokäyttöisen robotin käyttö ja kehitys jätettiin odottamaan, että teknologia mahdollistaisi joustavamman ja toimintavarmemman toimintatavan. [3]



Kuva 4. Goliath SdKfz 302 [7]

Modernin teknologian ripeä kehitystahti onkin johtanut Goliathin konseptin kaivamiseen pöytälaatikosta takaisin esille. Tästä parhaimpana esimerkkinä on Iranilaisten valmistama Heidar-1 [8], robotti on esitetty kuvassa 5. Heidar-1 on 6x6 pyöräinen miehittämätön panssaritorjuntaajoneuvo. Sen perimmäinen käyttötarkoitus on ajaa panssariajoneuvon alle ja räjäyttää räjähdelaistensa kohteensa alla tuottaen suurta vahinko ajoneuvolle ja sen miehistölle. [8] Heidar-1 on myös mahdollista kiinnittää AK-47 rynnäkkökivääri häirintätoiminta varten [8]. Aseen tähtäyskyky on tosin hyvin kyseenalainen, sillä se on asemoitu robottiin ylösalaisin.

Vaikka tarkkoja mita-, toimintasäde-, rakenne-, ja ohjelmistotietoja ei ole saatavilla, voi kuvien ja videoiden perustella päätellä, että robotti ei ole 1.5 metriä pidempi, on noin 0.6 m leveä, noin 0.4 m korkea ja se omaa noin 15 cm maavaran. Kaikki pyörät vaikuttavat olevan vetäviä ja niissä kaikissa on erillisjousitukset. Robotin paino on tuskin 200 kg painavampi, sillä sen sivuille on asetettu muoviset kantokahvat. Videoiden perusteella voi arvioida laitteen kulkevan ainakin noin 20 km/h.

Huomionarvoisena seikkana ohjausmenetelmää tai laitetta ei ole saatavissa julkisista lähteistä. Antenneista voi päätellä, että laite on radio-ohjattu ja toimii myös mitä todennäköisesti ainakin Wi-fi verkossa. Iranian armeija on ilmoittanut sen toimivaan verkossa, mutta ei ole tarkentanut millaisessa verkossa [8]. Kuvien, videoiden ja ilmoitettujen tietojen perusteella Heidar-1 kantaman voidaan olevan enintään 500 m. Koska laitteella ei ole omaa kuvausjärjestelmää, voidaan lisäksi epäillä, ettei laite omaa minkäänlaista autonomiaa tai kohteentunnistusta. Suomen maasto- ja keliolosuhteissa laite tuskin kuitenkaan toimisi sellaisenaan, sillä se on suunniteltu hiekkaiseen maastoon ja tasaisille, matalille heinikoille.



Kuva 5. Heidar-1 [8]

Yhdysvalloissa on ollut pitkään miehittämättömien maastoajoneuvojen kehitys käynnissä. DARPPA-ohjelman (Defence Advanced Research Project Agency) alaisuudessa on kehitetty useita erilaisia miehittämättömiä ajoneuvoja, joista yksi mainitsemisen arvoinen on Crusher ja sen pienempi versio mini Crusher [9]. Samaan kokoluokkaan Goliathin, Heidar-1 ja Laykkan kanssa kuuluva mini Crusheria nostetaan näistä malleista tarkempaan tarkasteluun vertailun vuoksi.

Mini Crusher on Carnegie Mellon University, National Robotic Engineering Center:in (NREC) yhteistyössä DARPAN kanssa kehittämä robottialusta. Robotti on esitetty kuvassa 6. Tätä alustaa voi käyttää tiedusteluun, valvontaan, materiaalikuljetuksiin, raivaustehtäviin, kartoittamiseen, ensiapuun ja vaarallisten alueitten tarkkailuun. Robotissa on 6x6 jousitetut pyörät, jotka toimivat jokainen omalla sähkömoottorilla integroituna pyörään. Robotin keskellä on aukko, johon voidaan tarvittavat materiaalit asettaa, kantotilavuutta on noin  $19,7 \text{ cm}^3$ . Takana on paikka irrotettavalle lyijyakulle, joka on tavallinen kaupallinen lyijyakku. NREC on ilmoittanut robotin kantokyvyksi noin 45 kg (100 lbs.) ja robotin omaksi painoksi noin 54,5 kg (120 lbs.).

Robotin huippunopeudeksi on ilmoitettu noin 24,14 km/h ja robotti kykenisi kiipeämään 40° mäkiä ylös. Kehittäjät ilmoittavat myös, että robottiin on mahdollista saada paljon erilaisia kameroita ja LIDAR-tutkia (light detection and ranging), sekä että robotti olisi hyvin kyvykäs toimimaan kivikoisessa maastossa ja ylittämään haastaviakin esteitä. [9]



Kuva 6. Mini Crusher ja taustalla Crusher [9]

Esittelyt ovat tosin vaikuttavia ensisilmäyksellä, mutta niissä ei mainita ollenkaan mini Crusher -robotin autonomiasta tai ohjaukantorokyvystä mitään. Esittelyvideosta voi nähdä miten laitetta ohjataan kuin mitä tahansa muuta radio-ohjattavaa laitetta ja kamerakuva on vain tallennettu robotin päässä kiinni olevaan kameraan, eikä suinkaan lähetetty operaattorin päätelaitteeseen. Laitte on hyvin lupaava monilta osin, mutta pitää painottaa, että sekin on vasta kehityksensä alkuvaiheessa.

Suomen puolustusvoimille (PV) ei ole hankittu vastaavanlaisia taistelutoimintaan suunnattuja robotteja. PV:llä on saksalaisvalmisteinen kauko-ohjattu Teodor-raivausrobotti, jonka avulla voidaan tunnistaa räjähteitä ja tarvittaessa suorittaa tarkkailutehtäviä. [10] [11] Tämän lisäksi löytyy tiedusteluun ja raivaamiseen tarkoitettu kevyempi iRobot 510 packbot -tiedustelu/-raivausrobotti. [12] Kummatkin raivausrobotit on esitetty kuvassa 7. Robotteja eivät ole tarkoitettu taistelu toimintaan, vaikka iRobot 510 kykenee suorittamaan tiedustelutehtäviä. Laitteille ei ole suunniteltu erillistä kineettistä aseistusta ihmiskohteita vastaan, sillä ne ovat tarkoitettu toimimaan pääasiassa raivaustoiminnassa.



Kuva 7. PV:n käytössä olevat raivausrobotit Teodor ja iRobot 510 [13] [14]

### 1.7 Laitteen taktinen käyttö ja suunnittelu

Vaikka tässä tutkimuksessa ei ole tarkoitus testata tai käyttää laitetta joukkojen kanssa, on silti tarpeen selventää laitteen taktinen käyttötarkoitus riittävässä määrin, jotta lukija kykenee arvioimaan testien soveltuvuutta paremmin. Laykka on modulaarinen miehittämätön maastoajoneuvo. Sen modulaarisuus mahdollistaa alustan usean käyttötarkoituksen ja taktisen toiminnan taistelukentällä. Lisäksi sen edullisuus mahdollistaa sellaisia käyttösovellutuksia, joihin tavalla tai toisella kalliimmat vaihtoehdot eivät sovellu.

Laykkan kehitystyössä vaikuttavat vahvasti asiakkaan (Puolustusvoimat) antamat kyvykkyyksivaatimukset, jotka ovat esitelty liitteessä 1. Liitteessä 2 on tehty saatujen vaatimusten perusteella päätökset laitteen rakenteista ja osista (tekniset spesifikaatiot), jotta ne kykenisivät täyttämään asetetut vaatimukset toivotulla tasolla. Koska laite ei ollut Puolustusvoimien virallisella hankelistalla, ei sille voitu tällöin antaa virallisia vaatimuksia. Nämä alustavat vaatimukset ovat kuitenkin laadittu siten, että laitteen konseptia voidaan kehittää ja viralliset vaatimukset laaditaan retrospektiivisesti myöhempiä käyttöhyväksyntöjä varten. Edullinen hinta oli yksi painavimmista vaatimuksista, joten suunnittelutyössä jouduttiin tekemään paljon rajoituksia ja karsimista. Tutkija näkee, että vaikka kyseinen hinta rajoitus on haastava suunnittelun ja rakentamisen osalta, tuo se kuitenkin taistelukentälle uuden edun korvattavuutensa ansiosta. Hinnan vaikutussuhde muodostuu merkittäväksi, jos muutaman tuhannen euron laitteella kyetään tuhoamaan tai aiheuttamaan vahinkoa huomattavasti kalliimmalle panssarivaunulle.

Laykkan varsinainen käyttötarkoitus on panssaritorjunnassa. Sen suunniteltu pääasiallinen toimintaperiaate on väijyä tienreunassa/ojassa/maastossa kohdettaan, joka on tässä erityisesti panssarivaunu. Kohteen havaittuaan laite lukittautuisi kohteeseensa ja ajaisi vaunun alle tuhoten sen. Robotti voi joko ajaa vaunun alle edestäpäin tai ”jahdata” vaunua ja ajaa sen alle takapäin. Vaunuun tuotetaan tuhovaikutus joko pohjamiinalla, jolla päästään läpäisemään vaunu sen heikoimmasta paikasta: pohjasta. Pohjamiinan tilalle voidaan asetta myös kylkimiina, jolla on samantyyppinen toimintaperiaate, eli läpäistä panssaria alhaaltapäin kyljen sijaan suunnatulla kuparisuihkulla. Tarvittaessa robottiin voidaan asentaa noin 40kg vapaavalintaista räjähdainetta, jolloin päästään vähintäänkin vahingoittamaan vaunua merkittävästi. Robotin edullisuuden ansiosta sen uhraamista ei tarvitse pelätä, vaan päinvastoin sitä varten se on tarkoitettu. Lisäksi robottiin on mahdollista asentaa neljä kappaletta kevyitä kertasinkeja, jotka voidaan laukaista kohteeseen samaan aikaan tai yksitellen. Tällä toimintatavalla voidaan laitetta käyttää useammankin kerran vapauttaen elävää voimaa vaikuttamaan muualla tai samaan kohteeseen. Täten ei vaaranneta panssaritorjuntamiesten henkiä. Toisaalta robotti kykenee vaikuttamaan vaunuun tehokkaammin, koska sillä voidaan ajaa huomattavasti lähemmäs vihollisen vaunuja ilman, että se tuottaisi isompia herätteitä vaunun sensoreille.

Toisena päätarkoituksen laitteen on tarkoitus toimia tiedusteluajoneuvona, joka voidaan lähettää joukon etupuolelle tarkastamaan tiestön, tiedustelemaan vihollista, häiritsemään vihollista ja maalittamaan vihollisen asemat. Tämä toimintaosio voidaan toteuttaa asentamalla robottiin sarjatuliase ja useampi eri sensori. Johtuen laitteen suhteellisen pienestä koosta ja sähkömoottorien ansiosta hiljaisesta käyntiäänestä, laitetta on vaikeampi havaita kuin polttomoottorista laitetta. Tällöin voidaan päästä yllättämään vihollinen antamatta omasta toiminnasta äänihavaintoa. Aseistuksen lisäksi voidaan laitteeseen edelleen asentaa räjähteitä, jolloin tehtävän päätteeksi voidaan viholliselle tuottaa lisää henkilö- tai materiaalitappioita tuhoamalla laite ja samalla estäen laitetta jäämästä vihollisen haltuun.

Laykka kykenee lisäksi toimimaan tukevana osana joukkoja. Robottiin voidaan asentaa parit, joilla voidaan hoitaa taistelijaevakuoinnit. Ajatuksena olisi, että haavoittuneelle taistelijalle hälytetään robotti hakemaan hälytyspisteeseen. Potilas siirrettäisiin robotin päälle paarelle, jonka jälkeen robotti veisi haavoittuneen taistelijaan Y-pisteelle, jossa hän saisi tarvittavaa ensiapua ensiapuhenkilöstön puolesta. Tällä tavoin saadaan pidettyä EA-henkilöstö (Ensiapua) kauempana etulinjasta ja kyetään luomaan lisää evakuointi apua taistelukentälle. Samalla metodilla robotti kykenisi kuljettamaan kevyeen määrän ampumatarvikkeita ja muita pientarvikkeita joukkojen ja huollon välillä.



Varsinkin kaupunkiolosuhteissa Laykka kykenee tarjoamaan viestitoiminnallista tukea taistelulentä. Näissä olosuhteissa sen olisi tarkoitus toimia pienenä releasemana taistelevaa ryhmää tai joukkuetta varten. Laykkat kykenevät välittämään tietoa ja keskustelemaan keskenään MESH-verkkotekniikastaan johtuen. Laykkaan voitaisiin myös asentaa pienrelelähetin, jolla saataisiin joukkueen tai ryhmän taistelijoiden radioiden kantavuutta parannettua.

Laykkan avulla on mahdollista paikata henkilöresurssien määrää etenkin valvontatehtävissä-, sillä robotti voitaisiin valjastaa valvomaan käskettyä aluetta autonomisesti. Johtuen robotin sisällä olevasta useasta tekoälystä, laite ei olisi pelkästään staattinen valvoja, vaan se kykenisi ajamaan sille käsketyllä reitillä ja näin valvomaan sille käskettyä aluetta. MESH-verkkojen ja parvitekniikan ansiosta voidaan vartiointiin valjastaa ryhmänä useakin samantyyppinen laite eri varusteilla tai aseistuksilla. Havaittuaan toimintaa tai tunnistettuaan vihollisen laite voi senhetkisestä varustuksestaan riippuen hälyttää havaitusta aktiviteetista tai vaikuttaa tunnistettuun kohteeseen. Näin kyettäisiin vapauttamaan arvokkaita ihmisresursseja muihin kenties tärkeämpiin tehtäviin.

Laykka-robotin käyttö ei rajoitu pelkästään hyökkäyksellisiin moduuleihin. Johtuen robotin uhrattavuudesta, voidaan se varustaa desinfiointitykillä, jolla voidaan desinfioida tiloja ja joukkoja. Samalla moduulilla voidaan Laykka lähettää mittaamaan arvoja toiminta-alueelle, jossa on epäilty CBRN-aseiden (Chemical, Biological, Radiological, Nuclear) käyttöä.

Laykkasta saatava hyöty ei ole pelkästään sen rungossa tai yksittäisistä komponenteista koostuva järjestelmäkokonaisuus, vaan sen tekoälyssä. Laykkan tekoälyn perusteella voidaan tuottaa useita eri variantteja Laykkasta. Näissä varianteissa voidaan hyödyntää Laykkan tekoälyä ja ohjelmistoja. Yhtenä mahdollisena varianttina olisi Laykkan laitteiston ja tekoälyn asentaminen panssarivaunuun, luoden näin valmiina olevista panssarivaunuista autonomiaa. Toisena varianttina olisi miehittämättömät veneet varustettuina torpedoilla tai suurella määrällä räjähteitä uhraten itsenä tuhotakseen vihollisen kuten sen maaversionsa.

On painotettava, että Laykkan tehtävä ei ole mitenkään korvata henkilöstä. Sen sijaan laite vapauttaa henkilöstä tärkeämpiin ja vaativimpiin tehtäviin tarjoten samalla tarvittavaa lisätukea taistelevalle joukolle sekä luoden kattavamman valvontaverkon ja tarvittavan reaaliaikaisen tiedon johdolle. Laykkan on tarkoitus olla taistelijan taisteluapuri ja ”kädenjatke”. Tästä johtuen laitetta olisi tarkoitus käyttää joukkue tasolla osana joukkuetta, luoden yhden lisäryhmän ja ulottuvuuden joukkueeseen.

## 2 MENETELMÄT

Tässä luvussa käsitellään tutkimuksen tekoon liittyvät menetelmät, järjestelmän kehitykseen valittu malli sekä kenttätestin ja -kokeen tuomia rajoitteita ja velvoitteita osana tutkimusta. Luvun alussa perusteellaan Laykka-järjestelmän runkoversion valinta tutkimukseen, lähteiden keuruu, tutkimuksessa käytettävät analysointimenetelmät ja luotettavuustarkastelu.

### 2.1 Laykkan runkoversion valinta tutkimukseen

Tutkimusta varten valittiin Laykkan runkoversio X.2, jonka pohjalta aloitettiin testien suorittaminen ja laitteen kehitystyö. Tutkimuksen aikana kyseisen rungon pohjalta kehitetään uusi runkoversio, jonka parannukset tehdään kenttätestien sekä -kokeen aikana saatujen havaintojen perusteella.

Osa testeistä olisi mahdollista suorittaa simulaationa, sillä Laykka on mallinnettu Matlab-simulaatioon. Simulaatioilla voidaan suorittaa useita testejä sekä mahdollisesti tätä kautta luoda rahallista säästöä. Kyseinen simulaatio on kuitenkin tehty runko versiolle X.1:lle, joka on merkittävästi erilainen kuin tutkimukseen valittu runkoversio. Uuden runkoversion mallintaminen veisi tutkijalta huomattavasti resursseja suhteessa saavutettavaan hyötyyn, sillä simuloitujen tulokset on vahvistettava todellisessa maailmassa. Siksi tutkimuksessa ei suoriteta simulaatioita, vaan pitäydytään oleellisten fyysisten testien suorittamiseen.

### 2.2 Tiedonkeruu ja lähteet

Tutkimuksen pohjatieto kerättiin avoimista internetlähteistä, Puolustusvoimien asiahallintajärjestelmän (PVAH) asiakirjoista ja kirjoista. Tutkimuksen kannalta olennaisin tieto tuotetaan kenttätesteillä sekä kenttäkokeella. Maastoliikkuvuutta käsittelevät laskutoimitukset sekä teoria ovat pääasiassa Martti Saarilahden kirjoittamasta terramekaniikkaa käsittelevästä kirjasta, sekä kirjoittajan muista vastaavia aiheita käsittelevistä artikkeleista. Laitteiston kehityksessä sekä muussa toiminnallisuuksissa tutkija hyödynsi omaa aikaisempaa osaamistaan Diplomi-insinöörinä sekä pitkällisen rakentamisen, kehittämisen sekä työkokemuksen kautta karttunutta osaamista. Kehityksessä hyödynnettiin myös muiden alojen osaajia sekä heidän tietotaitoaan.

### 2.3 Kenttätestien ja kenttäkokeen toteutus

Tutkimustyöhön liittyviä kenttätestejä suoritettiin kolme (3) ja kenttäkokeita yksi (1). Määrä valittiin ajallisten resurssien rajoissa suoritettavissa olevien ja tutkimuksen aiherajauksen puitteiden mukaan. Tämän tutkimuksen aiherajaukseen ulkopuolelle jääviä kenttäkokeita voidaan suorittaa tulevaisuudessa. Kenttäkoe ajoitettiin osaksi 1SM4 kurssia, jotta tarvittavat resurssit kenttäkokeen suorittamiseksi kyettiin takaamaan. Koska Laykka-AMPGV ei ole vielä saanut virallisia hyväksyntöjä testikäyttöön PVLOGL:ta (Puolustusvoimien logistiikkalaitos), piti laite koestaa yliopiston tutkimustyön osana sekä opetuskohteena täyttäen näin myös kokeen vaatimukset. Tämä on lisäsyys suorittaa kokeet ja testit kampusalueella. Ennen kenttäkoetta oli suunniteltu suoritettavan ainakin 1 kenttätesti, jonka pohjalta järjestelmää kehitettiin kenttäkokeeseen. Kenttäkokeen jälkeen suoritettiin ainakin kolme kenttätestiä, joilla tarkastettiin kokeessa havaitut puutteet sekä kehitettiin laitetta paremmaksi, jotta asetetut vaatimukset täyttyisivät.

Kenttäkokeen suorittamista varten laadittiin 1SM4 kurssin ohjeiden mukaiset asiakirjat, joilla kuvataan koejärjestelyt ja testattavat vaatimukset, niiden kuvaukset sekä täyttymisen aste. Jokaista kenttätestiä varten laadittiin lyhyempi asiakirja, jossa kuvataan testin tarkoitus, testin asettelu, testattavat asiat, kesto, havainnot ja muu merkille pantavat asiat. Asiakirjat ovat liitettynä tutkimuksen liitteisiin. Testeistä ja kokeista kerättiin kuvia ja videodataa, joiden tarkoitus on toimia havainnollistavana tekijänä sellaisille tekijöille, joita ei voida mitata mittavälinein, kuten esimerkiksi murtumat, vääntymät, palaamiset ja vastaavat.

### 2.4 Analysointimenetelmät sekä luotettavuustarkastelu

Kenttätesteistä ja kokeista saatu tietoa tullaan käyttämään hyväksi laitteen kehittämisessä. Saadut tiedot ja havainnot analysoidaan abduktiivisen päättelyn avulla. Tämän päättelyn perusteella pyritään löytämään mahdolliset syy-seuraussuhteet. Abduktiivinen päättely on päättely parhaaseen saatavilla olevan selitykseen. Sen lähtökohtana on tyypillisesti joukko havaintoja, ja se etenee havaintojoukon todennäköisimpään selitykseen. [15]

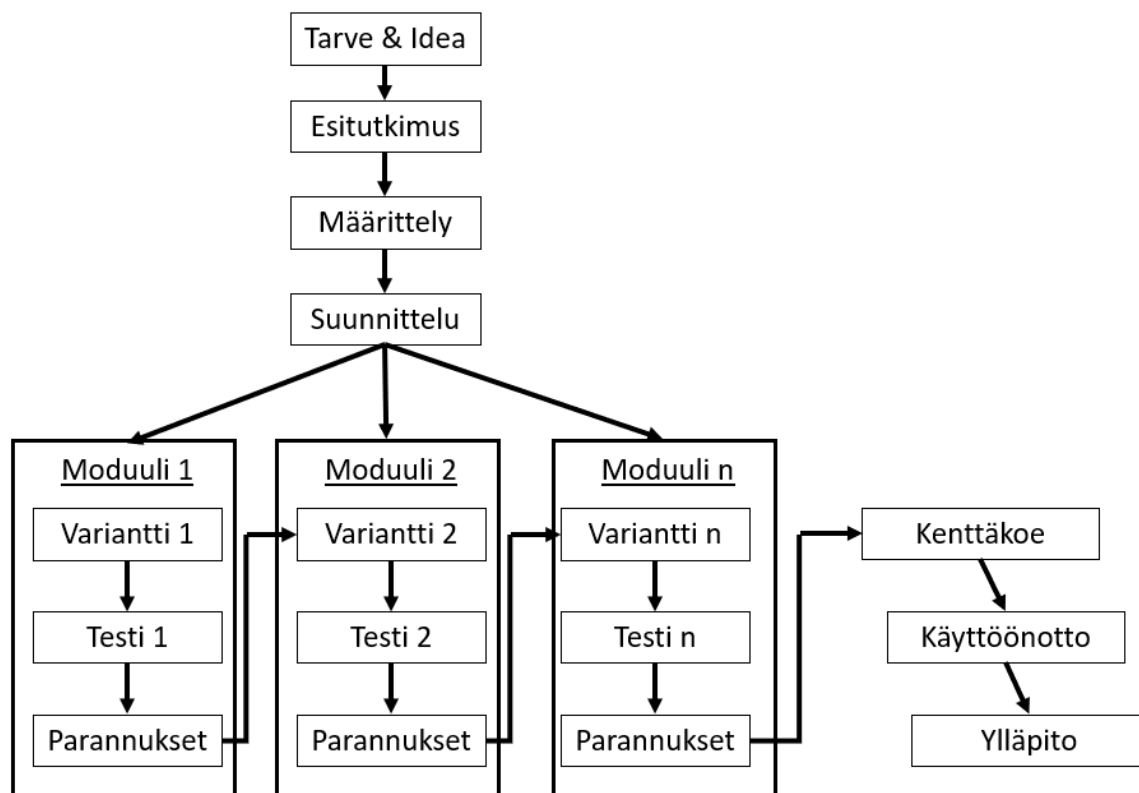
Tutkimuksen systemaattista virhettä tutkija on pyrkinyt vähentämään pitämällä kenttätestien ajoympäristöä sekä testijärjestelyä mahdollisimman samanlaisena testien välillä. Robotti on tutkijan itsensä kehittämä järjestelmä ja täten hän tuntee sen myös parhaiten. Samalla tutkijalla on omat intressit sekä tuntemukset laitetta kohtaan, jotka voivat aiheuttaa vinoumia sekä harhoja havainnoissa ja päätelmissä. Mahdolliset vinoumat sekä harhat on pyritty tunnistamaan tutkimuksen alkuvaiheesta lähtien ja jatkuen läpi järjestelmän kehityksen. Tutkija on aktiivisesti

pyrkinyt vähentämään kognitiivista harhaa ja täten myös vahvistusharhaa tutkimuksessa toteuttamalla kenttätestit sekä -kokeen niin, että niiden aikana paikalla on muitakin tarkkailijoita sekä käyttäjiä. Saaduista havainnoista pyritään keskustelemaan ja dokumentoimaan sekä positiiviset että negatiiviset havainnot mahdollisimman avoimesti ja tarkasti, jotta uudelleentarkastelu olisi tarvittaessa mahdollista myöhemmässäkin vaiheessa. Varsinkin kenttäkokeessa, tutkija pyrkii jäävämmään itsensä pois päätöksenteoissa, joissa todetaan vaatimuksien täytymisestä.

Mahdollista arviointi harhaa on pyritty vähentämään myös luomalla arviointi asteikosta yksiselitteinen: hyväksytty/hylätty. Esimerkiksi sellaisista vaatimuksista annetaan ”hylätty” arvosana, joiden testaamisesta voidaan realistisesti olettaa laitteen runkoversion vioittuvan liiallisesti tai robotti ei yksinkertaisesti suoriudu. Näihin ominaisuuksiin palataan myöhemmissä kehitysvaiheissa. Testien ja kenttäkokeiden arvosteluasteikossa on lisäksi käytössä ”osittain”-arvo, joka on rinnastettavissa hylättyyn arvosanaan. Tarkoituksena on antaa mahdollisuus tuoda esiin, että asia on toiminut toivottuun suuntaan tai esimerkiksi käyttäjävirheen tai arvaamattoman tapahtuman johdosta vaatimus ei olekaan täytynyt täysin. Tällöin kyseistä järjestelmää täytyy korjata tai kehittää täyttämään vaatimus.

## **2.5 Inkrementaalinen kehittäminen**

Projektin rakentuessa useista pienemistä peräkkäisistä projekteista, jotka edistävät seuraavaa projektia ja sen toteutusta, voidaan puhua inkrementaalista kehitysmallista. Tämä malli yhdistää vesiputousmallin ja iteratiivisen prototyyppi kehittämisen. [16] Mallia käytetään paljon ohjelmistokehityksissä, mutta sitä voidaan hyvin soveltaa myös muilla aloilla, kuten fyysisen robotin tai lentokoneen rakentamisessa. [17] Inkrementissa eli osaprojektissa toteutetaan tai kehitetään joitakin lisäominaisuuksia, jotka otetaan seuraavassa osaprojektissa käyttöön. [16] Projektin alkuvaiheessa suunnitellaan aikataulutusta ja vaiheistus, jolla osaprojektit jaetaan ennen varsinaisen työn aloittamista. [17] Kehitysmalli on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Inkrementaalinen kehitys ja eteneminen osana Laykkaa.

Mallin isona hyötynä on sen joustavuus sekä hallittavuus. Kun projekti on pilkottu useampaan osaan, on se samalla helpompaa käsitellä ja etsiä mahdollisia virheitä ja ongelmia niin ohjelmistoissa kuin rakenteissakin. Tällä tavalla voidaan myös luoda tuote, joka vastaa paremmin asiakkaan tarpeita, kun jokaista moduulia voidaan sen valmistuessa esitellä erikseen. Tämä tuo myös kustannussäästöjä ja alkuvaiheessa prosessi on hyvinkin edullinen. Mallin haittapuolena on korkeammat projektin loppukustannukset kuin perinteisessä vesiputousmallissa. Mallin käyttö vaatii, että projekti on hyvin suunniteltu sekä vaatimukset koko järjestelmälle ovat tarkkoja ja selkeitä ennen kuin järjestelmän kehitys puretaan osiin. Inkrementaalista mallia kannattaa hyödyntää varsinkin silloin kun järjestelmän vaatimukset ovat selkeät. Tärkeimmät vaatimukset pitää olla määritettynä, mutta jotkut osa-alueet saavat muuttua ajan myötä. Mallia kannattaa käyttää, jos käytetään uutta teknologiaa, projektilla on korkeat odotukset sekä riskit, tai resurssit ja tarvittavat tietotaidot eivät ole saatavilla. [16]

Inkrementaalisen prosessin käyttö Laykkan kehityksessä on hyvin perusteltua, sillä Laykka-projektin on tarkoitus tuottaa uutta teknologiaa ja käyttää vanhoja menetelmiä uudella tavalla. Projektilla on korkeat odotukset sekä riskit. Suurimpana riskinä on, että koko konsepti ei ole toimiva sekä tekoälyt ovat käyttökeltottomia. Kuitenkin projektin onnistuttaessa tarjoaisi se mullistavaa uutta teknologiaa Puolustusvoimien käyttöön sekä syvällisempää ymmärrystä tekoälyistä ja UGV:stä. Projektin alkuvaiheissa kaikkia tarvittavia resursseja ei ole saatavilla eikä

myöskään henkilöstöä. Vaatimukset on määritelty riittävän selkeästi ja tarkasti, jotta projektin pystyy pilkkomaan moduuleihin työn ja resurssien jakamista varten. Taulukossa 1 on esitetty Laykkan inkrementaalinen kehitys.

LAYKKA-TUTKIMUSPROJEKTI AUTONOMOUS MULTI-PURPOSE GROUND VEHICLE © Christian Andersson			
Iteraatio versio:	Laykka x.1	Laykka x.2	Laykka x.3
Runkokehityksen tavoite	Laitteiston sijoittelu	Liikemintä tasaisella	Komponenttien hienosäätö ja eri moduulien testaus
Ohjelmistokehityksen tavoite	Ohjauspiirin toiminta kauko-ohjauksella	Sensoridatan käsittely ja paikkatieto (GSM)	Navigaatiota tukevien ohjelmien testaus
Liittyvä tekoälytutkimus	Kuva-aineiston hankinta ja luokittelualgoritmi	Autonomisen ajon perusteet (linjaseuraaminen)	Virtuaalisen reitin muodostaminen autonomiseen ajoon maasto-olosuhteissa

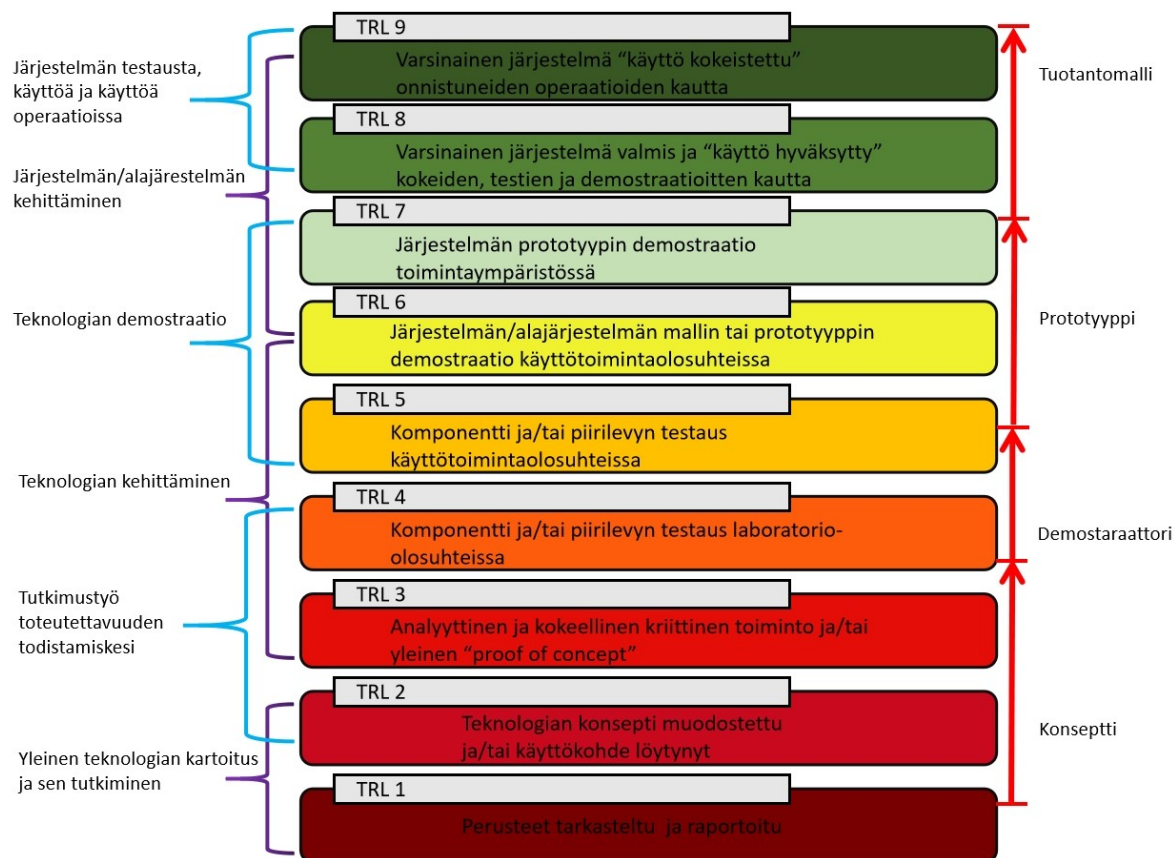
Taulukko 1. Laykkan inkrementaalinen kehitys

## 2.6 Teknologian valmiusaste TRL-asteikolla

Teknologian valmiusaste (Technology Readiness Levels (TRL)) on yhdenlainen teknologian arviointiasteikko, jolla voidaan arvioida tietyn teknologian tai järjestelmän kypsyyttä. Jokainen teknologinen projekti arvioidaan suhteessa jokaiseen teknologian tasoon ja sille annetaan TRL-taso suhteessa projektin etenemiseen. On olemassa 9 (yhdeksän) TRL-tasoa, joita saavutetaan tason kuvaamien asioiden toteuduttua. TRL 1 -taso on matalin ja korkein TRL 9. [18] Taulukossa 2 on esitelty TRL-asteikko, mitä muita elementtejä siihen kuuluu sekä miten eri järjestelmien mallit asettuvat suhteessa TRL-tasoon.

TRL 1 -tasolla teknologiasta tai järjestelmästä on tutkimustoiminnan alussa, ja saadut tulokset siirtyvät tuleviin tutkimus- ja kehitystoimiin. TRL 2 -taso saavutetaan, kun teknologian tai järjestelmää koskevat perusteet on tutkittu ja ensimmäisiä käytännön sovellutuksia voidaan toteuttaa tutkimustietojen pohjalta. [18]

TRL 3 -taso saavutetaan, kun aktiivinen tutkimus- ja suunnittelutyö on käynnissä. Tason saavuttaminen vaatii usein analyttisiä tarkasteluja ja laboratoriotutkimuksia. Samalla voidaan todeta, kuinka kypsä teknologia on etenemään TRL-asteikolla korkeammalle. Monesti TRL 3-tason lopussa rakennetaan proof-of-concept mallijärjestelmä. [18]



Taulukko 2. TRL-tasot mukailen NASA:n ja Goldensen esityksiä [18] [19]

Järjestelmä siirtyy TRL 4 -tasolle, kun proof-of-concept mallijärjestelmä on valmis. Tasolla testataan useiden eri komponenttien toimivuus ja yhteensopivuus. Esimerkiksi onnistunut laboratoriokoe antaa järjestelmälle TRL 4-tason, mutta TRL 5-taso saavutetaan vasta järjestelmän suoriutuessa onnistuneesti sille tarkoitetuissa käyttötoimintaolosuhteissa tehdyissä testeissä. Molemmilla tasoilla tulee suorittaa mahdollisimman realistisia simulaatioita. Kun TRL 5 -tason osalta vaaditut testit ovat suoritettu, voi kehitystyö edetä seuraavalle tasolle. TRL 6 -tason saavutettuaan järjestelmästä on luotu toimiva prototyyppi tai demonstraattori. [18]

Tasolle 7 päästäkseen teknologian tai järjestelmän käyttö tulee demonstroida sille tarkoitetussa toimintaympäristössä. Tasolla 8 teknologia tai järjestelmä on kenttäkoestettu ja sen läpäistyään status on "käyttö hyväksytty". Täten järjestelmä tai teknologia on valmis implementoitavaksi osaksi olemassa olevaa teknologiaa tai järjestelmää. Kun järjestelmä on käyttökoestettu onnistuneesti operaatioissa, se voidaan tällöin nostaa TRL 9 -tasolle. [18]

### 3 LAYKKA-AMPGV:N INKREMENTAALINEN KEHITYS

Luvussa kuvataan Laykka-järjestelmän kehityksen kokonaisaikataulu sekä konkreettiset muutokset kenttätestien ja -kokeen aikana tehtyjen havaintojen pohjalta. Laykkan kehitysprosessi on edennyt Anderssonin diplomityössä laadituista suunnitelmista ja simulaatioista ensimmäisen demonstraattorin runkoversion rakentamiseen ja testaamiseen sekä toisen runkoversion rakentamiseen. Materiaalivalintoja ja teknisiä ratkaisuja ei käsitellä tässä työssä, sillä ne on eritelty edellä mainitussa diplomityössä. Sen sijaan tässä tutkimuksen luvussa esitellään runkoversio X.2:n ratkaisuja ja sen elektronisia komponentteja yleisellä tasolla tutkimuksen alkutilanteessa sekä tutkimuksen aikana runkoversio X.2:sta X.3:en siirryttäessä tehdyt muutokset.

#### 3.1 Laykkan TRL-taso

Teknisen laitteen kehitysprosessi sisältää pitkäjänteistä testausta, suunnittelua, korjausta ja uudelleensuunnittelua, jossa onnistuessaan kehitetään demonstraattorin pohjalta prototyyppi ja lopulta tuotantovalmis laite. Pitkän ja monivaiheisen prosessin aikana voi tapahtua paljon projektin valmistumista venyttäviä tai pahimmassa tapauksessa projektin tuhoavia asioita. Vaikka huolellinen ja kattava suunnittelu luo projektin onnistumiselle vankan pohjan, ei kaikkea pystytä etukäteen ennustamaan. Demonstraattorin rakentamisen tarkoitus onkin päästä testaamaan muun muassa konsepteja ja yleisiä toiminnallisuuksia, sillä demonstraattorit osoittavat hyvin mahdolliset ongelmakohdat. Esimerkiksi esiin voi tulla ongelmia, joita simulaatioissa ei ole esiintynyt tai jotka ovat jääneet suunnittelussa huomioimatta.

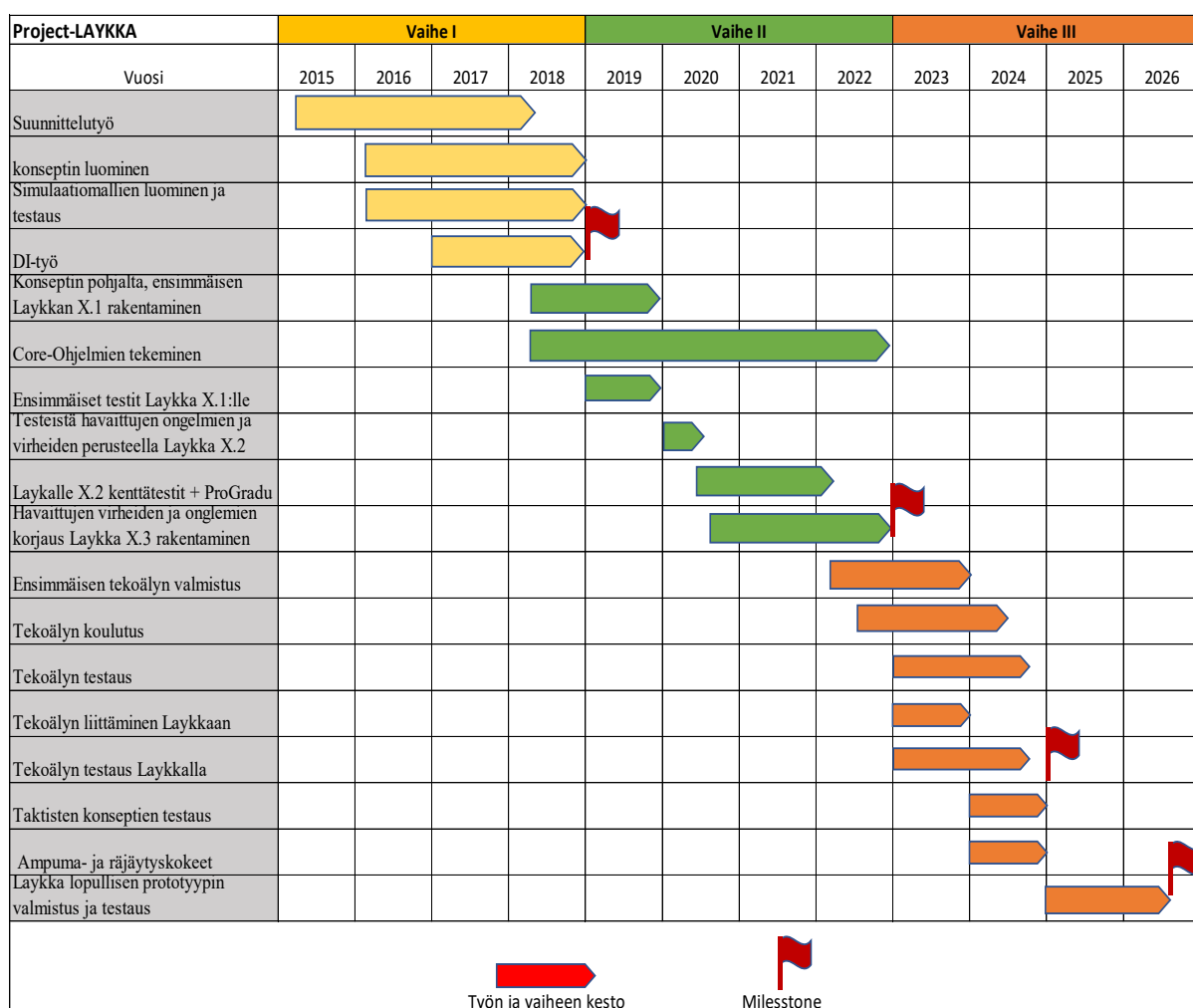
Laykka X.2 ja X.3 ovat kummatkin vielä demonstraattoreita, joten tutkimuksen alkuvaiheessa molemmat versiot sijoittuvat TRL 5 -tasolle. Tutkimustyössä oli tarkoitus löytää mahdolliset puutteet ja virheet suunnittelutyöstä, Laykkan designista ja teknisestä toteutuksesta, jotta prototyyppivaiheeseen voitaisiin siirtyä. Loppuvaiheessa tutkimusta Laykka-järjestelmän voidaan todeta saavuttaneen TRL 6 -tason täytettyään vähintään 50 % sille asetetuista ehdottomista vaatimuksista.

#### 3.2 Projektin kokonaisaikataulu

Projektin kokonaisuus rakentuu monesta vaiheesta, kuten rungon toimivuudesta, core-ohjelmista, tekoälystä sekä niihin liittyvistä sensoreista. Taulukko 3 havainnollistaa Laykka-AMPGV:n kehityksen monivaiheisuuden. Projektissa eteenpäin siirtyminen vaatii varmentavaa testausta, jolla vahvistetaan edellytykset seuraavaan vaiheeseen siirtymiseen. Tiedetyt vaiheet ovat kriittisiä kokonaisuuden kannalta, jotta voidaan todeta konseptin toimivuus ja edetä kehitystyössä mahdollisimman pienillä viivästyksillä.



Tämän tutkimustyön kirjoittamisen aikana projekti on vaiheessa II. Jos kyseisen vaiheen aikana havaitaan merkittäviä puutteita tai vikoja, on palattava kyseisten järjestelmien osalta vaiheeseen I. Jos puutteita on merkittävä, koko konseptin toimivuutta haittaava määrä, voidaan palata kaikkien osa-alueiden osalta takaisin vaiheeseen I. Tämä on täysin projektipäällikön päätettävissä. Projektin sujuvuuden kannalta on asetettu, että vaiheeseen III siirtyminen edellyttää kriittisistä vaatimuksista vähintään 50 %:n täyttymistä, muista vaatimuksista 10 %:n täyttymistä, eikä voimansiirrossa esiinny merkittävästi robotin liikettä haittaavia vikoja.



Taulukko 3. Laykka-projektin Gantt-tilausprojekti ja sen vaiheiden kestosta.

Huolellisella suunnittelulla ja vaiheistuksella on kyetty tuottamaan useampi runkoversio ja testaamaan niitä suhteellisen lyhyessä ajassa sekä rajallisilla resursseilla ja henkilöstöllä. Kompromissiratkaisujen tekeminen resurssien ja ajankäytön suhteen on ollut välttämätöntä, sillä Laykka X.2 ja X.3 -runkoversioiden valmistaminen on rahoitettu täysin kirjoittajan toimesta. Tärkeintä on ollut, että järjestelmä riittää käytännön sovelluksiin ja soveltuu testattavaksi. Välttämättä kaikki ratkaisut eivät aina toimi toivotulla tavalla, mutta kehitystyön kannalta vä-

hemmän kriittisiin tekijöihin ei kannata käyttää liikaa aikaa ja resursseja. Esimerkiksi mekaanista toimivuutta on priorisoitu vahvasti, sillä se muodostaa pullonkaulan tekoölyn asennukselle, kehittämiselle ja testaukselle.

Rakennettujen runkojen pohjalta on kyetty tekemään havaintoja ja korjaamaan havaitut puutteet ja suunnitteluvirheet niin rungossa, mekaniikassa, voimansiirrossa kuin ohjelmallisestikin. Jokainen isompi vaihe on voinut jakautua useampaan välivaiheeseen, jotka on pitänyt suorittaa riittävän hyvälle tasolle, jotta on voitu siirtyä seuraavaan vaiheeseen. Riittävän hyvä taso tässä tapauksessa on ollut se, että toiminnallisuus, järjestelmä tai ohjelma on toiminut toivotulla tavalla ja riittävällä tasolla täyttääkseen sille asetetun minimivaatimuksen. Jossakin tapauksissa toiminnallisuus ei ole saavuttanut vaatimuksen minimitasoa, jolloin on uudelleenarvioitu kyseisen järjestelmän kriittisyyttä koko järjestelmälle tai siirretty osa-alueen kehittämistä myöhempään vaiheeseen – tai jopa päätetty jättää toiminnallisuus kehittämättä, jos se ei ole olennaisesti kriittinen koko järjestelmän toiminnalle.

### **3.3 Rungon kehittyminen**

Projektin alkuvaiheessa rakennettiin ensimmäinen Laykka X.1 -runkoversio. Sen tarkoituksena oli osoittaa, että järjestelmä voidaan rakentaa vaatimuksissa asetettujen materiaalikustannusten puitteissa, luodut simulaatiot täsmäsivät todellisuutta sekä konsepti on yleisesti toimiva ja on kehitystyön arvoinen.

Laykka X.1 -runkoversio vahvisti olettamat, vaikka merkittäviä puutteita ja suunnitteluvirheitä havaittiin monien testien aikana. Runko toimi testialustana erilaisilla teknisillä ratkaisuille ja ohjelmistotesteille. Sen etuna oli jämäkkyys, joka mahdollisti testien suorittamisen huolehtimatta rakenteiden kestävydestä. Runko kesti muun muassa 45 paukkupatruunan laukausta sarjatulella ilman rakenteiden murtumia tai minkään järjestelmän vikaantumista.

Heti korjattavissa olevat puutteet korjattiin havaittaessa ja loput puutteet huomioitiin uuden runkoversion rakentamisessa. Tämän Laykka X.2 -runkoversion pohjalta aloitettiin varsinaiset tutkimuksen kenttätestit sekä jatkettiin kehitystyötä Laykka X.3 -runkoversion rakentamiseen.

### 3.3.1 Runkoversioon X.2 siirtyminen

Kehityksen edetessä Laykka X.1 -runkoversiosta luovuttiin. Virheiden ja havaintojen perusteella runko suunniteltiin uudelleen ja sen sisällä olevien komponenttien sijainteja muutettiin paremmiksi. Uudelleensuunnittelussa Laykka X.2 -runkoversiossa oli aiempaa lyhyempi akseliväli, kevyempi rakennusmateriaali, uusi rakennusmenetelmä sekä kevyempi ulkokuoren materiaali.

Suurin muutos oli akselivälin lyhentäminen siten, että muodostui täysin symmetrinen linjaus niin leveys- kuin pituussuunnassa. Tämä konfiguraatio mahdollistaisi paikalla kääntymisen 360 astetta ja parantaisi huomattavasti ohjattavuutta ja hallintaa. Akselivälin muutos on alkuperäisen suunnitelman mukainen, josta oli poikettu rakennettaessa ensimmäistä runkoversiota.

Toisena merkittävänä muutoksena oli runkomateriaalin vaihtaminen raudasta L-profiiliseen alumiiniin. Kokoaminen toteutettiin pulttaamalla rungon eri osat yhteen, mikä poikkeaa hitsaamalla kootusta Laykka X.1 -runkoversiosta. Pulttaamiseen päädyttiin sen suhteellisten hyötyjen vuoksi, sillä pulttaaminen mahdollistaa vioittuneiden rungon osien vaihtamisen modulaarisesti, ilman koko robotin purkamista. Huoltaminen ei myöskään vaatisi erikoistyökaluja, vaan kaikki huollot olisi mahdollista tehdä laitteen mukana tulevilla työkaluilla. Tämä lisää laitteen huoltovarmuutta ja helpottaa huoltotoimenpiteiden tekemistä kenttäolosuhteissa.

Alumiinin hitsaaminen puolestaan vaatisi erikoistyökaluja ja -laitteita. Hitsaaminen vähentäisi toisaalta rungon painoa, sillä pultit lisäävät muutaman kilon rungon kokonaispainoon. Kolmantena vaihtoehtona olisi ollut juottaminen, joka vaatii hitsausta vähemmän erikoisvälineitä ja on sekä edullinen että kestävä vaihtoehto. Juottaminen on kuitenkin hidasta ja virheiden korjaaminen hankalaa, sillä hitsaamisen tavoin modulaarinen rungon osien vaihtaminen tai huoltaminen ei ole mahdollista. Hitsaus ja juotto eivät ole täysin poissuljettuja vaihtoehtoja tulevaisuudessa, jos modulaarisuuden todetaan olevan tältä osalta turhaa tai tuovan vain vähäisiä hyötyjä.

Rungon valmistaminen alumiinista vähensi kokonaispainoa merkittävästi. Laykka X.2:n 5,8 kg painava koottu alumiinirunko on noin 77 % kevyempi kuin Laykka X.1:n metallirunko. Tämä on merkittävä painon muutos kokonaisuuden kannalta, sillä laitteesta tuli huomattavasti ketterämpi liikkeissään, helpommin siirrettävä ja sille asetetun painovaatimuksen täyttävä.

Alumiini oli Anderssonin diplomityössä havaittu toiseksi paras materiaali runkoa varten. Parhaaksi vaihtoehdoksi havaittiin komposiittiyhdisteistä valmistettu runko, joka on kevyin ja riittävän vahva runkorakenne. Komposiitin haittana on sen korkea hinta sekä valmistukseen tarvittavat muut materiaalit, tilat, aika ja resurssit, jotka olisivat koituneet Laykka X.2:n rungon

valmistuksen aikana liian kalliiksi suhteessa saatuun hyötyyn. Komposiitti soveltuisi lopullisen prototyypin rungon valmistusmateriaaliksi.

Kolmantena merkittävänä muutoksena oli ulkokuoren materiaalin vaihtaminen. Laykka X.2:n ulkokuori valmistettiin alumiinikarbonaatista, kun Laykka X.1:n ulkokuori oli valmistettu polykarbonaatti- (pleksi) ja ABS-levyistä (Acrylonitriilibutadieenistyreeni). Vaikka valitut alumiinikarbonaattilevyt olivat suhteessa ohuempia ja siten kevyempiä kuin polykarbonaattilevyt, ne ovat riittävän kestävä ja vahvat sietämään maastossa syntyvät kolhut ja nirhaamat.

### **3.3.2 Runkoversioon X.3 siirtyminen**

Laykka X.3:en tehdyt rungon maavaran ja akseliston muutokset paransivat laitteen maastoliikkuvuutta. Rungon maavaraa nostettiin niin, että laitteen kokonaiskorkeus lähestyy vaunun alle mahtumisen perusteella määriteltyä maksimimitaansa. Tämä huomioitiin tekemällä rungon rakenteesta toivotuista paikoista pettävä, jolloin törmätessään Laykkan runko kiilautuu vaunun alle.

Pettävät rakenteet asennettiin akseliston vaihdon yhteydessä. Rungon modulaarisuuden ansiosta koko runkoa ei tarvinnut purkaa, vaan tarvittavat osat olivat vaihdettavissa paikalleen. Uuden akseliston myötä renkaat ovat vaihdettavissa maasto-olosuhteisiin sopiviksi, rattaiden välityssuhteet ovat muutettavissa parantamaan vääntöä tai nopeutta ja akseliston osat ovat vaihdettavissa. Ensimmäisen kenttätestin jälkeen tehtyjen havaintojen perusteella valittiin ja asennettiin isommat, leveämmät ja kuvioidut renkaat.

### **3.4 Rungon elektroniikka**

Laykka X.2:een ja X.3:een valikoidut elektroniset komponentit ovat osittain annettujen vaatimusten mukaan valittuja. Osa komponenteista on valittu alustavien kokeilujen perusteella komponentteja vertaillen ja lopulta havainnoimalla Laykka X.1:een asennettujen komponenttien yleistä toimivuutta. Valikoidut komponentit ovat käyneet alustavat testaukset läpi ja edellä annettujen vaatimusten täyttämiseksi komponentteja ja kytkentöjä on vaihdettu siten, että konfiguraatio ei enää täysin vastaa Anderssonin [3] Diplomityössä tehtyä alustavaa suunnitelmaa. Tutkimuksen aikana tapahtuneen kehityksen johdosta esitellään olennaisimmat päivittyneet komponentit sekä niiden valintojen perusteita.

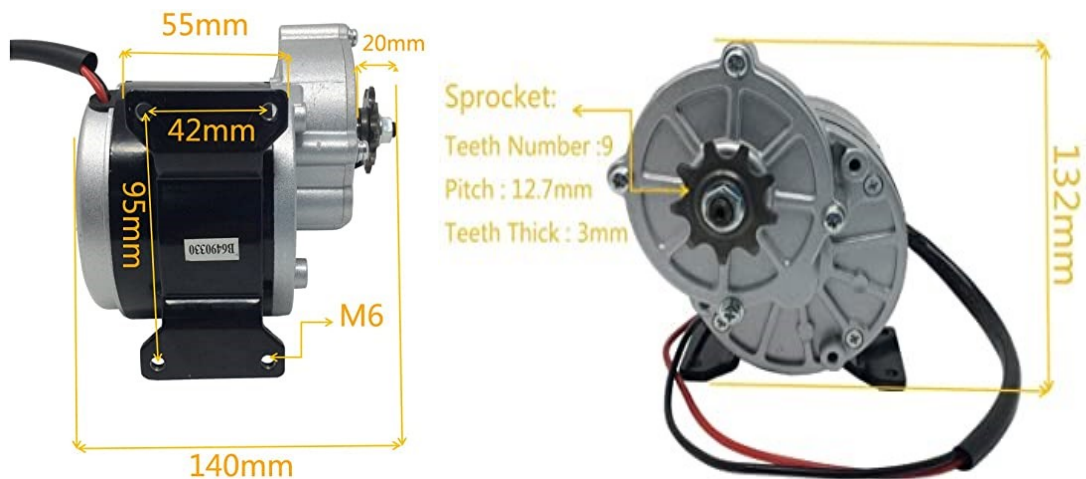
### 3.4.1 Servot, sähkömoottorit, suoraohjausmoottori

Laykka X.2 ja X.3 -runkoversioiden moottoreiksi valittiin molempiin suuntiin pyörivä malli MY1016Z3 350W 24V valmiilla 9.7:1 välityksellä varustettuna. Moottori esitetty kuvassa 9. Kyseistä moottorimallia on laitteessa neljä kappaletta. Moottorit on kytketty voimansiirtokoneistoon ketjuilla. Rattaina toimii moottorin päässä 11 hampainen, ja vetopään päässä 30-hampainen taper lock -hammasratas. Kokonaisvälityssuhde on tällöin 1:26,4. Tämä yhdistelmä tuottaa yhteensä noin 29.5 Nm vääntöä per moottori, mikä tarkoittaa moottorien tuottavan yhteensä noin 118.1 Nm vääntöä.

MY1016Z3 -moottorit valittiin 500W 24V MY1020-moottoreiden tilalle kolmesta syystä. Ensimmäiseksi MY1020-moottoreissa ei ollut vaihteistoa, mikä näkyi heikkona liikkeellelähtönä. Tarvittavan väännön aikaansaamiseksi välityssuhteen olisi tarvinnut olla niin suuri, että voimansiirron päässä olevan rattaan kokoa pitäisi kasvattaa suuremmaksi kuin rungon sisälle mahduttisi. Näin tämä ratkaisu ei palvelisi järjestelmän kokonaistoimintaa toivotulla tavalla.

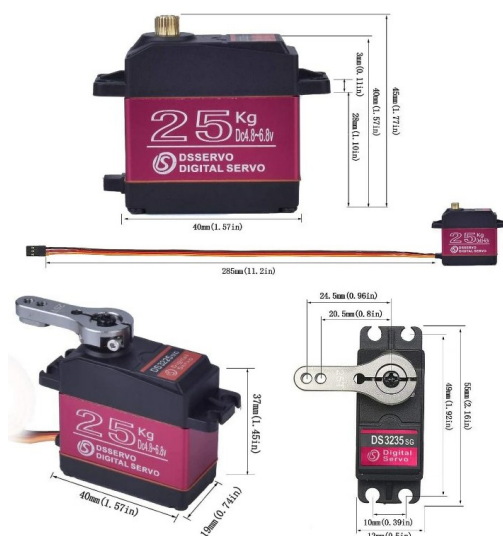
Toiseksi MY1020-moottorit kuluttivat huomattavasti enemmän virtaa ja tarvitsivat suuremman jännitteen. Tämä aiheutti lieveilmiön moottoriohjaimissa, jotka jakavat virran moottoreille ja Raspberry Pille (Rpi). Ilmiö näkyi Raspberry Pin sammumisena tai jumittumisena varsinkin liikkeellelähtöjen ja kiihdytysten yhteydessä, jolloin moottorien tarvitsema virtamäärä kasvaa hetkellisesti niin, ettei tietokone saa tarvitsemaansa virtamäärää. Ongelmaa selvitettiin moottoriohjainvalmistajan kanssa, sillä komponentin valmistajan ilmoittamien teknisten ominaisuuksien perusteella tilannetta ei olisi pitänyt syntyä. Tarkemmat tiedot aiheesta kuvataan moottoriohjaimia käsittelevässä kappaleessa.

Kolmanneksi syyksi voidaan katsoa MY1016Z3-moottoreiden edullisemmän hinnan, mikä palvelee yleistä hintatavoitetta ja -vaatimusta. Näistä syistä johtuen MY1016Z3-moottoreihin vaihtaminen oli perusteltua. Jatkokehityksen aikana on edelleen mahdollista harkita vaihtoehtoiseksi moottorimalliksi tehokkaampia moottoreita, kuten 450W 24V 9.7:1 välityssuhteella oleva MY1020Z.



Kuva 9. Moottori MY1016Z3 [20]

Servomoottoriksi Laykka X.1:stä X.3:en valittiin DS3225mg 180° 25kg. Näillä servoilla on riittävä vääntö- ja kääntösäde, joilla saavutetaan toivottu toiminta. DS3225mg-servo esitetty kuvassa 10. Vaihtoehtoisesti olisi mahdollista käyttää samaa mallia 270° kääntösäteellä. Ohjelmallisesti servomoottorit eivät kuitenkaan voi olla 360° kääntösäteellä varustettuja, sillä 270° kääntösäteen ylittävät servot jäävät pyörimään tai jumittuvat. Nämä havainnot tehtiin Laykka X.1:n ja X.2:n penkkitesteissä.



Kuva 10. DS322mg-servo [21]

Suoraohjausmoottoriksi valittiin Akozon, joka on tehoiltaan 750N 24V. Kyseinen suoraohjausmoottori on todettu ensimmäisessä ampumatestissä paukkupatruunoilla vuonna 2019 riittävän kestäväksi. Se kestää RK 7.62 sarjatulen rekyyliin ja kykenee toimimaan moitteettomasti tämänkin jälkeen. Alun perin kyseinen suoraohjausmoottori on suunniteltu ja tarkoitettu käytettäväksi sairaalasängyissä nostimena. Männän pituudeksi valittiin 25 cm, joka oli Anderssonin diplomityössä [3] aiemmin laskettu sopivaksi pituudeksi. Pituus ja kestävyys ovat osoittautuneet penkkitesteissä toimiviksi ja riittäviksi käytännön sovellutuksiin.

### 3.4.2 Virtalähteet

Virtalähteenä Laykka X.2:ssa ja X.3:ssa käytetään kahta moottoripyörän AGM (absorbent glass mat) akkua. Malli on Exide YIX30L-BS, joka on 12V 430A ja 30Ah ja se esitetty kuvassa 11. Laykkassa nämä kaksi akkua on kytketty sarjaan, jotta saadaan järjestelmän vaadittava 24V jännite. Samalla kyseiset akut kykenevät tuottamaan moottorien ja järjestelmän tarvitsevan, vähintään 58A virtamäärän. Akkujen tuottama ampeerituntimäärä riittää lisäksi täyttämään vaatimuksissa asetetun 2h toiminta-ajan.

Anderssonin diplomityössä [3] valittu 12V 35Ah Black Box Battery (BBB) AGM-akku oli tehoiltaan riittävä, mutta akkumallissa havaittiin puute Laykka X.1 -runkoversion testauksen yhteydessä. Kyseinen akku ei kyennyt tuottamaan tarvittavaa hetkellistä 400A virtamäärää, vaan se tuotti aina tasaisen 35A tilanteessa kuin tilanteessa. Tämä jännitemäärä ei ollut riittävä laitteen tehokkaalle toiminnalle. Tietoa akun tasaista virtaa tuottavasta ominaisuudesta ei ollut saatavilla julkisesti, joten asia selvitettiin yhteydenpidossa akun valmistajan kanssa.

Exide-akulla on sekä haittoja että etuja BBB-akkuun verraten. Akut on esitetty rinnakkain kuvassa 11. Vaikka Exide onkin AGM-akku, se ei ole täysin tiivis. Toisaalta Exide akku on 2kg kevyempi kuin BBB-akku, mikä palvelee koko laitteen suorituskykyä ja Exide-akulla on BBB-akku pidempi käyttöaika. Näistä seikoista johtuen Exide-akun hinta on kalliimpi.



Kuva 11. BBB ja Exide 12V AGM -akut [22] [23]

Lopullisessa tuotantoversiossa on tarkoitus käyttää custom-valmistettua Lithium-ion (li-ion) tai LiFePO<sub>4</sub> (Litium-rautafosfaati) -akkua, joka kykenisi tarjoamaan Exide- ja BBB-akkujen parhaat puolet. Akku olisi mahdollista muotoilla runkoon sopivaksi, akun virta ja jännite olisi suunniteltavissa tapauskohtaiseksi ja akku olisi läikkymätön. Tällainen akku pitää kuitenkin

vielä suunnitella ja laskea sille muodostuva hinta, sillä Laykkalle tarvittavalla virralla ja jännitteellä varustetut li-ion ja LiFePO<sub>4</sub> -akut ovat tilausvalmisteisia. Tällä hetkellä Exide-akut riittävät testien ja konseptin testaamiseen ja samalla akut ovat yksi edullinen vaihtoehtoinen akkupaketti.

### 3.4.3 Kamerat

Laykka X.2 ja X.3-runkomalleissa on kaksi kameraa ja asetelineessä yksi. Kaikki niistä ovat USB-kameroita (Universal serial bus) ja ne tuottavat H.264 videoformaattia. USB-kaapelikiinnitys mahdollistaa modulaarisuuden sekä kameroiden vaihtamisen helposti ja nopeasti ilman erillisten ajureiden asentamista. Näin Laykkaan voidaan asentaa mikä tahansa H.264 videoformaattia tuottava ja USB-kaapelilla toimiva kamera.

Pääkamera on aktiivinen IR-kamera (Infra red). Se on malliltaan ELP 720P H.264 USB kamera, 2.1 mm linssillä ja on esitetty kuvassa 12. Kameran 2.1 mm laajakulmalinssillä laitteen edestä näkyvä alue on riittävän laaja, jotta laitetta kykenee ohjaamaan päätelaitteen kautta. Tämä havainto ja kiinnityspaikan sopivuus ovat vahvistuneet lukuisissa penkkitesteissä ja ensimmäisessä kenttätestissä. Lisäksi kamera mahdollistaa hyvän pimeänäön ja tuottaa hyvälaatuisia videokuvia. Kamerassa on erillinen IR-led valosarja, joka kytkee automaattisesti päälle IR-valot ja kameran pimeänäön. Tämä on tarvittaessa ohjelmoitavissa manuaalisesti.



Kuva 12. IR-kamera mallia ELP 720P H.264 USB [24]

Lisäkameroina rungossa ja asetelineessä toimii 1-2 kpl ELP:n matalan valaistuksen USB-liittimellä toimivaa kameraa. Ne ovat mallia ELP low illumination camera H.264 full HD 1080p with 2.8-12 mm varifocal lens. Kyseisiä kameroita käytetään teollisuudessa koneiden kokenäössä ja niissä on säädettävä linssintarkennus. Toinen kameroista on kiinnitetty Laykkan perään kupolin sisälle, jossa se pääsee kääntymään sivusuuntaisesti. Toinen kamera on kiinnitetty asetelineeseen ja se kääntyy pystytasossa asetelineen kallistuksen mukana. Se on irrotettavissa ja siirrettävissä asetelineessä olevaan aseoptiikkaan kiinni. Kummatkin kamerat tuottavat H.264 videoformaattia ja ovat ”plug and play” -tyyppisiä.

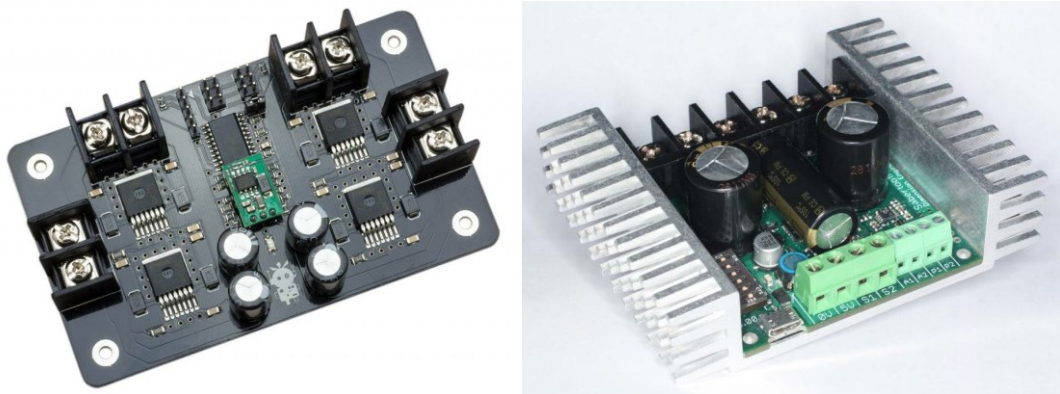


Tarvittaessa Laykka-järjestelmään on mahdollista asentaa Raspberry Pin omia kameroita tai vastaavia Rpin omaa kameraporttia hyödyntäviä kameroita. Testien aikana käytössä oli useampi IR-valolla varustettu Rpi-kamera, mutta kyseisillä kameroilla oli tyyppivikana ylikuumentua ja vioittua nopeasti. Kamerat olivat mallia “MakerFocus Rpi night vision 5MP camera with adjustable focus”. Samalla huomattiin ongelma liittyen Rpi-kameroiden käyttämään 15-pin FFC-kaapeliin, joka vaatii sitä enemmän virtaa mitä pidempi kaapeli on. Rpin ja kameran sijoittelusta sekä kaapelin reitistä johtuen kaapelille tarvittiin yli 1 m pituutta, mikä johti tavallista suurempaan virran tarpeeseen. Kameroiden käynnistymisen yhteydessä lisääntyvä virrankulutus aiheutti satunnaisesti Rpin jumittumisen tai kaatumisen, kun Rpin käynnistymisen jälkeen tai kameranvaihdon yhteydessä kamerat kytkeytyivät päälle. Silloin Rpi ei hetkellisesti saanut riittävästi virtaa omien tärkeiden toimintojen käynnissä pitämiseksi. Tämä ongelma poistui kokonaan vaihtamalla kamerat USB-malleihin.

#### 3.4.4 Moottorihjausyksiköt

Järjestelmästä löytyy kaksi eri moottorihjausyksikkömallia. Näistä ensisijaiseksi valikoitui moottorihjainmalli PiBorg Diablo 55A tuplamoottorihjain Laykka X.1:n ensimmäisen penkitestin jälkeen. Varaohjain ja vertailuun tarkoitettu moottorihjain oli Sabertooth 2x32A (Sabe32) tuplamoottorihjain. Laykka X.2:ssa oli kolme Diablo moottorihjainta kytketty sarjaan, joiden jatkeeksi oli kytketty sarjaan kaksi kappaletta PiBorg Ultraborg servo- ja ultraääniohjainta. Molemmat moottorihjaimet on esitetty kuvassa 13.

Vaikka Diablo valittikin ensisijaiseksi moottorihjaimeksi, molempia kehitettiin rinnakkain. Näin oli mahdollista testata rinnan ohjelmia, varmentaa toimintoja sekä kartoittaa moottorihjaimien eroavaisuuksia ja ominaisuuksia. Rinnakkaistestien avulla on kyetty havainnoimaan ohjelmointivirheitä, kehittämään kirjoitetun koodin robustiutta sekä parantamaan piirikytkentöjä.



Kuva 13. Diablo 55A & Sabertooth 2x32A [25] [26]

Diablo valikoitui ensisijaiseksi moottoriohjaimeksi neljästä syystä. Ensinnäkin Diablo, toisin kuin Sabe32, on kytkettävissä sarjaan ilman erillistä ohjelmointia ja kytkimien asettelua. Diabloon voidaan edelleen kytkeä useita muita moduuleita sarjaan, jotka viestivät I2C (Inter-Integrated Circuit) -protokollan välityksellä.

Toiseksi sarjaan kytkentänsä ansiosta Diablo kykenee tuottamaan riittävän jatkuvan virran Rpille ja muille virtapiireille. Sabe32 kykenee tuottamaan tarvittavan virran vain rajatusti, mikä johtuu sarjaan kytkennän hankaluudesta ja vaaditusta erillisestä ohjelmoinnista. Sabe32:lla on merkittävästi parempi tehonsyöttö moottoreille kuin Diablolla sekä kyky ladata akkuja moottorijarrutuksessa varastoimalla energiaa moottoreilta pyörien pyöriessä vapaasti. Nämä edut eivät kuitenkaan toistaiseksi riitä kompensoimaan moottoriohjaimen heikkouksia. Myös Sabe32:n valmistaja tarjoaa erinäisiä lisämoduuleja, mutta ei Laykkan tarpeisiin.

Kolmanneksi Diabloon voidaan lisätä DC-moottoreita ja askelmoottoreita, mitä Sabe32 ei mahdollista askelmoottorien kytkemistä. Lopulta neljänneksi Diablon valmistaja tarjosi tarvittavat ohjelmistot ja koodit, joilla käytön aloittaminen ja testaaminen oli vaivatonta. Ohjelmoinnin näkökulmasta Diablo on suoraviivaisempi, helpompi, ja valmiita open source koodeja on runsaasti. Sabe32:n ohjelmointiin ja testaukseen tarjotun ohjelmiston koodi on geneerisempi. Käyttöönotto vaatii suhteessa Diabloon enemmän alustamista ja ohjelmointia, vaikka Sabe32:ssa on paljon muita hienoja ominaisuuksia ja ohjausmahdollisuuksia.

Kummassakin ohjaimessa on esiintynyt puutteita ja vikoja, joiden tiimoilta on pidetty valmistajiin yhteyttä. Diablo-ohjaimessa ilmeni virransyötön ongelma käytettäessä 500W moottoreita kovassa rasituksessa. Valmistaja ilmoitti havainneensa vastaavan ongelman ja ehdotti korjausvaihtoehdoksi lisävirtalähteen asentamista rinnan tarjoamaan jatkuvan virransyötteen päätietokoneelle. Tätä ratkaisua ei toteutettu, sillä vastaavaa virransyötön ongelmaa ei ilmennyt 350W moottoreilla. Laskennallisesti ongelmaa ei olisi pitänyt esiintyä myöskään 500W moottoreilla, mutta kyseinen ominaisuus on otettava huomioon haluttaessa siirtyä tehokkaampiin moottoreihin ja käytettäessä Diabloja niiden ohjaamiseen.

Sabertooth 2x32A -moottoriohjaimien valmistajiin otettiin yhteyttä sarjaankytkennöissä havaituista ongelmista. Selkeää, konkreettista vastausta ei kuitenkaan saatu siitä, miten asia tulisi tehdä ja mitä/miten laite pitäisi ohjelmoida. Sabertooth-moottoriohjaimia pidettiin Diablon kanssa rinnakkain päällä ja valmiudessa.

Kenttätestien aikana paljastuivat sekä moottoriohjaimien vahvuudet että heikkoudet. Kenttätestien ansiosta ratkaisu kehittää kummankin moottoriohjaimen ohjelmistoja vahvistui oikeaksi. Diablot eivät soveltuneet loppujen lopuksi ajomoottorien pääohjauspiiriksi, sillä toisessa kenttätestissä yksi Diabloista vikaantui ajon rasituksesta johtuen. Tähän käyttötarkoitukseen Sabertoothit soveltuisivat paremmin.

Päätös jättää Diablot vain apulaitteiden moottoriohjaimiksi ja varaohjaimiksi muodostui toisen kenttätestin jälkeen. Tällä ratkaisulla pystytään edelleen hyödyntämään sekä Diablon vahvuuksia virranjaossa ja käyttölaitteiden ohjaimena, että Sabe32:n tehoa ja energian talteenottoa päämoottoriohjaimena. Ohjelmallisesti tämä ratkaisu on kuitenkin hivenen monimutkaisempi.

Aiemmin tehty pohjatyö mahdollisti vaihdoksen tekemisen, mutta vaati merkittäviä työpanoksia. Sabertoothin ohjelmalliset ja mekaaniset säädöt tuli saada keskenään täysin toimiviksi ennen seuraavan kenttätestin suorittamista, mikä kesti suunniteltua pidempään. Kolmas kenttätesti varmensi päätöksen vaihtaa Sabertooth päämoottoriohjaimeksi hyväksi.

### 3.4.5 Tietokone ja muut sähkölaitteet

Alustavassa suunnitelmassa arvioitiin, että Laykkan runko tarvitsisi toimiakseen 2-3 Raspberry Pi 3B+ tietokonetta. Kun Laykka X.1 rakennettiin, huomattiin 1 Rpi riittäväksi. Tietokoneen päivittämiseen avautui mahdollisuus, kun kenttätesti 2:n aikana vioittuneen Diablon vaihtamiseksi oli purettava elektronisten komponenttien kotelo ja tietokoneen läheiset kytkennät. Tehokkaampi Rpi 4 8GB -tietokonemalli palvelee Laykkan kehitystyötä varsinkin myöhemmässä vaiheessa, kun alustalla aletaan kouluttamaan tekoälyä. Päivitys näkyi yleisenä sulavampana käyttöjärjestelmien käyttönä sekä käynnistymisenä. Varsinaisessa ajo- ja alajärjestelmien käytössä merkittävää eroa ei ollut.

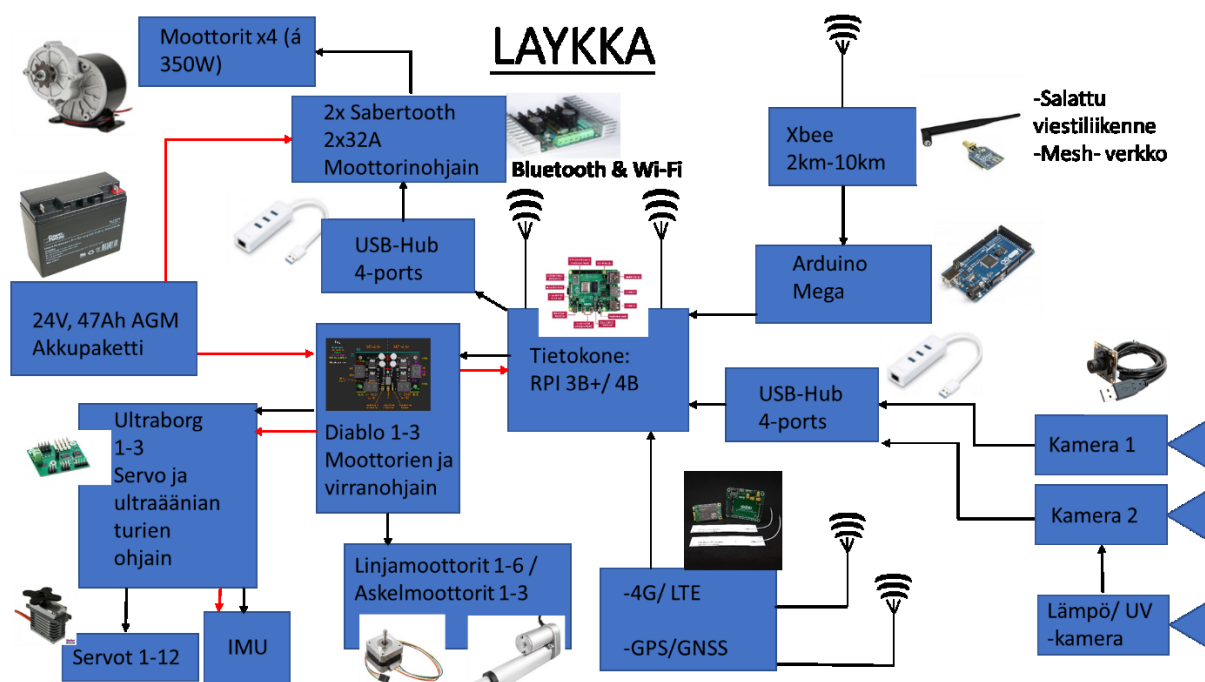
Rpihin on kytketty useita järjestelmiä, jotka saavat virtansa Diablolta Rpin kautta. Arduino Mega -mikro-ohjaimen ja GPS-porttin (Global Positioning System) kytkentöjen toteutus on tehty USB-kaapeleiden avulla. Lisäksi Rpihin on kytketty 2 USB-porttimonistajaa, joista ensimmäiseen on liitetty 2-3 USB-kameraa ja toiseen 2 Sabertooth 2x32A moottoriohjainta.

Uutena lisäyksenä järjestelmään tuli kiihtyvyyden ja asentoanturi IMU (Inertial Measurement Unit), joka kytkettiin sarjaan Diabloon kytketyn Ultraborgin kanssa. Kytkentää on havainnollistettu seuraavan kappaleen kuvassa 14. IMU käyttää I2C-protokollaa lähettääkseen luo-

mansa datan Rpile. Kyseisestä IMUsta löytyy myös kompassi, joka auttaa laitteen operaattoria navigoimisessa.

### 3.4.6 Uudet kytkentäratkaisut

Laykka X.1:ssä sekä X.2:ssa havaittujen vikojen ja puutteiden takia komponentteihin tehtiin luvun 3.4 aiemmissa alaluvuissa kuvattuja vaihdoksia, minkä vuoksi kytkennät ovat myös muuttuneet. Koska komponentit ovat olleet fyysisesti saatavilla, on ollut mahdollista koestaa kytkennät ja tarkastaa niiden yhteensopivuus valmistajien ohjeiden kanssa. Kytkentöjä tehdessä havaittiin useissa valmistajien ohjeissa puutteita ja mittavia epäselvyyksiä. Näistä haasteista selvittiin olemalla valmistajiin yhteydessä ja pyytämällä heiltä tarkennuksia asian suhteen. Lopulta laitteet ja elektroniikkapiirit onnistuttiin kytkemään toisiinsa toimivasti. Penkkitestit ovat osoittaneet laitteiden toimivan keskenään toivotulla tavalla ilman, että mikään piirilevyistä tai moottoreista lamauttaisi koko järjestelmän. Lopullinen yleiskytkentäratkaisu robotin päässä on esitetty kuvassa 14.



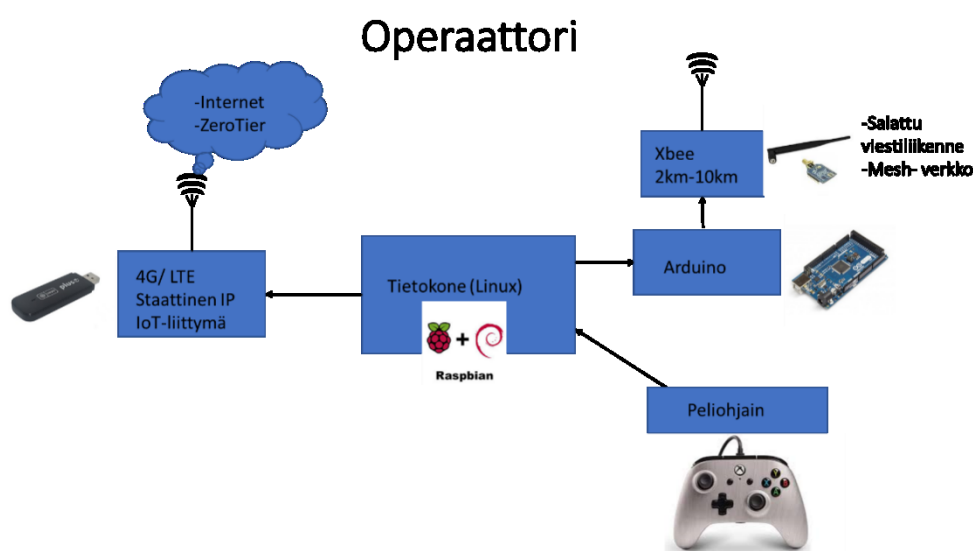
Kuva 14. Laykkan viimeisin laitteiden kytkentäratkaisu robotin päässä

### 3.5 Operaattorin päätelaite ja ohjain

Anderssonin diplomityössä operaattorin päätelaitteeksi oli valittu RaspberryPi 3B+. Laykka X.1:n ensimmäisissä penkkitesteissä havaittiin, että tietokoneen on oltava Rpitä tehokkaampi. Kyseiseen käyttöön valittiin HP 7500 -kannettava tietokone, johon on asennettu Ubuntu-käyttöjärjestelmä.

Ensimmäisten penkkitestien jälkeen Laykkan käyttöjärjestelmää on kehitetty Linux-pohjaiseksi hyödyntäen Ubuntu- ja Rasbian- käyttöjärjestelmiä. Muiden käyttöjärjestelmien käyttäminen on edelleen mahdollista, mutta Ubuntu tai Rasbianin käyttö on suotavaa. Koska järjestelmien rakennus ja käytännön testaus ovat näillä kahdella järjestelmällä tehtyjä, on samalla vahvistettu niitä käyttävän operaattorin päätelaiteen ja robotin toimivan yhdessä.

Operaattorin päätelaitteeksi soveltuu parhaiten Ubuntuä käyttävä kannettava tietokone, jossa on riittävä prosessointikyky käsitellä videotiedostoja ja riittävästi USB-portteja. Tällöin robotilta tulevien videoiden toisto on saumatonta, niiden katsominen olisi mielekäästä ja siten havaintojen teko olisi mahdollista. Riittävän USB-porttien määrän ansiosta tarvittavat laitteet voidaan kytkeä tietokoneeseen ja tilaa olisi vielä muillekin laitteille. Operaattorin päätelaitteen yleiskytkentäratkaisu on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Yleiskuva operaattorin päätelaitteen kytkentäratkaisusta

Operaattorin ohjaimena on kuvan mukaisesti tarkoitus käyttää mitä tahansa kaupallista peliohjainta (PS,Xbox,Wii vast.), joka on varustettu bluetooth yhteydellä tai USB-kaapelilla. Toisittaiseksi operaattorin päätelaite on optimoitu Xbox One -ohjaimelle, mutta se toimii muun muassa muiden Xbox -ohjaimien ja niitä emuloivien ohjainten kanssa. Tulevaisuudessa on tarkoitus kehittää kirjastoa, jotta tarpeen mukaan ohjaimia voitaisiin kytkeä laajasta valikoimasta. Tämä luo päätelaitteeseen modulaarisuutta, helpottaa sen huoltovarmuutta ja parantaa osien saatavuutta, kun hajonnut ohjain voidaan korvata tarvittaessa uudella suoraan yleisten kauppajen tavallisesta hyllyvalikoimasta.

### 3.6 Yhteenveto Laykka X.1-X.3 Laykkan runkomallien eroista

Laykka-järjestelmään kolmivuotisen kehityksenä aikana tehdyt lukuisat muutokset kuvattiin luvussa 3 osa-alueittain. Runkorakenteet kuvattiin luvussa 3.3. ja elektroniset komponentit luvussa 3.4. Pelkän tekstin perusteella voi laajassa kokonaisuudessa jäädä ymmärrettävästi epä-tarkaksi mistä kehitys on alkanut, kuinka pitkälle järjestelmää on kehitetty, mitkä ovat varsinaiset erot runkoversioiden välillä ja miten eri parannukset ovat ajoittuneet suhteessa toisiinsa. Tapahtunutta kehitystä selkeyttämään on laadittu taulukko 4, joka kokoaa runkoversioiden keskeiset piirteet ja erot.

<b>LAYKKA- Autonomous Multi Purpose Ground Vehicle Tutkimusprojekti. Laykka runkojen kehittyminen sekä muutokset Inkrementaalisen kehityksen avulla</b>		
		
<b>Runko malli X.1</b>	<b>Runko malli X.2</b>	<b>Runko malli X.3</b>
<b>Välitysuhde 1:2</b>	<b>Välitysuhde 1:26,4</b>	<b>Välitysuhde 1:26,4</b>
<b>Moottorit 500 W</b>	<b>Moottorit 350W</b>	<b>Moottorit 350W</b>
<b>Moottoriohjain: 2x Diablo 55A, , käyttölaiteille 1x Diablo 55A ja 2x Ultraborg.</b>	<b>Moottoriohjain: 2x Diablo 55A, käyttölaiteille 1x Diablo 55A ja 2x Ultraborg.</b>	<b>Moottoriohjain: 2x Sabertooth 2x32A, , käyttölaiteille 3x Diablo 55A ja 2x Ultraborg.</b>
<b>Tietokone: Rpi 3B+</b>	-	<b>Tietokone: Rpi 4 8GB</b>
-	<b>Parannettu akselisto, supistettu akseliväli</b>	<b>Uusi akselisto ja pyörät sekä niiden kiinnitys</b>
<b>Black Box 35Ah AGM-akku</b>	<b>Exide 30Ah AGM-akku</b>	-
<b>ABS-laahaimet</b>	<b>Parannetut keijunkiristin rullat laahaimien tilalle</b>	<b>Uusi keijun kiristimet ja laahaimet rullaaviksi sekä 3D tulostettaviksi, lisätty keijunkiristysjärjestelmä</b>
<b>Maavara 7 cm</b>	<b>Nostettu maavara + 5cm</b>	<b>Nostettu maavara +5cm</b>
<b>Kameran asentaminen sisälle</b>	<b>Kameran suojuksen asentaminen ulkopuolelle, värähtelyn vähentäminen, ajonäkymän parantaminen</b>	<b>Kamerasuojukset IR-valolle sopivat, heijastuksen vähentäminen ajonäkymän parantaminen</b>
<b>Teräsrunko + ABS ja pleksi kuori</b>	<b>Alumiinirunko ja polycarbonaatti kuori. Kumiliistat</b>	-
-	<b>Kantokahvat, Moduulien kiinnitysten parantaminen</b>	<b>Kantokahvat ergonomisemmin aseteltuna</b>
-	<b>Hätä seis – painike vain ajomootoreille.</b>	<b>Hätä seis –painike kaikille järjestelmille ja myös ohjelmallisesti laadittuna</b>

Taulukko 4. Laykka runkojen ero sekä kehitys

## 4 MAASTOLIIKKUVUUSKYVYKKYYDEN LASKEMINEN SEKÄ MALLINTAMINEN

Maastoliikkuvuutta käsittelevässä luvussa perehdytään laskutoimituksiin sekä matemaattisiin mallinuksiin, joitten avulla voidaan laskea järjestelmän maastoliikkuvuuskyky. Laskettujen mallinnusten avulla voidaan määrittää Laykkan maastoliikkumiskyky, joitten perusteella on yksinkertaista suunnitella hyvä testi ja koe asetelma, joilla voidaan saadut tulokset varmentaa.

### 4.1 Maastoliikkuvuuden mallintaminen

Terramekaniikka perustuu insinööritieteisiin, joissa mekaniikalla ja statiikalla on suuri merkitys. Tärkeätä on muistaa työhön liittyvät käsitteet teho, työ ja voima sekä aikaan ja paikkaan liittyvät käsitteet matka, nopeus ja kiihtyvyys. [27]

Terramekaniikkaan perustuvat viitekehukset helpottavat koesuunnittelua ja saatujen validiteetti on laajempi. Terramekaniikan perusteet ovat maamekaniikassa, mutta sovellutusalat kattavat sekä sota-, maatalous-, metsä-, ja insinööritieteet että kuljetustalouden ja koneenrakennuksen erilaiset tehtävät. [27] Tässä tutkimuksessa hyödynnetään terramekaniikkaan periaatteita sota- ja konerakennuksen kannalta tarvittavin osin.

Koneen liikkuminen maastossa voidaan kuvata kahdella osasysteemillä, jotka välittyvät toisiinsa renkaan tai telan kosketuspinnan kautta. Sekä kone, että maastosysteemi kuvataan yksinkertaistettuina. [27] Tässä työssä keskitytään yksinkertaisimpiin malleihin, sillä monimutkaiset ja dynaamiset mallit vaativat monimutkaisia laskuja sekä mallinnuksia. Laykkasta on luotu simulaatio mallit Anderssonin diplomityön yhteydessä, mutta niissä ei käsitellä maaston ja laitteen välistä toimintaa. Kyseisessä työssä käsitellään laitteen keskinäisiä mekaanisia toimintoja.

Terramekaniikassa tarkastelun kohde voi olla joko jäykkä pyörä tai joustava rengas. Tässä tarkastellaan joustavaa rengasta, jotka Laykkasta löytyvät. Joustavasta renkaasta käytetään termiä ilmarenkas, jolloin teorianmuodostus ja laskelmat ovat yleensä monimutkaisempia johtuen useamman parametrin tarpeesta, kuten esim. rengaspaine, litistymä jne. [27] Pyörä voi olla vapaasti pyöriä, vetävä tai jarruttava [27]. Laykkan osalta kaikki neljä pyörää ovat vetäviä, tällöin vääntömomentti on  $> 0$ . Pyöriin voi kohdistua myös ohjauksesta kohdistuvia sivuttaisvoimia, mutta tässä yhteydessä tyydytään tutkimaan vain vetäviä pyöriä, koska pääosa kuljetuskapasiteettiin vaikuttavista tekijöistä voidaan analysoida näiden avulla [27].

#### 4.1.1 Pyörän pyörimistä vastustavat voimat

Pyörän liikettä vastustavat voimat, kulkuvastus voidaan jakaa kolmeen komponenttiin: rinne-  
vastus, vierintävastus ja estevastukseen. Koneen suorituskykyä arvioitaessa myös kiihdytyk-  
seen tarvittava liike-energian muutos, hitausvastus, inertia, voidaan mieltää vastuksena. [27]

Renkaiden ominaisuuksilla on suuri merkitys koneen liikkumiskykyyn. Koska jäykän pyörän  
ja ilmarenkaan välinen ero riippuu litistymästä, on renkaan muodonmuutosominaisuuksien tun-  
teminen hyödyllistä mallia kehittäessä. Toinen tärkeä tieto on renkaan kosketuspinta-ala, sillä  
sen avulla voidaan laskea keskimääräinen kosketuspaine tai tartunta.

Rinnevastus voidaan johtaa suoraan kaltevan tason tasapainoehdosta. Koska vetävällä pyörällä  
eteenpäin työntävä voima on rinteeseen suuntainen, saadaan rinnevastukseksi:

$$F_G = \sin\alpha * W \quad (1.1)$$

Rinnevastuskerroin on nousun suhde rinteeseen pituuteen:

$$\mu_G = \tan\alpha \quad (1.2)$$

Joista  $\mu_G$  on rinnevastuskerroin,  $F_G$  rinnevastus (N),  $\alpha$  rinteeseen kaltevuus ( $^\circ$ ) ja  $W$  on pyörä-  
kuorma (N).

Koska suomalaiset rinnekaltevuudet ovat keskimäärin alle  $20^\circ$  (=36,4 %) [27] voidaan laskea  
rinnekaltevuus kerroin esitetyllä arvolla. Laykka on suunniteltu lähtökohtaisesti kykenevän kul-  
kemaan  $20^\circ$  rinnettä ylöspäin tasaisella nopeudella [3].

Vierintävastus on pyörän liikettä vastustava vaakakomponentti. Vierintävastuskerroin määri-  
tellään vierintävastuksen ja pyöräkuorman suhteeksi. Vierintävastus johtuu sekä renkaan että  
maan muodonmuutoksiin kuluva työstä. [27] Pyöräkuormalla tarkoitetaan kyseiselle pyö-  
rälle jakautuva systeemin paino, tässä tapauksessa Laykkan paino on suunniteltu jakautuvan  
tasaisesti kaikkien neljän pyörän välillä.

$$\mu_R = \frac{F_R}{W} \quad (1.3)$$

Joista  $\mu_R$  on vierintävastuskerroin,  $F_R$  vierintävastus ja  $W$  on pyöräkuorma (N).

Vierintä ja estevastus tarkasteltuna rinteessä rinteeseen suuntaisesti, tällöin kuorman kompen-  
teiksi tulee  $\cos\alpha * W$ , joka voidaan johtaa suoraan kaltevan tason tasapaino ehdoista. Koska



pyöräajoneuvon kaltevuuksilla (<35 %)  $\text{SIN}\alpha$  voidaan korvata  $\text{TAN}\alpha$ :lla ja  $\text{COS}\alpha = 1$  voidaan yhtälöksi muodostaa:

$$F_T = W * \left( \frac{S}{100} + \mu_R \right) \quad (1.4)$$

Jossa  $F_T$  on kulkuvastus (N),  $W$  pyöräkuorma (N),  $\mu_R$  vierintä- ja estevastuskerroin,  $S$  rinnekaltevuus (%)

Pyöräkuormasta ja maan kantavuudesta riippuen kuormitettu pyörä painuu maahan tiettyyn tasapainosyvyyteen  $z$ . Asiaa voidaan kuvata seuraavalla tavalla: edetessään pyörän on voitettava sama vastustava voima kuin sen noustessa ylös rinnettä, jonka korkeus on  $z$  ja pituus kosketuskohdan ja akselin välinen vaakataisyys. Tässä tapauksessa koska kaikki pyörät ovat vetäviä on voima kuvitellun rinteeseen suuntainen. [27] Pyörän leveydellä on myös vaikutusta vierintävastukseen, sillä kosketuspinta ei ole suora eikä paineen jakautuminen maapohjaan ole aina tasainen, vaikka Gee-Clough'n esitetty empiirinen malli on tarkoitettu jäykälle pyörälle, voidaan se ottaa huomioon myös ilmarenkaallekin, varsinkin jos on hyvinkin leveä rengas kyseessä, arvot ovat tässä kohtaan vähintäänkin viitteellisiä [27]. Gee-Clough'n (1979) mallista saatu kerroin  $(1+1.3*b/d)$  voidaan lisätä vierintävastuksiin, jos halutaan tehdä lasketusta mallista tarkempi.

Ilmarenkas painuu joustavuutensa ansiosta jonkin verran. Tällä on varsinkin iso merkitys suhteessa jäykkään renkaaseen liittyen esteen ylityskykyyn. Renkaan profiili muistuttaa ympyräkaarta, jonka vierintäsäde on suurempi kuin renkaan säde. Samalla painumasyvyydellä ilmarenkaan vierintävastus on pienempi kuin jäykän pyörän. Vetävän pyörän vierintävastus on tällöin:

$$\mu_R = \frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2 - 2z\delta - \delta^2}} \quad (1.5)$$

Jossa  $\mu_R$  on vierintävastuskerroin,  $r$  pyörän säde (m),  $z$  renkaan painauma (m),  $\delta$  renkaan litistymä (m).

Esteylityskykyä arvioitaessa käytetään estevastusmallia ilmarenkaalle. Kyseisessä mallissa lasketaan vain vetävälle pyörälle ylityskyky terävälle esteelle (kanto vast.) ja pyöreälle esteelle (kivi/juuri vast.). Ilmarenkas joustaa kosketuskohdassa, joten tangentti tulee loivemmaksi, tätä voidaan tarkastella teoreettisesti olettamalla joustoksi  $\delta$ . [27] Tällöin saadaan vetävälle ilmarenkaalle seuraavat estevastusyhtälöt:

$$F_H = \sin\alpha * W \quad (1.6)$$

$$\text{Terävä este: } \sin\alpha = \frac{\sqrt{2rh-2r\delta+\delta^2-h^2}}{r-\delta} \quad (1.7)$$

$$\text{Pyöreä este: } \sin\alpha = \frac{\sqrt{2rh-2r\delta-2h\delta+\delta^2+h^2}}{r+h} \quad (1.8)$$

jossa  $F_H$  on estevastus (N),  $r$  pyörän säde (m),  $h$  esteen korkeus (m),  $\delta$  litistymä (m).

Periaatteessa estevastus lisää pyörän potentiaalienergiaa nousuvaiheessa, ja energia vapautuu esteeltä laskettaessa. Vetävä pyörä yleensä pystyy kiipeämään esteen yli pyörä pyörältä. Mikäli koneen kaikki pyörät ovat vetäviä, kuten Laykkan kohdalla näin on, tällöin ei rajoittaviksi tekijäksi yleensä tulekaan estevastus, vaan ajonopeuden hidastuminen, heilunta, vakavuus tai maavara. [27]

Koneen inertia eli hitausvastus lasketaan kaavalla:

$$F^{\wedge} = m * a \quad (1.9)$$

Jossa  $F^{\wedge}$  on hitausvastus (N),  $m$  koneen kokonaismassa (kg) ja  $a$  kiihtyvyys ( $m/s^2$ ). Laykkan kiihtyvyys voidaan tarkastella Anderssonin diplomityössä tehtyjen laskujen ja simulaatioitten perusteella tai mitata kenttätestien aikana, tällöin saadaan laskettua Laykkan todellinen inertia.

Tartunta ( $T$ ), vetokitka on voima, joka kehittyy pyörän ja maapinnan kosketuspintojen välille renkaan pyörimismomentin kasvaessa. Se riippuu pääasiassa maapohjan leikkauslujuudesta. Tartuntaa voidaan tarkastella olettamalla pyörän kosketuspinta jäykäksi laataksi. [27] Tällöin saadaan:

$$T = A * C + W * \tan\phi \quad (1.10)$$

$$\mu_T = \frac{A}{W} * C + \tan\phi \quad (1.11)$$

Jossa  $T$  on renkaan tartunta (N),  $\mu_T$  tartuntakerroin,  $A$  renkaan kosketuspinta-ala ( $m^2$ ),  $C$  maan koheesio (kPa),  $W$  rengaskuorma (N) ja  $\phi$  maan sisäinen kitkakulma.

#### 4.1.2 Järjestelmän liikkumiskyky maastossa

Talviliikennöinnissä voidaan erottaa erottaan kaksi pyörä/maa tilannetta: lumesta vetävä ja lumen läpi kaivautuva. Laykka on tässä tilanteessa pyörien takia lumen läpi kaivautuva. Lumikelkka olisi esimerkiksi lumesta vetävä laite. Koska Laykka on lumen läpi kaivautuva kantavuus ja veto kehittyvät pohjamaasta. Käytännössä ilmarenkaalla teknisen liikkumiskyvyn rajana voidaan pitää lumikerroksen paksuutta, joka on 30 % renkaan läpimitasta. Puoliteloilla ja lumiketjuilla voidaan tartuntaa maapohjasta parantaa, joten lumikerros voi olla paksumpi. [27] Laykkan osalta lumikulkuisuus testataan, jos sääolosuhteet sen mahdollistavat testien ajankohdaksi. Tämä ei ole kuitenkaan välttämätöntä testata osana tätä tutkimustyötä mutta on hyvä ottaa huomioon suunnitellessaan vaatimuksia talvea varten sekä tulevia robotin versioita varten.

Renkaiden kuvioinnilla vaikutetaan merkittävästi tartuntakertoimeen. Rivat lisäävät tartuntaa, jolloin näiden renkaiden tartuntojen suhde on 1,25-1,4 suhteessa sileään. Rivojen merkitys kiihtymällä kitkamaalla on pieni (suhde on 1-1,1). Metsämaastossa ripojen vaikutus on suurin, sillä ne kehittävät lisätartuntaa maaston esteissä, pikkukivistä ja erikokoisista juurista. [27] Tämän perusteella on perusteltua lisätä Laykkaan sellaiset renkaat, joista löytyvät rivat, jos halutaan robottia käyttää metsämaallakin tehokkaasti.

Maastokone tasolla konetta voidaan arvioida teknisen tai taloudellisen suorituskyvyn perusteella. Teknisen suorituskyvyn kriteereinä voidaan pitää go/no-go tilannetta ja taloudellista suorituskykyä arvioidaan koneen tuotoksen avulla. [27] Laykkan tapauksessa on perusteltua tarkkailla pelkästään teknisen suorituskyvyn kannalta, sillä robottia ei käytetä erillisen kuorman lastaamisen. Vaikka se käytännössä kuljettaa kuormaa, on syytä tarkastella kuormaa kiinteänä osana robottia.

Tekninen liikkumiskyky määritetään ”no go” tilanteena, jolloin kone ei pysty selviytymään maastonkohdasta. Tällöin yleensä  $T_{net} < 0$ . Toinen mahdollisuus on, että moottorin vääntömomentti ei ole riittävä. Kuitenkin laite voi selviytyä lyhyistä rinteistä tai kapeista pehmeikköjuonteista liike-energian avulla. Liikuttaessa teknisen liikkumiskyvyn rajaolosuhteissa myös kuljettajan ajotaidoilla ja tavoilla on suuri merkitys. Tästä johtuen absoluuttisia liikkumiskyvyn/kulkukelpoisuuden indikaattoreita ei käytännössä voida asettaa. Tekninen liikkumiskyky riippuu yleensä joko maapohjan kantavuudesta tai rinnekaltevuudesta. Joissakin tapauksissa myös isot kivet ja kannot voivat tulla rajoitteiksi. Talvisin lumi voi rajoittaa teknistä liikkumiskykyä merkittävästi, aina jopa ”no-go” alueeksi. [27]

Koneella on valmistajan ilmoittama maksimikuorma, joka perustuu koneen rakenteelliseen kestävyteen. Käytännössä kuorman kokoa rajoittaviksi tekijäksi voi muodostua tartunta. [27] Maksimi kuorma voidaan laskea nettotartunnan perusteella:

$$F_{net} = (W + L) * (\cos\alpha * (\mu_T - \mu_R) - \sin\alpha) \quad (1.12)$$

Maksimikuorma saadaan asettamalla  $F_{net} = 0$ . Kaavassa  $F_{net}$  on nettovoima (kN),  $W$  koneen paino (kN),  $L$  kuorman paino (kN),  $\alpha$  rinnekaltevuus ( $^\circ$ ),  $\mu_T$  tartuntakerroin ja  $\mu_R$  kulkuvastuskerroin (vierintäkerroin). Taulukosta 5 löytyvät arvot pyörän suorituskykykertoimet.

Maan pinnan kosteus				
Kerroin	Kuiva	Kostea	Märkä	Liejuinen
Vierintäkerroin $\mu_R$	0,11	0,13	0,15	0,17
Tartuntakerroin $\mu_T$	0,55	0,52	0,49	0,46

Taulukko 5. Pyörän suorituskyky kertoimet. [27]

Nettotartunnan avulla voidaan arvioida koneen suorituskykyä. Mikäli nettotartunta on pieni, niin koneen suorituskyky jää alhaiseksi, koska pyörät ”sutivat tyhjäan” hyvin helposti. Tällöin kiinni juuttumisen riski kasvaa ja täten laitteen tehokkuus ja käytettävyys laskee. [27]

Ajonopeudella maastossa on merkitystä laitteen suorituskyvyn kannalta. Voidaan koneen teoreettinen maksiminopeus laskea nettomoottoritehon (pyörätehon) ja kokonaisvastuksen perusteella:

$$v = \frac{P}{F_t} \quad (1.13)$$

Jossa  $v$  on kulkunopeus (m/s),  $P$  koneen pyöräteho (kW),  $F_t$  on kokonaiskulkuvastus (N). Kulkuvastus  $F_t$  on riippuvainen kuormankoosta, rinteiden jyrkkyydestä ja alustan ominaisuuksista. Yhdistämällä kaavat (1.4) ja (1.13) saadaan kulkunopeus seuraavaan yksinkertaisempaan muotoon:

$$v = \frac{P}{W * \left( \frac{S}{100} + \mu_R \right)} \quad (1.14)$$

Jossa  $v$  on kulkunopeus (m/s),  $P$  koneen pyöriteho (kW),  $S$  rinnekaltevuus (%),  $\mu_R$  vierintävastuskerroin ja  $W$  koneen paino (kN).

Jos ei huomioida koneen painopisteen siirtymisestä johtuvat akselipainojen muutokset, sekä oletetaan koneen kaikki pyörät saman kokoisiksi ja painon tasaisesti jakautuneeksi saadaan tällöin muodostettua kokonaisvastus malli (1.15) sekä maksimi ajonopeuden malli (1.16) ilman ohjattavuuden ja heilunnan rajoitemalleja:

$$F = (W + L) * (\cos\alpha * \mu_R + \sin\alpha) \quad (1.15)$$

$$v = \frac{P}{(W+L)*(\mu_R*\cos\alpha+\sin\alpha)} \quad (1.16)$$

jossa  $F$  on kokonaisvastus (kN),  $v$  ajonopeus (m/s),  $W$  koneen paino (kN),  $L$  kuorman paino (kN),  $\alpha$  rinnekaltevuus ( $^\circ$ ),  $\mu_R$  kulkuvastuskerroin. [27]

Metsämaastossa koneen liikkumista rajoittaa moni tekijä maapinnan kantavuuden tai järjestelmän moottoritehon lisäksi. Kyseiset rajoittavat tekijät voidaan asettaa rajoitusyhtälöön alamalleina osaksi varsinaista mallia, jotta tulokset olisivat loogisissa rajoissa. [27] Ensimmäisenä rajoittavana tekijänä on koneen tai järjestelmän maksimikantavuus joka valmistaja on ilmoittanut suurimaksi mahdolliseksi kuormaksi, sekä toiseksi rajoittavaksi tekijäksi pitää asettaa nettotartunta eli vähimmäispito.

$$L < L_{max} \quad (1.17)$$

$$\mu_{Tnet} > 0.10 \quad (1.18)$$

Kolmantena suorituskyvyn rajoitusyhtälö on koneen maavara sekä esteiden määrä neliömetrillä, joita laite joutuu ylittämään tai kulkemaan ylitse. Jos esteitä on harvassa, järjestelmä kykenee pyörä kerrallaan kiipeämään niiden ylitse. Estetiheyden noustessa riittävän suureksi esteitä voi myös jäädä robotin alle, jolloin se voi jäädä pohjastaan kiinni. Esteen rajoitustiheytenä voidaan pitää sitä, ettei pyörien rajoittaman alan sisälle jää maksimikorkuisia esteitä. [27]

$$h < \text{maavara} \quad (1.19)$$

$$N < \frac{l}{l*b} \quad (1.20)$$

Jossa  $h$  on rajoittava estekorkeus (m),  $N$  esteiden lukumäärä/m<sup>2</sup>,  $l$  koneen pituus (m) ja  $b$  koneen leveys (m).

Kaavojen avulla voidaan laskea suorituskyyky arvoja Laykkalle. Taulukossa 6 on esitetty arvo, jotka on saatu yllä esitettyjen kaavojen avulla

Laykkan laskettuja suorituskyyky arvoja, kuiva maa, maastorengas	
Esteylityskyky pyöreälle esteelle (per pyörä, 30 cm korkea este)	210 N
Tarvittava kokonaisvoima 20 asteiseen ylämäkeen 50 kg:n kuormalla	105 N
Kulkunopeus maastossa ilma kuormaa	3,2 m/s (11,4 km/h)
Kulkunopeus maastossa 50 kg:n kuormalla	2,1 m/s (7,7 km/h)
Esteiden lukumäärä	noin 2 kpl/m <sup>2</sup>

Taulukko 6. Laykkan arvoja maastoliikkuvuuden osalta.

Taulukon 6 perusteella voidaan nähdä, että Laykkalla on riittävät tehot liikkua ylämäkeen, maastossa sekä kuormitettuna myös uusilla moottoreilla ja uusilla välityssuhteilla. Voimaa riittää jopa ylittämään renkaan sädettä isompia esteitä. Esteenylityskyvyn pitäisi riittää maastossa, mutta Laykalla on korkea riski jäädä pohjastaan kiinni, jos sen alla on jossakin vaiheessa vähintään kaksi yli 30 cm korkeaa kappaletta. Tämä korostuu liikkussa pehmeässä maastossa.

#### 4.2 MMP ja $CI_L$ -malli

Malli on yleisesti käytössä Iso-Britannian asevoimissa laskentatapana, jolla arvioidaan ajoneuvon liikkumiskykyä kiinteällä (saviperäisellä) maaperällä. [28] [29] Mean Maximum Pressure (MMP) on Rowland vuonna 1972 kehittämä malli, jota Larminie (1988,1992) jatkokehitti. [28] Matalampi MMP arvo ilmaisee pienempää uppoamaa ja täten parempaa ohjattavuutta, nopeutta ja liikennöintiä sekä myös ajettavuutta. MMP yksinään ei tarjoaa riittävää määrää tietoa ajoneuvon liikkumiskyvystä tietyllä maaperällä, joten täydennykseksi voidaan käyttää Limiting Cone Indexiä ( $CI_L$ ). MMP ja  $CI_L$  keskinäistä suhdearvoa voidaan hyödyntää arvioimaan ajoneuvon liikkumiskykyä tietyillä maaperillä. [29] Taulukossa 7 on merkitty MMP arvoja, joiden avulla voidaan arvioida millaisen maasto liikkumiskyvyn ajoneuvo omaa. Taulukko 8 antaa yleisiä arvoja maaperälle, johon saadut MMP ja  $CI$  arvoja voidaan suhteuttaa.

MMP	Erittäin korkea maastoliikkumiskyky	Korkea maastoliikkumiskyky	Kohtalainen maastoliikkumiskyky	Parannettu matalamaastoliikkumiskyky	Alhainen maastoliikkumiskyky
kPa	< 280	280 - 350	350 - 550	550 - 700	>700

Taulukko 7. Liikkumiskyky arvoja. [30]

Luokitus	1.Erittäin hyvä	2. Hyvä	3.Kohtuullinen	4.Huono	5. Erittäin huono
Kuvaus	Erittäin kuiva maa	Kuiva maa	Tuore maa	Kostea	Vetinen
Niemellinen jalan jälki paine, kPa	>200	200 - 70	70 - 40	40 - 20	20 - 0

Taulukko 8. Maan kestävyysluokitukset. [31]

Taulukossa 9 esitetään arvot, jotka vaaditaan pyöräajoneuvolta luisto-ohjauksella. Arvojen perusteella voidaan verrata MMP laskuista saatuja arvoja tähän taulukkoon, jonka avulla voidaan arvioida millaisesta maastosta Laykka voisi kulkea edes kerran läpi.

Olosuhde (kaikissa ohjaustyyppinä luisto-ohjaus)	MMP suorituskyykyjen tasot (kPa)		
	Ideaali	Tyydyttävä	Suurin sallittu
<b>Leuto ilmasto, hienorakeinen maaperä</b>	120	160	240
<b>Trooppinen, märkä maaperä</b>	72	112	192
<b>Eurooppalainen suo</b>	5	10	15
<b>Keidasräme</b>	30	50	60
<b>Lumen päällä</b>	10	25-30	40

Taulukko 9. Vaadittu MMP arvo kPa tankki ohjaukselle eri maaperä tyypeillä. [32]  
[33]

Suoritetaan MMP laskut Laykkalle eri ympäristöille. Ensimmäiseksi lasketaan MMP lasku, jos järjestelmä olisi varustettu Cross country renkailla (maastorenkait, kuvioitua ja kohoimilla varustettuna) kovalla maalla.

$$MMP = \frac{1.18 \cdot W_{Tw}}{2mb \cdot \sqrt{d \cdot h \cdot \sigma}} = 23.212kN/m^2 \rightarrow 23.212kPa \quad (1.21)$$

Hiekkatie, hienosorainen:

$$MMP = \frac{k_l \cdot W_{Tw}}{2mb^{0.85} \cdot d^{1.15} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{h}}} = 30.7824kPa \quad (1.22)$$

Karkea hiekkatie (hiekkainen, kitkainen maaperä):

$$MMP = \frac{S \cdot T \cdot W_{Tw}^{1.3}}{2mb^{1.5} d^{1.5} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{h}}} = 20.4319kPa \quad (1.23)$$

Kaavassa  $W_{Tw}$  on ajoneuvon paino (kN),  $m$  on akselien lukumäärä;  $b$  renkaiden leveys (m),  $d$  renkaiden halkaisija (m),  $h$  kumin paksuus (vanteesta kumin päälle, m),  $\sigma$  renkaan painauma kovalla maaperällä (m),  $k_l$  akselin lukumäärään sekä toimintaan perustuva vakio (tässä tapauksessa 3,65),  $S$  on vakio kaikkien pyörien ollessa (tässä tapauksessa 0.31) ja  $T$  on vakio näppylä cross country renkaille (tässä tapauksessa 2.8). [28] [29]

Voidaan huomata, että MMP arvot vaihtelevat luonnollisesti eri maaperien mukaan sekä renkaan ominaisuuksien mukaan. Arvojen avulla voidaan haravoida mahdolliset minimi- sekä maksimiarvot, joiden perusteella voidaan tehdä toiminta-arvioita.

$CI_L$  on alin arvo, jolla ajoneuvo kykenee ylittämään kyseisen maaston kerran. Seuraava kaava ei ota maaston tyyppiä huomioon vaan keskittyy ajoneuvoon, jonka perustella lasketaan ylityskyky. Riippuen liikkuu ajoneuvo teloilla tai pyörillä, pitää valita siihen sopiva kaava. [28] Koska Laykka liikkuu pääasiassa pyörillä, lasketaan sen  $CI_L$  arvo seuraavalla kaavalla:

$$CI_{L \text{ wheel}} = \frac{1.85 \cdot W_{Tw}}{2mb^{0.8} d^{0.8} \sigma^{0.8}} = 46.3568kPa(1.24)$$

Kaavoista 1.21-1.24 saatujen arvojen vaihtelevat jonkin verran keskenään.

Kun verrataan saatuja arvoja MMP:stä ja  $CI_L$ :stä taulukoihin 7-9, voidaan tehdä seuraavanlaisia johtopäätöksiä Laykkan liikkumiskyvystä:

- Laykka omaa yleisesti erittäin korkean liikkumiskyvyn, kun verrataan saatuja arvoja kaavoista 1.21-1.24 taulukkoon 7. Kaikki MMP- ja  $CI_L$ -kaavoista saadut arvot ovat reilusti alle 280 kPa.



- Laykka kykenisi kulkemaan jopa hyvin kostealla maaperällä, eli vetisellä hiekalla.
- Laykka on ohjattavissa luisto-ohjauksella lähes kaikilla taulukossa 9 esitetyillä maaperillä. Tärkeänä kohtana Suomen keliolosuhteet huomioon ottaen on kyky toimia lumessa. Laskujen perusteella Laykka kykenisi toimimaan ja olemaan ohjattavissa lumessa. Toki on muistettava, että arvot ovat suunta-antavia. Liikkumiskyky ja ohjattavuuden taso lumella onkin selvitettävä kenttätestin avulla, sillä  $CI_L$  arvo on noin 6 kPa yli taulukon 9 suositusarvon.
- Laskujen perusteella Laykkaa ei kannata laittaa suolle toimimaan ainakaan, jos se on varustettu pyörillä. Tällöin olisi suotava asentaa kumitelat pyörien päälle. Tämä vaatisi uusien laskutoimituksien suorittaminen, jotta saataisiin tarvittavat MMP ja  $CI_L$  arvot kumiteloille. Näiden laskujen suorittaminen on kuitenkin tämän tutkimuksen rajauksen ulkopuolella.

Laskujen perusteella Laykka omaa huomattavan maastoliikkumiskyvyn. Tämä johtunee pitkälti robotin suhteellisesta keveydestä, renkaiden koosta ja muotoilusta, nelivedosta sekä suhteellisen korkeasta maavarasta. Laykka voi laskujen perusteella epäonnistua omassa voimantuotossa. Sen hetkiset välitykset, moottoriohjaimet ja moottoritehot eivät riittäisi suoriutuun haastavista maasto-olosuhteista. Suorituskyky on täten testattava kenttätesteillä ja kokeilla, jotta voidaan varmistua robotin suorituskyvystä ja ominaisuudesta. Testiolosuhteiden on oltava hyvin samanlaiset jokaisen testikerran välillä, jotta testikertojen väliset tapahtumat olisivat vertailukelpoiset keskenään. Mahdolliset parannukset tai viat olisi helpompi havainnoida, kun ympäristöolosuhteet saadaan vakioitua. Tästä johtuen Santahaminan urheilukenttä sopeutuisi oivallisesti testi- ja koeympäristöksi. Testiympäristöä tarkastellaan luvussa 5 tarkemmin.

Maastoliikkuvuuden mallinnukset olisi voinut esittää myös visuaalisesti käyrämuodossa ja mallien käyttäytymistä olisi voitu tarkastella yksityiskohtaisesti. Sen sijaan esitettiin kaavat, relevantit sijoitukset ja niistä saadut arvot numeerisessa muodossa taulukoituina, sillä tässä tutkimuksessa maastoliikkuvuusmallinnuksia hyödynnetään käytännön sovellutuksissa. Mallinusten yleinen toimivuus varmennetaan kenttätesteissä. Tämä lähestymistapa tukee Laykka-järjestelmän maastoliikkuvuuskyvykkyuden reunaehtoien määrittämistä.

## 5 TESTIASETTELU

Tässä luvussa esitellään lyhyesti kenttätestien ja kenttäkokeen testiasettelut, joiden toteutus kuvataan luvussa 6. Tässä luvussa pyritään erittelemään mittaustavat sekä testeillä tavoiteltavat tulokset. Kenttätestien oli tarkoitus sisältää 8-rata ja agilityrata, joista toteutettiin 8-rata. Agilityrataa ei voitu tämän tutkimuksen puitteissa toteuttaa moottoriohjaimen ja moottorin vikaantumisen johdosta, sillä näiden vikojen korjaaminen vaati huomattavan työmäärän ylittäen korjauksille ja viivytyksille budjetoidun ajan.

Kaikki kenttätestit sekä kenttäkoe pidettiin Santahaminan saarella Maanpuolustuskorkeakoulun (MPKK) kampusalueella. Kuten luvussa 2 mainittiin, Laykka-AMPGV ei ole vielä saanut LOGLEn toimesta virallisesta hyväksyntää testikäyttöön. Laite ei myöskään ole vielä läpikäynyt valtion virallisia testejä, jotka myöntäisivät tietyn asteisen standardin ja sertifikaatin laitteelle sekä sen turvalliselle käytölle. Tästä johtuen tutkimustyöhön nojaten testit ja kokeet voidaan suorittaa kampusalueella ilman erityislupia, kunhan laitteessa on jonkinasteinen hätäpysäytys, yleinen turvallisuus ei vaarannu eikä suoriteta ampumisia kovilla ampumatarvikkeilla.

### 5.1 8-rata

8-radan tarkoitus on todentaa laitteen maastoliikkumsikyky, todentaa laitteelle asetettu minimiajokantama ja tuoda esiin rakenteiden heikkouksia. Testi on yksinkertainen, mutta kenttätestien ei tarvitse olla monimutkaisia varsinkaan testattaessa yksinkertaisia asioita. Hyvällä testin suunnittelulla voidaan saada hyviä testituloksia näkemättä kohtuuttomasti vaivaa yleisen testiasettelun ja järjestelyjen suhteen. Parhaassa tapauksessa yhdellä testillä voidaan mitata myös useampaa asiaa samaan aikaan. Kappaleessa esitellään 8-radan testiasetelman muodostus.

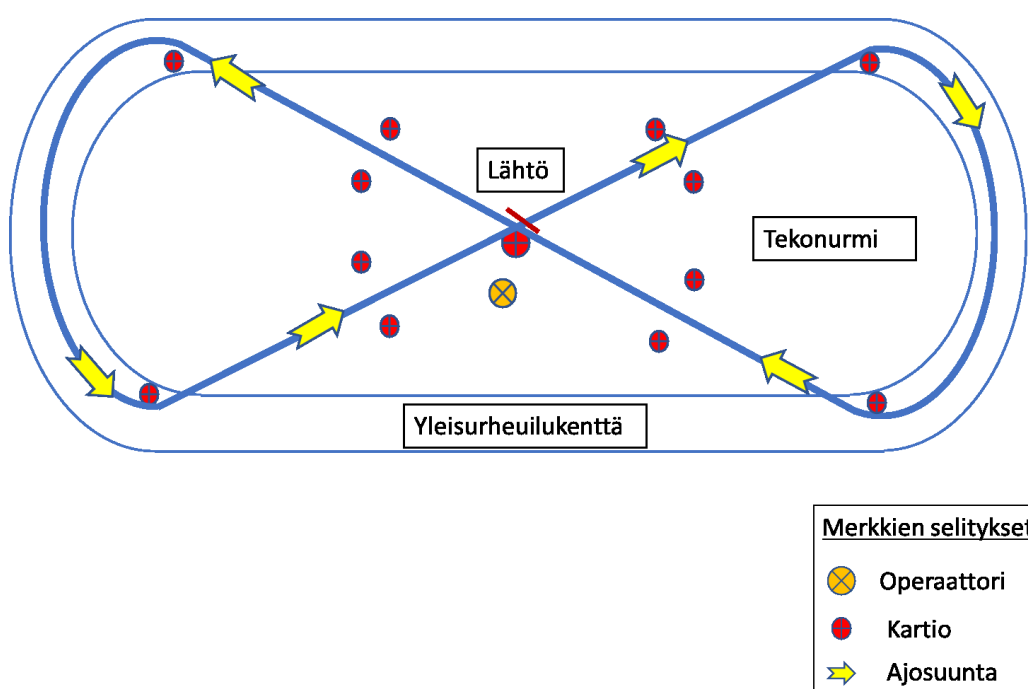
Maastoliikkuvuus-mallinnusten perusteella todettiin Laykkan omaavan huomattavan maastoliikkuvuuskyvyn, joka pitäisi mitata tai todentaa jollakin tavalla. Testiympäristön pitäisi tällöin sisältää useita eri maastotyyppisiä, ympäristön tulisi olla riittävän stabiili, jotta testit voidaan toistaa sekä ennen kaikkea maaston on löydyttävä kampusalueelta. Testirata olisi ideaalitalanteessa mahdollista suunnitella kulkemaan siten, että Laykkan suoriutumista voidaan tarkastella liikuttaessa eri maastotyyppien välillä. Kyseiset vaatimukset poissulkevat mahdollisia testialueita, minkä vuoksi testialueeksi valitaan kampusalueen yleisurheilukenttä.

Kentän alue tarjoaa toivotut eri maastot, kuten ruohikon, ruohoisen mäen, hiekkatien, asfaltti-

tien sekä kivikkoisen mäen. Liikkumiskykyä lumessa testattaisiin alkukeväältä mörössä ja raskaassa lumessa. Kentän rakenteiden vuoksi se tarjoaa säännöllisen ja lähes muuttumattoman testiympäristön, jolloin testien luotettava toistaminen on mahdollista ilman erityisiä järjestelyjä. Tämä helpottaa virheiden etsintää, kunhan olosuhteet testien välillä eivät muutu liikaa. Kentän avulla on myös mahdollista laskea tarkasti ajettu matka sekä akkujen kestävyys tasaisessa ajossa.

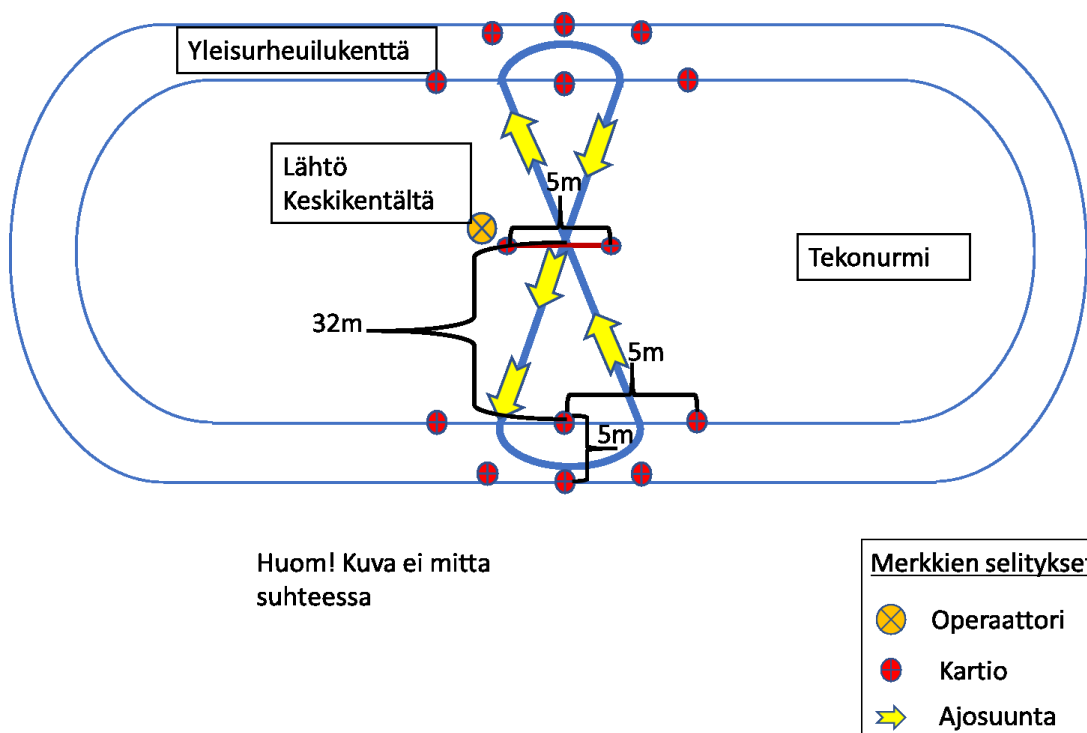
Kentän alue mahdollistaa lisäksi hyvän testiturvallisuuden. Koska kenttä voidaan varata sähköisessä tilojen hallinnassa tarvittavaksi ajaksi, ei testien aikana alueelle päädy ulkopuolisia ja aluetta on helppo valvoa, eikä erillisiä läpikulkueristykksiä tarvitse tehdä. Vaikka alueelle tulisi ulkopuolisia, on heidät helppo havaita laajan näkyvyyden vuoksi ja ohjeistaa heidän oman turvallisuuden vuoksi poistumaan testien ajaksi testialueelta.

Testin tarkoituksena on paljastaa rasituksen alla ilmenevät rakenteiden heikkoudet, joten testi on suunniteltava siten, että rakenteet rasittuvat tarkoituksenmukaisesti. Näin ollen edellä mainittujen vaateiden täyttämiseksi ja jotta testi olisi toistettavissa useita kertoja, järkevin ratkaisu on 8-radan suunnittelu urheilukentälle. Tällä tavalla järjestelmää rasitetaan suorilla tasaisilla kiihdytyksillä, käännöksiin tultaessa hidastuksilla ja käänöksissä toispuoleisesti kumpaakin puolta tasaisesti. Teknisenä huomiona Laykka hidastaa moottorijarrutuksella, eikä laitteessa ole erillisiä jarruja. Äkkijarrutus voidaan tehdä käskemällä liike vastakkaiseen suuntaan. Kuvassa 16 on esitetty ensimmäinen 8-radan asetelma.



Kuva 16. Pitkittäinen 8-rata asetelma.

Ensimmäinen kenttätesti osoitti testiradan soveltuvuuden testaukseen. Rata oli helppo sekä ajallisesti nopea järjestää. Yksi kierros mitattiin urheilumittanauhalla noin 450 metriseksi. Kenttätesti 1:stä saatujen huomioiden perusteella 8-rata oli ratatyypinä hyvä, mutta sen asettelu suhteessa kenttään ei niinkään. Siksi 8-radan asetelmaa muutettiin seuraaviin kenttätesteihin kuvan 17 mukaisesti. Uutta rataa käytettiin kenttätesteissä 2 ja 3.



Kuva 17. Poikittainen 8-rata testiasetelma.

Poikittainen asetelma teki testien järjestämistä entistäkin jouhevampaa. Tällä asetelmalla yhden kierroksen matka on noin 140 m, minkä vuoksi päädyissä tapahtuvat käännökset ovat paljon tiukemmat sekä kiihdytys- ja jarrutusmatkat lyhyempiä. Tämä kuvan 17 mukainen rata rasittaa laitetta enemmän kuin kuvan 15 rata, jolloin mahdolliset viat tulevat esiin nopeammin. Samalla robotin ohjaaminen helpottui merkittävästi, varsinkin operaattorin kokiessa aiemmin laitteen ohjaamisen haastavaksi. Poikittaisella 8-radalla ei myöskään ajolinjasta poiketessa kerry liikaa ylimääräisiä metrejä, joita olisi vaikeata laskea ajomatkaan.

8-radan testien yhteydessä toteutettiin lisäksi mäkiajot. Koska ruohoinen ja kivinen mäki sijaitsee yleisurheilukentän reunassa, ajettiin Laykka ennen varsinaisen testin alkua aina mäkeä alas kivikoista ja ruohoista puolta. Testien päätyttyä Laykka ajettiin taas ylös mäen ruohoista ja kivistä puolta ainakin kertaalleen. Mäen kaltevuus on laskettu olevan noin 20 astetta.

## 5.2 Kenttäkokeen asettelu

Kenttäkokeessa ei luotu 8-rataa tai muuta erikseen rajattua rataa, sillä oli tarkoituksenmukaisempaa viedä järjestelmä käyttöolosuhteiden mukaiseen maastoon. Kenttäkokeen tarkempi asetelma on kuvattu liitteessä 4. Kenttätesteihin verraten kenttäkoetta varten saatiin käyttöön laajempi alue sekä lupa ampua paukkupatruunoilla tarvittavat määrät rungon ja asetelineen kestävyyksien testaamiseksi. Kenttäkokeet suoritettiin Santahaminan saarella valvotuilla alueilla, joilla kokeen aikana ei liikkunut muita ulkopuolisia henkilöitä.

Koetta järjestettäessä on otettava huomioon testeihin käytettävä aika sekä resurssit. Ajan salissa voidaan suorittaa paljonkin kokeita järjestelmälle, mutta hyvien havaintojen saamiseksi on järkevää rajata testattavia asioita. Kokeessa toteutettavat testit kannattaa myös suunnitella sellaisiksi, että ne mittaavat mahdollisimman hyvin mitattavan vaatimuksen täyttymisen. Tästä syystä valittiin kokeessa testattavaksi 7 eri kyvykkyyksivaatimusta. Näitten kyvykkyyksivaatimusten perusteella suunniteltiin 7 eri testiä jokaisen vaatimuksen toteutumisen testaamiseksi mahdollisimman tarkasti. Liitteessä 4 on esitetty tarkemmin testiasetellut sekä testin läpäisykriteerit.

Arvoasteikko on myös määriteltävä koetulosten arvioimiseen sopivaksi. Tässä tapauksessa käytetään binääristä arvoasteikkoa, eli testiosuus joko läpäistään tai ei. Kolmantena asteikkona on mahdollisuus valita ”osittain”, mutta tämä rinnastetaan hylättyyn arvosanaan. Sen tarkoituksena on ilmaista, että ominaisuus on toiminut toivotulla tavalla, mutta ei kyennyt suoriutumaan riittävällä tasolla. Kyseinen binäärinen asteikko on hyvin absoluuttinen, jolloin vaatimuksen on täytyttävä selkeästi.

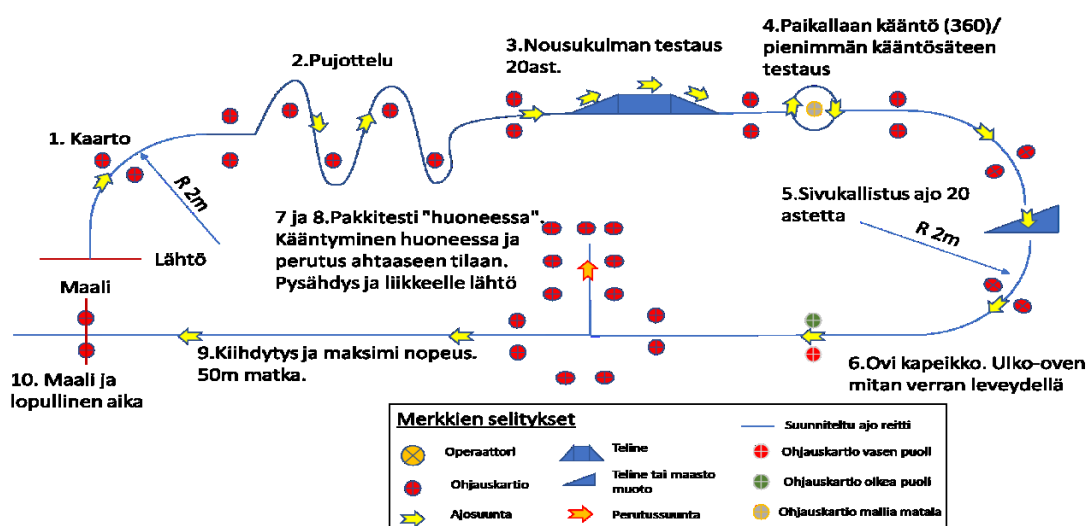
Kokeen ajaksi tutkija jäävää itsensä pois suorituksen arvioinnista. Täten kokeeseen osallistuva muu henkilöstö tekee päätöksen vaatimuksen onnistuneesta täyttymisestä. Tutkija vähentää mahdollista vinoumaa jäävämmällä itsensä päätöksenteosta, jolloin tulokset ovat mahdollisimman neutraaleja sekä todellisia. Tutkija toimii kokeen aikana dokumentoijana sekä operaattorina laitteelle.

## 5.3 Aglility-rata

Osana tutkimusta oli tarkoitus suorittaa voimakkaampi rasisus- ja ohjattavuustestaus. Rata oltiin suunniteltu valmiiksi siinä toivossa, että se oltaisiin päästy testaamaan. Tämän tutkimuksen aikaraameissa sitä ei kuitenkaan kyetty toteuttamaan. Siitä huolimatta radan avulla olisi mahdollista testata myös muita, Laykkaa vastaavia järjestelmiä. Pisteyttämällä suoritukset radan eri

kohdissa sekä kellottamalla kokonaissuoritus voidaan saada keskenään vertailukelpoisia tuloksia eri järjestelmistä.

Laykkan kaltaisille nopeille ja ketterille laitteille ei ole kehitetty STANAG (engl. Standardisation Agreement, vakiointisopimus) tai ISO-standardin (International Organization of Standardization, kansainvälinen standardisointijärjestö) mukaista, kaikille yhtenäistä testirataa. Lähin vastaava testaus on ISO 18646-2:2019(en) standardin mukainen pyörillä liikkuville teollisille roboteille määritelty testaus [34]. Sekään ei kuitenkaan määrittele erillistä standardoitua rataa, vaan miten tietyt asiat tulisi testata. Kuvassa 18 on esitetty ehdotus yhtenäisestä testiradasta nopeille ja ketterille keskikokoisille miehittämättömille ajoneuvoille. Kyseistä rataa olisi myös mahdollista käyttää koulutettaessa henkilöstöä käyttämään UGV-laitteita. Rata olisi mahdollista rakentaa eri maapinnoille tai rata voi vaihtoehtoisesti koostua eri maapinnoista. Tämän lisäksi rata soveltuisi tekoälyn opettamiseen autonomiseen ajoon haastavissa olosuhteissa sekä toimimaan tietyistä merkeistä autonomisesti ja jopa väistämään kohteita.



Kuva 18. Agility rata robottien ketteryys testausta ja henkilöstön koulutusta varten.

## 5.4 Ampuminen

Rungon rakenteiden on kestävä keskeisissä toiminnoissa syntyvä kuormitus, mutta myös murruttava tietyissä olosuhteissa. Ajon ja siirtelyn lisäksi rungon tulee kestää vähintään 100 RK-laukausta ilman toimintaa haittaavien murtumien tai vääntymien kehittymistä. Rungon tulisi kuitenkin murtua kohdatessaan vaunun ja kiilautuessaan sen alle. Tästä syystä ampumatesti on olennaista suorittaa osana tätä tutkimusta.

Toisena testattavana kokonaisuutena on aseteline ja sen yleinen toimivuus. Aseteline on kehitetty Laykkan runkojen kehitystyön ohessa. Testattava aseteline on RK-X.2 versio, josta laadittiin paranneltu versio RK-X.3 kenttäkoikeesta saatujen havaintojen perusteella.

Ampumatesti suoritetaan paukkupatruunoilla, jotka vastaavat sysäyksenvahvistimen kanssa rekyyliltään todellista laukausta. Kovia ampumatarvikkeita ei voida käyttää testissä aiemmin mainituista turvallisuus- ja hyväksyntäsyistä johtuen. Jotta pieni ero saadaan kavennettua ja mahdolliset murtumat tuotua esille, ammutaan kenttäkokeen aikana noin 200 laukausta sarjatulena. RK-moduulilla suoritettu ammunta on kuvattu liitteessä 4.

Aseteline RK-X.2 on ollut käytössä ammuntasuorituksessa paukkupatruunoilla Laykka X.1 rungon kanssa. Ampuminen tapahtui vuonna 2019, jolloin ammuttiin 45 laukausta 15 sarjan sarjatulena. Mitään murtumia tai vääntymiä ei havaittu laitteen rungossa eikä RK-moduulissa. Lisäksi kaikki järjestelmät toimivat ammunnan jälkeen.

## 6 KENTTÄTESTIEN JA -KOEEN TULOKSET

Kuudennessa luvussa käsitellään suoritettut kenttätestit ja -koe, sekä niistä saadut keskeisimmät havainnot. Yksityiskohdat, kuten yksittäiselle testille asetetut tavoitteet ja niissä suoriutuminen, kuvataan työn liitteinä olevissa raporteissa. Testi- ja koeluvut etenevät kronologisessa järjestyksessä, jotta kehitystyön eteneminen testeissä tehtyjen havaintojen perusteella olisi seurattavissa ja miten mahdolliset ongelmakohdat kyettiin abduktiivisella pääteltyllä paikantamaan. Yksittäisiä testi- ja koetapahtumia kuvaavat luvut otsikoitiin päivämäärällä eroteltuja, jotta kehitystyön aikavälien seuraaminen olisi vaivatonta.

Testit olivat erinomainen tapa kehittää järjestelmään. Testit tarjosivat sopivan rennon ja rauhallisen ympäristön havaintojen tekemiseen järjestelmän toiminnasta. Testien avulla voi tehdä hyviä ennusteita siitä, miten järjestelmä tulee pärjäämään kenttäkokeissa. Olisikin perusteltua suorittaa kenttäkoe viimeiseksi, mutta koe suoritettiin jo alkuvaiheessa tutkimusta resurssien ohjauksessa vahvasti tutkimustyötä ja sen suorittamisen järjestystä. Tutkijalla oli hyvä luottamus järjestelmän suorituskykyyn, minkä vuoksi tämä oli mahdollista. Kokeen tulos olisi ollut mitä todennäköisemmin erilainen, jos kenttäkoe oltaisiin suoritettu viimeisenä. Tämä järjestys osoittaa myös sen, ettei kehitystyö lopu kenttäkokeen päättymiseen, vaan jatkuu koetulosten pohjalta oppimiseen ja jatkokehitykseen.

Kenttäkoe on PV:ssä käytössä järjestelmien arviointimenetelmänä valittaessa sopivia järjestelmäehdokkaista osaksi puolustusjärjestelmää ja se on laadultaan absoluuttinen. Kuitenkin kenttäkoe voi olla myös oppimis- ja kehitystapahtuma, kuten se tämän kehitysprosessin aikana oli. Jos kokeen laatua muutettaisiin absoluuttisesta ja täysin karsivasta sallivammaksi sekä kehitystapahtumaksi, olisi hankekilpailujen osaksi mahdollista ottaa myös kesken-eräisempiä järjestelmiä. Tämä avaisi kilpailumahdollisuutta sellaisille järjestelmille, joilla olisi potentiaalia kehittyä merkittävästi sekä uudemmille ja vähemmän kokeneemmille yrityksille. Tällöin PV:lla on mahdollisuus vaikuttaa järjestelmän kehitykseen aiempaa enemmän tehden siitä käyttötarkoitukseensa ja tarpeeseen sopivamman.



## 6.1 Kenttätesti 1 22.11.2020

Ensimmäinen tutkimukseen liittyvä kenttätesti suoritettiin marraskuussa 2020. Tarkemmat kenttätestin tapahtumat sekä järjestelyt on esitetty liitteessä 3. Luvussa käsitellään testin perusteella saadut tiedot sekä sen jälkeen tapahtunutta järjestelmän analysointia sekä kehitystarpeita seuraavaan testiin. Ensimmäinen kenttätesti paljasti useita järjestelmän heikkouksia ja käynnisti Laykka X.3 kehityksen.

Kenttätestit alkoivat sujuvasti, mutta jo ensimmäisen kierroksen kaarteiden aikana oli haasteita havaittavissa. Renkaat eivät pitäneet riittävästi märällä kelillä juoksuradalla. Lisäksi säätämättömät kiihdytykset olivat liian rajuja voimansiirtojärjestelmälle ja erityisesti ketjunkturistimille. Testin aikana ketjunkturistimien vääntyminen häiritsi merkittävästi laitteen toimintaa rasittaen ja kuluttaen sitä. Runkorakenteissa ei ollut mitään silmin havaittavia murtumia tai vääntymiä, mutta rullakiristimissä oli hyvinkin havaittavissa muodonmuutoksia. Molemmat rullakiristimet nimittäin vääntyivät käyttökelvottomiksi. Suoralla ja hallitusti kiihdyttäessä laite toimi toivotulla tavalla ja sen havaittiin olevan hiljainen.

Testin aikana oli käytössä kiila- ja rullamalliset ketjunkturistustyypit. Testien perusteella molemmat kiristimimallit päätettiin uusiksi kokonaan. Kummankin mallin hyvien puolien, eli kiilan kaarevan pinnan ja kovuuden sekä rullan hiljaisuuden ja ketjun kireyden säädettävyyden perusteella luotiin kiilarulla. Kiilarulla tulostettiin SolidWorks-piirrosten perusteella materiaalia lisääväällä tulostimella (3D-tulostin). Kiilarulla tulostettiin käyttäen pelkästään PLA-muovia (Polylaktidi). Tulostus tehtiin 90 % täyteen riittävän lujuuden takaamiseksi sekä riittävän kulumispinnan luomiseksi. Kyseisiä kiilarullia valmistettiin neljä kappaletta kaikkiin voimansiirtoihin.

Samassa yhteydessä päätettiin uusiksi akselisto, sillä huomattiin tarve lisämaavaralle sekä mahdollisuus renkaiden vaihdolle ja siten pidon parantamiselle. Runkomalli X.2:ssa renkaat ovat kiinteä osa akselistoa, jolloin renkaiden irrottaminen ei ole mahdollista eikä näin ollen pitävämpien ja leveämpien pyörökumien vaihtaminen ole myöskään mahdollista. Maastokäyttöön sopivampien renkaiden vaihto alustaviin testeihin riittävien renkaiden tilalle oli tarkoitus tehdä joka tapauksessa. Uusiksi renkaiksi valittiin mönkijän 22x11-8 tuumaiset kuvioidut renkaat. Laskut sekä alkuperäiset suunnitelmat oli tehty kyseisille renkaalle, mutta resurssisyistä johtuen renkaita ja napoja ei pystytty X.2 valmistettaessa hankkimaan.

Renkaiden vaihdon yhteydessä uusittiin renkaiden akselisto, jolloin akselien pituutta lisättiin

10 cm. Tämä lisäveveys parantaa Laykkan sivuttaissuuntaista tukea. Akseleihin tilattiin sopivat pyörännavat. Akselit koneistettiin konepajalla piirustusten mukaisesti, jonka jälkeen ne asennettiin robottiin. Uusien akselien ja napojen ansiosta on mahdollista vaihtaa tarpeen tullen myös maantierenkaat, jos halutaan nostaa hallittavuutta asfalttiteillä - tai ylipäänsä suorittaa renkaiden vaihto tai irrotus säilöntää varten.

Kenttätestin aikana pätkivän ajon toiseksi syyksi paljastui Diablo moottoriohjaimien sisäisen ja ohjelmallinen ominaisuuden päälle kytkeytyminen. Diablot katosivat ("tippuivat pois") järjestelmästä ajon aikana, kun moottoriohjaimien sisäinen EPO (Emergency Power Off, suomeksi: hätä seis) kytkeytyi itsestään päälle säännöllisesti. Syy kyseiselle tapahtumalle ei selvinnyt testien aikana, minkä johdosta asiasta oltiin moottoriohjaimen valmistajan kanssa yhteydessä. Valmistaja kertoi tämän automaattisen EPO:n kytkeytymisen olevan ominaisuus, varsinkin virran kulutuksen ollessa suurta. Valmistaja suositteli automaattista tai itsenäistä EPO:n resetointia ajon aikana. Tämän seurauksena ohjaimen ohjelmoitiin erillinen painike, jonka tehtävä oli kyseisen EPO:n resetointi. Lisäksi resetointi tehtiin ohjelmallisesti automaattiseksi robotin päässä. Moottoriohjainten käyttöä päätettiin jatkaa toistaiseksi ja selvittää seuraavissa testeissä paraniko ajotoiminta muutoksista riittävästi.

Ensimmäisessä kenttätestissä oli 7 testattavaa asiaa, joista kaikki kyettiin testaamaan. Laite kuitenkin kykeni täyttämään 5 testattavaa asiaa. Tarkemmat yksityiskohdat on esitetty liitteessä 3. Vaikka laiteaurioita ja tärkeintä kyvykkyysvaatimusta 1.5 km:n yhtäjaksoisesta ajosta ei kyetty vielä täyttämään, testi osoitti tarvittavat kehityskohteet ja järjestelmän yleisen toimivuuden hyvin.

Ensimmäisen kenttätestin perusteella kyettiin todentamaan seuraava kyvykkyysvaatimus: Laykka kykeni nousemaan 20 asteisen mäen ja laskemaan sen (K20). Täten yksi ehdoton vaatimus täyttyi. On painotettava, että kenttätestin aikana ei ole välttämätöntä, että järjestelmä täyttää heti jonkun vaatimuksen, vaan testin avulla voidaan asettaa osatavoitteita, joilla vaatimus saadaan täytettyä tai kenties ylitettyä. Tässä tapauksessa 2 km jatkuvalla ajolla luodaan varmuus, että kyvykkyysvaatimus K5 ja K20 täyttyy suurella todennäköisellä. Samaten 4 km ajolla varmistutaan jatkuvasta toimintavarmuudesta sekä järjestelmän maksimaalisesta kyvykkyudesta. Muut tavoitteet ovat hyviä virstanpylväitä täyttääkseen muut kyvykkyysvaatimukset ja tekniset spesifikaatiot.

## 6.2 Kenttäkoe 8.12.2020

Kenttäkoe järjestettiin poikkeuksellisesti tutkimuksen alkupäässä, sillä koe oli mahdollista suorittaa kenttäkoejärjestelyjä käsittelevän kurssin projektityönä. Tutkijalla olisi ollut mahdollisuus valita niin monta testattavaa kyvykkyysvaatimusta ja teknistä spesifikaatiota kuin olisi halunnut. Koska varsinaista koetta varten oli kuitenkin varattu yksi työpäivä, kenttäkokeeseen valittiin seitsemän (7) vaatimusta ja suunniteltiin niiden perusteella suoritettavat testit. Kenttäkoe toteutettiin runkomallilla Laykka X.3, joka oli ensimmäistä kertaa testattavana. Kenttäkokeessa testattavat vaatimukset ja niiden kriteerien täyttyminen, koejärjestelyt sekä muut tiedot esiteltä liitteessä 4.

Kenttäkokeeseen muodostettiin 7 testiä, jotka mittasivat jokaisen vaatimuksen erikseen. Testien suunnitteluun käytettiin yksi työpäivä, ja ne suunniteltiin mittaamaan mahdollisimman hyvin kyseistä vaatimusta. Arviointiasteikkona käytettiin KYLLÄ/EI ja OSITTAIN. Osittain-arvosana otettiin käyttöön vain kehitystyötä varten ja rinnastetaan hyläytyyn (EI). Väliarvosanalla viestitään järjestelmän toimineen toivotulla tavalla, mutta se ei kyennyt täyttämään vaatimusta.

Kokeen lopuksi koeryhmälle suoritettiin avoin kysely, jonka tarkoituksena oli kerätä havaintoja järjestelmän jatkokehitystä varten. Kerätyt havainnot ja ehdotukset, kuten ketjuvetoisesta voimansiirrosta vaihtamisen hihnavetoisiksi, palvelevat vaihtoehtoisina ratkaisuuina, jos nykyiset järjestelmät eivät tulevaisuudessa täyttäisi tehtäviään.

Kenttäkokeen tulosten perusteella voidaan todeta konseptin olevan toimiva kokonaisuus, vaikka järjestelmä vaatii vielä jatkokehittämistä. Kenttäkokeen seitsemästä vaatimuksesta järjestelmä suoriutui neljästä (4) täysimääräisesti ja kolmesta (3) osittain. Kaikista järjestelmälle asetetuista vaatimuksista täyttyneet ovat K11, K25, K26, K29, K14 ja K19. Osittain täyttyi K22, K8, K23 ja K27, jotka rinnastetaan hylätyiksi. Täten ainakin näitä osatekijöitä pitää kehittää ja tarvittaessa suunnitella uudelleen. Käytännössä tämä tarkoittaa, että takakameran kääntösädettä pitää parantaa asentamalla tehokkaampi servomoottori. Rakenteiden kestävyys suhteen voimansiirron ketjunkiristimiä pitää kehittää entisestään, jotta ne kestävät ajoa suunnitellulla tavalla.

Konsepti oli toimiva, mutta kokeen aikana havaittiin muutamia kehityskohteita. Ensimmäinen kiireys ketjussa ei pysynyt samana kiertosuunnan vaihtuessa esimerkiksi peruttaessa. Siksi ketjua oli kiristettävä entisestään, mutta sitä piti kiristää myös ylhäältä päin, jottei ketju löystyisi pyöriessään peruttaessa toiseen suuntaan. Ylhäältä päin kiristäminen poistaa myös ketjun aaltoilun

ja siitä johtuvan ketjun ”hyppäämisen” pyörimissuunnan vaihtuessa. Toinen havainto selittää, miksi vaatimus K27 ei täyttynyt. Kokeen aikana tapahtunut ohjausvirhe vioitti voimansiirtokoneistoa sellaisella tavalla, että tutkija ei halunnut rikkoa sitä enempää, vaan esitti että ajoa ei testata kokeen aikana enempää. Ohjausvirhe johtui yksinkertaisesti siitä, että järjestelmässä ei ollut toimivaa kiihdytyksen ja hidastuksen tasausta, vaan järjestelmä tuotti lähestulkoon heti maksimaallisen väännön. Varsinkin hidastaessa järjestelmä suoritti lukkojarrutuksia. Voimansiirtojärjestelmät eivät olleet suunniteltuja kestämään tämän tapaista suurienergistä hallitsematonta äkkipysähdystä.

Kenttäkokeen tulosten pohjalta tunnistetut Laykka X.3:n kehityskohteet ohjasivat kokeen jälkeistä kehitystyötä. Ensimmäiseksi kiihdytys- ja jarrutusohjelmien kehittäminen nostettiin suurelle prioriteetille, jotta tuotettavat voimat olisivat seuraavissa testeissä paremmin hallittavissa ja ajettavuus paranisi. Tämän ohjelmistokehityksen tueksi ketjunkturistimien kiilarullaan rakennetta muutettiin myös ylhäältä päin kiristäväksi. Toiseksi RK- moduulin laukaisujärjestelmää kehitettiin muun muassa lisäämällä siihen varmistin, jolloin muodostui RK-moduuli RK-X.3. Kolmanneksi parannettiin käyttöliittymän näkymää ja käyttöä operaattorin päätelaitteella. Parannuskohteet määriteltiin kenttäkokeesta ja kyselystä saatujen havaintojen perusteella. 5 opiskelijaa kehitti käyttöliittymää kurssityönä vaatimusten mukaiseksi. Opiskelijoiden eteni heitä varten Jyväskylän ammattikorkeakoulun (JAMK) IT Instituutin opintojaksolle TTOS1000+TTOS1200 kenttäkokeen johdannaista luodun projektitoimeksiannon mukaisesti. Käyttöliittymän kehitys on osa tekoälyn kehitystä.

### **6.3 Kenttätesti 2 3.4.2021**

Kenttätesti suoritettiin ensimmäisen kenttätestin perusteella muokatulla, kuvan 17 mukaisella radalla. Kenttään nähden poikittaisen radan havaittiin luvussa 5.1 esiteltyjen perustelujen lisäksi helpottavan laitteen ohjaamiseen totuttautumista ja ajamista, mikä vapautti operaattorin keskittymään robottiin ja sen eri toimintoihin. Seuraavissa testeissä tullaan käyttämään samaa rataa ja asetelmaa. Kenttätestin tapahtumat sekä tavoitteet kuvataan tässä luvussa yleisellä tasolla ja yksityiskohtaisesti liitteessä 6.

Laykka X.3 täytti kenttätestissä vaatimukset K2 ja K3 sekä osittain vaatimuksen K5. Testissä pystyttiin varmentamaan maastoliikkuvuusmallinnusten tulokset lumessa, sillä Laykka X.3:n maastoliikkuvuuskyky riitti muun muassa noin 50 cm korkean lumikinoksen ylittämiseen ja lumisen mäen kulkemiseen ylös- ja alaspäin. Kenttätestiä varten tavoitteeksi oli asetettu 2 km yhtäjaksoinen ajomatka ja 4 km kokonaismatka, jotka eivät täytyneet. Ajettu kokonaismatka

olisi teknisesti riittävä täyttämään ehdottoman K5-vaatimuksen (1,5 km), mutta voimansiirron ongelmien ja toisen moottoriohjaimen vikaantumisen vuoksi Laykka X.3:n toimintavarmuus ei ollut riittävä vaatimuksen määrittelemiseksi hyväksytyksi.

Voimansiirron ongelmat esiintyivät ketjujen hyppimisen aiheuttamana kovaäänisenä paukkeena. Päivitetty ketjunkiristinmalli (kuva 19) todettiin toimivaksi, sillä se onnistui pitämään ketjut noin 3 kierroksen verran kireinä kaikilta puolilta. Testin aikana ketjujen hyppimisen syy kyettiin paikantamaan voimansiirtojärjestelmän etuoikeaan osaan. Siellä sekä ketju että moottorin kiinnitykset olivat löystyneet päästäen moottorin joustamaan sallittua enemmän. Ruuvien tärinästä johtuvan löystymisen ehkäisemiseksi moottorin kiinnitysruuveihin lisättiin pulttilukkoainetta ja tilanteen kehitystä tarkkailtiin seuraavan testin aikana.



Kuva 19. Ketjunkiristin mallia 3, 3D-tulostettu PLAsta sekä rullat Nylonista.

Kenttätestin aikana tapahtuneen Diablo-moottoriohjainpiirin vioittumisen syytä selvitettiin kenttätestin jälkeen suorittamalla erillinen penkkitesti. Syy löydettiin, kun mittaamalla virran-kulkua piirin eri osissa havaittiin vioittunut moottoriohjaimen BTN8982-mallinen H-silta. Vika ei jättänyt silmin havaittavia jälkiä, minkä vuoksi sitä ei ollut mahdollista dokumentoida kuvallisesti. Koska tarkkojen jännitemittausten tekeminen ei ollut mahdollista testin aikana, ei myöskään ole mahdollista määritellä yksiselitteistä H-sillan vioittumisen aiheuttajaa.

H-sillan vioittumiselle on määriteltävissä 3 potentiaalista tekijää, jotka ovat voineet vaikuttaa yksin tai yhdessä. Ensimmäiseksi määrässä lumessa toimiminen on saattanut olla liian rasittavaa moottoriohjaimelle, joka ei olisi kyennyt käsittelemään jatkuvalla syötöllä riittävän suuriamääriä. Toiseksi vikaantumisen voi olla mahdollinen valmistusvika, jonka takia kyseinen H-silta olisi ollut heikkolaatuinen. Valmistusvian mahdollisuuden viittaa tutkijan aiemmat kokemukset, sillä saman sarjan Diabloja ja H-siltoja on vioittunut Laykka X.1:n penkkitesteissä. Kolmas potentiaalinen syy on, etteivät Diablo-moottoriohjaimet kykene käsittelemään re-

genoivaa ajoa riittävällä tasolla. Se tarkoittaisi moottorinohjainten olevan kyvyttömiä siirtämään moottoreilta hidastuksen aikana syntyvää sähköä takaisin akuille, jolloin mahdollisesti syntyvistä virtapiikeistä ensimmäinen vioittuva osa olisi H-silta.

Päämoottorinohjain päätettiin vaihtaa Sabertooth 2x32:een riippumatta H-sillan ja edelleen Diablon vioittumisen täsmällisestä syystä. Edellä kuvattujen ongelmien pitäisi poistua vaihdoksen myötä, sillä Sabertoothit kykenevät varastoimaan regeneroitua energiaa. Diablot jätettiin käyttöön käyttölaitteiden virransyöttäjänä ja käyttölaitteiden moottoriohjaimena. Moottorinohjainten rinnakkaiskäyttö on mahdollista, mutta vaatii asetusten säätämistä sekä moottoriohjainten tarkkaa ohjelmointia.

Sabertoothiin vaihtamisen yhteydessä oli käytännöllistä päivittää Raspberry Pi 3B+ -tietokone Pi 4 8GB -malliin, sillä komponentit sijaitsevat rungon sisällä samassa suojakotelossa. Päivityksen myötä järjestelmän yleinen suorituskyky paranee, mikä tukee tulevien lisäjärjestelmien, ohjelmien sekä ennen kaikkea tekoälyn integrointia järjestelmään. Viimeiseksi vaihdettiin vielä etukameran suojus. Uusi suojus ei taita kameran videokuvaa eikä uusi suojuksen lasi heijasta infrapunavaloa, mikä parantaa videokuvan laatua pimeällä ja hämärällä.

#### **6.4 Kenttätesti 3 23.07.2021**

Viimeisessä kenttätestissä saavutettiin toivottuja tuloksia. Laykka X.3:n toiminta ei lamaantunut ja ajoa kyettiin jatkamaan yli vaaditun, vaikka ketjujen löystymisestä johtuvasta ketjujen hyppimisestä ja siitä aiheutuvasta äänestä ei vielä päästy eroon. Kolinan syy kuitenkin paikantui testin aikana vääntyneeseen moottorin siivekkeeseen, jonka huoltotöiden yhteydessä oli mahdollista varmistaa rungon rakenteiden säilyneen ehjänä. Lisäksi testin aikana tehtiin havaintoja jyrkän ylämäen lähestymisestä sivusuunnasta, jolloin sulavan etenemisen varmistamiseksi kuljettajan olisi syytä ylläpitää reipas lähestymisnopeus.

Kenttätesti aloitettiin ajamalla Laykka X.3 juoksuradan parkkipaikan mäen kautta testipaikalle ja loppuvaiheessa samaa reittiä takaisin. Mäki ajettiin alas kivistä puolta ja testin päätteeksi mäkeä ajettiin ylös kahdesti, ensiksi ruohikkoista puolta ja sitten kivistä puolta pitkin. Vaikka nousut ja laskut onnistuivat kyllä sujuvasti ja ilman erityistä sutimista, tulokulman havaittiin olevan huomionarvoinen tekijä jyrkkää mäkeä lähestyttäessä. Erityisesti jyrkässä tulokulmassa kaikki Laykka X.3:n renkaat eivät pysy maakontaktissa, koska runkomallin yleinen jousitus on toteutettu renkaiden paineiden säädöllä erillisen, kaikkia renkaita jatkuvasti maata vasten pai-

navan jousituksen sijaan. Kaikkien pyörien ollessa vetäviä Laykka X.3 ei pysähdy, vaikka jotkin pyörät menettäisivät hetkellisesti maakontaktin. Jotta eteneminen olisi sulavaa ja kaikkien renkaiden pito taattua, sivusuuntainen lähestyminen jyrkkään mäkeen vaatii huomattavasti enemmän vauhtia kuin kohtisuora lähestyminen, sillä suurempi liikenopeus helpottaa saamaan kaikki renkaat takaisin maakontaktiin.

Itse kenttätestissä Laykka X.3:lla ajettiin yhtäjaksoisesti 18 kierrosta, eli 2,5 km ja kokonaismatka oli 4,2 km. Parantunut mekaaninen toimintavarmuus saavutettiin moottorinohjainten vaihdon ansiosta. Yleistä ajettavuutta heikentää vielä kameran ja äänen 1 s viive, yhteyskatkokset sekä kartan toiminnan haasteet. Näitä ohjelmistoon liittyviä kehityskohteita painotetaan tulevassa kehitystyössä, joka ei enää kuulu tämän tutkimuksen piiriin. Kenttätestin tapahtumien tarkempi kuvaus on luettavissa liitteessä 7.

Kenttätestin lopuksi varmistettiin Laykka X.3:n toimintakyky tilanteessa, jossa laite on ollut valmiustilassa pitkäkestoisen ajon jälkeen. 8-radan suorituksen ja mäkiajojen jälkeen Laykka X.3:a pidettiin valmiustilassa 15 min ajan. Valmiustilassa kamerat lähettivät dataa ja Laykka X.3 otti vastaan dataa. Tämän jälkeen Laykka X.3:lla suoritettiin lyhyt, noin 50 m siirtyminen parikkipaikalla. Näin osoitettiin Laykka X.3 täyttävän vaaditun kyvyn toimittaa kuormansa perille, vaikka se olisi ollut odottamassa valmiustilassa loppusiirtymäänsä.

Testin aikana Laykka X.3:n kovaäänisen kolinan syy paikantui taipuneeseen moottorin kiinnityssiivekkeeseen. Taittunut siiveke oli noin 3 mm koholla, eikä istunut tasaisesti kiinnityspalkkia vasten. Tämä ylimääräinen väljyys päästi moottorin joustamaan ja aiheutti ketjun löystymisen. Löystynyt ketju puolestaan pääsi hyppimään ja aiheutti kovan äänen, jonka perusteella voimansiirron ongelman voidaan päätellä korostuneen käännöksissä, eikä sitä esiintynyt tasaisesti suoraan ajettaessa.

Moottorin siiveke oli taipunut jo Laykka X.2 -runkoversion rakennuksen alkuvaiheessa, sillä suurin osa moottorien siivekkeistä oli taipunut kuljetuksen aikana. Siivekkeiden oikaiseminen onnistui muiden, paitsi yhden moottorin osalta. Koska varamoottoreita ei ollut silloin saatavilla, kyseinen moottori päätettiin asentaa ja jäädä tarkkailemaan siitä mahdolliset syntyviä vikoja.

Vaikka vääntynyt siiveke oli tiedossa, ongelman syyn paikantaminen oli ongelmien kerääntyessä hankalaa ilman systemaattista poissulkemista kenttäkokeiden avulla. Vääntynyt moottorin kiinnityssiiveke korjattiin tilaamalla uusi vastaavanlainen moottori tilalle, joka sekin saapui

vääntyneenä perille. Vasta toinen, eri toimittajalta tilattu korvaava moottori tuli riittävässä kunnossa perille.

Moottorin vaihtamiseksi Laykka X.3 purettiin osiin testin jälkeen, mikä mahdollisti rungon ja osien kestävyys tarkastamisen, huoltotyöt ja tarvittavien muutosten tekemisen. Suurin havaittava kuluminen oli tapahtunut etuoikeapuoleisen moottorin hammasrattaissa johtuen jatkuvasta ketjujen hyppimisestä. Koska uutta hammasratasta ei ollut saatavilla huoltotöiden aikaan eikä kuluma ylittänyt sallittuja rajoja, rataan uusiokäyttö oli perusteltua. Siten sama ratas päätettiin asentaa tilapäisesti takaisin, kunnes uuden hammasrataan teettäminen olisi mahdollista. Kuluneen hammasrataan tilaa seurataan ja sitä tiedetään epäillä syyksi, jos ketjujen hyppiminen lisääntyy uudelleen.

Purkamisen yhteydessä runko tarkastettiin mahdollisten rakenteellisten murtumien varalta. Vastoin tutkijan odotuksia missään rungon rakenteissa ei ollut silmin havaittavia taittumia, murtumia tai venymiä. Sen sijaan osa moottorien kiinnitysruuveista oli löystynyt tai irronnut ajon aikaisesta tärinästä. Kiinnitysruuvien löystymisen ehkäisemiseksi kaikkiin sellaisiin ruuveihin lisättiin ruuvinlukitsinta, joissa sitä ei aiemmin ollut.

Toinen kestävyydellään odotukset ylittänyt komponentti oli PLAsta materiaalia lisäävällä tulostuksella valmistettu (3D tulostettu) ketjunkturistin. Näiden ketjunkturistimien kiilat olivat kestäneet ainakin 6 km ajomatkan, jonka aikana kiilojen pinta oli kulunut ketjujen kohdalta vain noin 1 mm verran. Tämä osoittaa PLAsta tulostetun osan voivan soveltua käyttöön voimansiirtokoneistossa, kun osa on tarkoin valittu ja toteutus suunniteltu huolellisesti. Koska PLAta voi tulostaa koti- 3D tulostimella, valmistusmenetelmällä on mahdollista saavuttaa merkittäviä säästöjä osien hankinta- ja tuotantokustannuksissa.

Laykka X.3:n osien huoltamisen lisäksi ketjunkturistimiin tehtiin pieni lisämuunnos. Ketjunkturistimiin lisättiin jousi, joka painaa jatkuvasti päällimmäisintä kiilarullaa ketjua vasten luoden ”automaattisen” ketjulisäkiristyksen. Tämän muutoksen tekeminen oli mahdollista vain huoltotöiden yhteydessä, kun osia oli purettu riittävästi edestä pois.

Kenttätestin perusteella kriittisin K5-vaatimus täyttyi, jonka Laykka X.3 ylitti huomattavasti. Samalla toiminta-ajan osalta täyttyi K14-vaatimus, sekä jo kenttäkokeessa täyttynyt standby-toimintaan liittyvä K19-vaatimus varmennettiin uudelleen. Laykkan jokaisella testikerralla paranevaa toimintavarmuutta voidaan pitää osoituksena inkrementaalisen kehityksen toimivuus-



desta. Tämä ei kuitenkaan tarkoita Laykkan olevan täysin valmis, vaan osoittaa konseptin olevan yleisesti toimiva. Samalla inkrementaalisen kehitysmallin toteuttaminen on muodostanut jatkuvasti tarkentuvan käsityksen robotin rakenteiden ratkaisujen toimivuudesta ja heikkouksista.

## 6.5 Panssarimuseo demonstraatio 18.10.2021

Parolan panssarimuseolla suoritettiin pienimuotoinen toimintademonstraatio, jota varten paikalle tuotiin toimiva BMP-1 vaunu. Demonstraatiolla haluttiin osoittaa konseptin toimivuus: miten Laykka vaanisi vaunun alle, miten se kykenee lähestymään kohdettaan eri kulmista, miten se nousisi ojasta tai mäkeä pitkin hyödyntäen vaunun sokeita kulmia, miten vaikeata Laykka on havaita vaunusta ja miten vaikeata sen torjuminen on, kun aseiden alakoero ei ole riittävä. Kuvasssa 20 on esitetty yleinen kokosuhde ja Laykka X.3:n lähestyminen kohti kohdevaunuaan.



Kuva 20. Laykka X.3 vaanimassa ojasta BMP-1 vaunua sekä nousemassa mäkeä ylös.

Tapahtuma päätettiin sisällyttää tähän tutkimusraporttiin esille kahdesta syystä. Ensimmäiseksi sääolosuhteet olivat haastavat, sillä sade oli kastellut ruohikon mäkisessä maastossa. Näissä olosuhteissa olisi mahdollista varmentaa maastoliikkuvuuden mallinnuksien oikeellisuus. Toiseksi demonstraation aikana kyettiin varmistamaan Laykkan rungon murtuvan suunnitellusti tietyistä kohdista, jotta se kiilautuisi vaunun alle ennen räjähdystä.

Ruuhoinen ja mäkinen maasto oli demonstraation aikana liukas, sillä ennen demonstraatiota oli satanut reilusti vettä ja sen aikana sade jatkui vähäisenä. Näissä liukkaissa olosuhteissa oli mahdollista testata Laykka X.3:n maastoliikkumiskykyjä ja varmentaa maastoliikkuvuusmallinnuksia uudessa ympäristössä. Ei ollut syytä epäillä, ettei Laykka X.3 kykenisi nousemaan vaihtelevan liukasta ruohoista mäkeä pitkin vaunun alle. Laykka X.3 nousikin sujuvasti mäkeä ylösoseita kertoja eri suunnista ja eri lähestymiskulmilla, sillä edellisen kenttätestin perusteella ajaja osasi yhteensovittaa lähestymisnopeuden ja -kulman asianmukaisesti.

Rakenteiden törmäyskestävyyttä ja suunniteltuja murtumispisteiden toimivuutta testattiin tahattomasti, kun Laykka X.3 törmäsi vaunun telapyöriin. Törmäys tapahtui vinottain vasemmanpuoleisella etupyörällä. Vaikka ajaja onnistui hidastamaan ennen törmäystä, törmäyshetkellä vauhtia oli riittävästi taittamaan vasemmanpuoleisen etupyörän tukipalkkia merkittävästi. Juuri tämän tukipalkin on tarkoitus murtua tai taittua tarpeeksi voimakkaan törmäyksen yhteydessä. Samalla havaittiin, että Laykka X.3 kykeni edelleen toimimaan ja kulkemaan mäkeä pitkin vain 3:lla vetävällä pyörällä. Murtuneen tukipalkin tilalle valmistettiin uusi ja se asennettiin paikalleen. Tutkija oli hävittänyt vioittuneen tukipalkin ennen kuin oli korvannut sen uudella, minkä vuoksi vioittunutta palkkia ei ole dokumentoitu.

## 6.6 Testeissä ja kokeissa vahvistettu maastoliikkuvuuskyky

Kenttätesteistä, -kokeesta ja demonstraatiosta kyettiin keräämään runsaasti havaintoja Laykka X.3:n maastoliikkuvuusominaisuuksista sekä todentamaan mallinuksien oikeellisuus. Laykkan todetaan omaavan erittäin korkean liikkumiskyvyn luvussa 4.2. Liikkumiskykyä ei ollut mahdollista todentaa kaikissa saman luvun taulukossa 9 listatuissa maastoissa, kuten vetisessä hiekassa, eurooppalaisessa suossa tai trooppisessa maastossa. Muissa taulukon 8 mukaisissa maastoissa Laykka X.3:n liikkumiskyky on erinomainen ja se on ohjattavissa luiston ohjauksella taulukon 9 mukaisissa maastoissa. Laykka X.3 kykenee muun muassa kulkemaan kostealla maaperällä, kuten Panssarimuseon demonstraation aikana varmennettiin. Lisäksi Laykka X.3 on testattu lumen päällä, kosteassa maastossa sekä karkealla maaperällä, joissa sen havaittiin toimivan moitteettomasti. Suorituskyky parani huomattavasti, kun renkaat päivitettiin mallinuksen mukaisiksi runkomalliin X.3siirtymisen yhteydessä.

Tehtyjen testien perusteella voidaan todeta MMP ja  $CI_L$  mallinnusten pitävän hyvin paikkansa ja Laykkan omaavaan huomattavan maastoliikkumiskyvyn. Huomiona tuotiin esille, että Laykkan mahdollinen epäonnistuminen kohdistuisi sen kykyyn tuottaa riittävä voima liikkua kseen mallinnusten mukaisessa maastossa lasketulla tavalla. Testien perusteella voidaan todeta, että Laykka X.3 tuottaa riittävästi tehoja toimiakseen maastossa tehokkaasti. On kuitenkin vielä syytä varmistaa Laykkan tehokkuus maastossa suunnitellun kuorman kanssa ja tarkkailla liikkumiskykyä kuorman kanssa. Laykka X.3:n ylityskykyä ei ollut mahdollista testata ja varmentaa erikseen tämän tutkimuksen puitteissa, vaan tämä jää tutkittavaksi myöhemmin.

## 7 POHDINTA

Luvussa tarkastellaan tutkijan objektiivisuutta tutkimukseensa sekä Laykka-järjestelmän tulevaa kehitystyötä. Lisäksi luvussa tarjotaan ehdotuksia tehdyn tutkimuksen tulosten hyödyntämiseen jatkotutkimuksissa.

### 7.1 Objektiivisuus

Objektiivisuuden säilyttäminen oli tämän tutkimuksen toteutuksessa erityisen keskeinen teema, sillä tutkija on myös laitteen kehittäjä. Onhan inhimillistä toivoa ja toisaalta tulkita itse suunnittelemansa ja rakentamansa laitteen suoriutuvan testeistä mahdollisimman hyvin - sekä jättää puutteita huomioimatta. Tutkija onkin aktiivisesti pyrkinyt läpi tutkimuksen tuomaan mahdolliset ristiriidat ja epäkohdat esille sekä huomioimaan omat ja muut mahdolliset vinoumat sekä testien aikana että tuloksia tulkittaessa. Tuloksia on pyritty varmentamaan sekä toistamaan, jotta tulosten oikeellisuus vahvistuisi. Kokonaisuutta tarkastellessa voidaan tutkimuksen toteutusta pitää objektiivisena sekä avoimena.

Tutkimus rakentui vahvasti kenttätestien ja -kokeen ympärille sekä näistä saaduille havainnoille. Testeillä varmennettiin edeltävästi suoritettujen maastoliikkuvuusmallinnukset. Kenttätestien ja -kokeen aikana ei ollut mahdollista kerätä numeerista dataa esimerkiksi metrin tarkasta ajomatkasta, joita olisi voinut verrata testin aikana tehtyihin havaintoihin tai toisten testien tuloksiin. Tämä ei kuitenkaan heikennä tutkimuksen laatua, sillä testit laadittiin nämä rajoitteet huomioiden suoritepohjaisiksi. Esimerkiksi ajomatkalle asetettiin minimiraja, joka ylitettiin varsinaisessa suoritteessa reilulla virhemarginaalilla. Lisäksi testien aikana havaintoja oli tutkijan lisäksi tekemässä aina vähintäänkin 2 testiavustajaa tai tarkkailijaa, joiden kanssa saadut havainnot analysoitiin ja kirjattiin ylös. Tulkinnoista käytiin keskustelua testiin osallistuneiden henkilöiden kanssa, sekä mahdollisuuksien mukaan kerättiin kuva- ja videomateriaalia havaintojen varmistamiseksi. Materiaalin ja keskustelujen perusteella pyrittiin varmistamaan havaintojen oikeellisuudesta.

Havaintojen vääristyminen tai vääristäminen hidastaisi järjestelmän kehitystä ja pahimmassa tapauksessa lamauttaisi sen täysin tulevaisuudessa. Siksi havainnoinnin objektiivisuutta pyrittiin tukemaan dokumentoimalla tapahtumia valokuvaamalla ja videoimalla. Lisäksi tutkija jäi väsi itsensä täysin vaatimusten täyttymisen arvioinnista kenttäkokeessa. Täten arviot Laykka X.3:n suorituskyvystä suhteessa vaatimuksiin ovat ulkopuolisten henkilöiden tekemiä.

Tarkasteltaessa testien yhteydessä maastoliikkuvuuskyvykkyyksiä sekä niiden suhdetta laskuihin pyrittiin aktiivisesti objektiivisuuteen.

## 7.2 Tulosten uutuusarvo ja hyödynnettävyys

Laykka-järjestelmä on suunniteltu Suomen Puolustusvoimien tarpeet huomioiden ja se on Suomen ainoa sotilaalliseen puolustuskäyttöön suunniteltu UGV. Saman tyyppisiä järjestelmiä on kyllä kehitetty eri puolilla maailmaa, mutta niitä koskevien tarkempien tietojen puuttuessa Laykka-järjestelmä on suunniteltu ja kehitetty itsenäisesti. Näin ollen tutkimuksen tuloksilla on sellaisenaan suuri uutuusarvo. Tutkimuksen keskeisin tulos oli, että Laykka X.3 -runkoversio täyttää sille asetetut minimivaatimukset, minkä vuoksi alustaa voidaan käyttää tekoälyn kehityksessä. Lisäksi maastoliikkuvuusmallit vahvistettiin oikein lasketuiksi, jolloin näitä malleja voitaisiin muun muassa hyödyntää haluttaessa laajamittaisemmissa simulaatiotutkimuksissa.

Laykka-AMPGV-järjestelmän kehitystyö edistyi merkittävästi tutkimuksessa saavutettujen tulosten myötä. Saavutettu pohjataso mahdollistaa jatkokehityksessä muun muassa tekoälyn kehittämisen aloittamisen. Samalla tulosten saavuttamisen nopeudesta voidaan huomata kuinka ketterää ja nopeatempoista järjestelmän kehittyminen voi parhaimmillaan olla, kun onnistutaan inkrementaalisen kehityksen soveltamisessa perinteisen vesiputousmallin sijaan. Kehitystyön ketteryys ja nopeus osoittavat, että loppukäyttäjän olisi suotavaa olla kehitystyössä tavalla tai toisella mukana heti alkuvaiheesta saakka. Loppukäyttäjän alkuvaiheen palautteella on mahdollista alentaa tuotteen lopullista hintaa esimerkiksi poistamalla turhien ominaisuuksien kehittämiseen käytetty työ, sekä saavuttaa loppukäyttäjän tarpeisiin soveliaampi lopputuote. Tutkimuksen tulokset antavat myös osviittaa siitä, kuinka nopeasti ja rajatuilla resursseilla UGV-laite on mahdollista kehittää.

Tutkimuksen sivutuloksena havaittiin, että huolellisesti, tiettyä rasiitusta kestäviksi suunnitellut, 3D-tulostetut komponentit voivat soveltua myös voimansiirtojärjestelmässä käytettäviksi. Autoteollisuudessa ei tällä hetkellä suositella 3D-tulostettujen osien käyttöä autojen liikkuvissa osissa, mikä johtunee ainakin osittain osien suunnitteluun tarvittavasta erikoisosaamisesta ja työkaluista. Tässä tutkimuksessa tulostettujen ja testattujen ketjunkturistimien kestävyys kuitenkin osoittaa, että jotkin oikein tunnistetut osat, joihin on valittu sopiva materiaali, rakenne tai vahvistustapa, voivat kestää siihen kohdistuvat rasitukset jopa liikkuvissa robotin osissa. Jokainen osa on kuitenkin testattava erikseen käytännössä.

Tutkimuksen raportissa onnistuttiin selventämään kenttätestin sekä kenttäkokeen eroa sotateknisessä kontekstissa, sillä testiasettelujen valmistelua, kirjaamista ja eroja eriteltiin. Ennen kaikkea kokeen ja testin ero tehtiin näkyväksi suoritusvaatimusten täyttymistä mittaavien testien suunnittelussa ja vaatimusten täyttymisen ehdoissa. Liitteissä on nähtävissä käytännön esimerkki dokumentaatiotason erosta sekä tekstiasun, asettelun ja viimeistelyn eroista. Samalla tutkimus toimii esimerkkinä tavanomaisesta sotateknisestä kokeesta poikkeavasta toteutuksesta, jossa ilman suurta datamäärää ja sen yksityiskohtaista analyysiä saavutettiin hyödynnettävissä olevia tuloksia

Maastoliikkuvuusmallinnukset edesauttavat tulevia tutkijoita löytämään relevantin lähdekirjallisuuden ja esittelee tarvittavat laskukaavat. Osio helpottaa aiheeseen paneutumista, sillä kaavojen käsittely ja tulkitseminen ei ollut suoraviivaista. Lähteissä termejä saatettiin käyttää rishtiin ja kaavoista löytyi tiettyjä ristiriitaisuuksia. Joissakin tapauksissa kaavojen sisältöjä ei oltu selitetty riittävällä tasolla, jotta ne olisivat helposti käytettävissä. Niinpä tutkija korjasi ja täydensi kaavoja lukijalle ymmärrettävämmiksi, jotta mallinnuksia varten käytettyjä kaavoja ja taulukoita voidaan nyt soveltaa helpommin myös muihin Puolustusvoimissa käytettäviin ajoneuvoihin. Kaavoja joutuu toki muokkaamaan tela-alustoja varten, mutta siihen tarvittavat lähteet löytyvät tämän tutkimuksen lähdeviitteiden kautta.

### **7.3 Jatkotutkimusaiheet ja tulevaisuuden näkymät**

Luvussa 3 esitetty Gantt- taulukko osoittaa hyvinkin tutkimusprojektin pitkäkestoisuutta sekä monivaiheisuutta. Tutkimustyö ei suinkaan pääty tähän tutkimukseen, vaan jatkuu projekti Laykkana, osana sotatekniikan laitoksen automaation tutkimushanketta vuoden 2022 alusta alkaen.

Jatkotutkimusta toteutetaan tutkijan väitöskirjoissa, joissa tullaan kehittämään järjestelmälle tekoälyä sekä testataan järjestelmän ja tekoälyn toimivuutta osana sotajoukkoja. Testejä suoritetaan virtual battle space 3.0:ssa (VBS3), jossa ihmisiä vastaan pelaamalla testataan konseptin toimivuutta ja kartoitetaan tekoälyjen kyvykkyystarpeita. Myöhemmin on syytä tutkia Laykka-järjestelmän ja sen tekoälyn toimivuutta osana todellisia joukkoja, mikä voisi sisältää tarkkailua järjestelmän käyttäytymisestä ja suoriutumuksesta erinäisistä tehtävistä sekä haasteista. Kyseisellä tutkimuksella olisi liittymäpinta sotataidonlaitokseen, jonka kanssa yhteistyössä tulisi tutkia ja kehittää taisteleville UGV-järjestelmille taktiikoita ja toimintatapoja. Tällaisen yhteistutkimuksen toteuttaminen on nyt mahdollista, kun on olemassa helposti saatavilla toimiva UGV-järjestelmä.

Järjestelmän jatkokehityksen pienempiä selvitettäviä kokonaisuuksia olisi:

- voidaanko pohjamiina kuljettaa viritettynä tai virittämättömänä robotin miinakulhossa?
- voidaanko robotin kyydissä oleva pohjamiina laukaista robotin ollessa liikkeellä?
- miten pohjamiina reagoi robotin kuljetukseen viritettynä ja virittämättömänä?

Näillä kysymyksillä selvitetäisiin, toimiiko toiminta-ajatus pohjamiinan kuljettamisesta ja laukaistusta robotissa. Muussa tapauksessa toiminta-ajatusta pitäisi muuttaa, jolloin saataisiin viitteitä järjestelmän muutos- tai kehitystarpeista. Edellä esitettyjen kokonaisuuksien selvittämisen tarpeellisuudesta on keskusteltu PV:n räjähdelaituksen henkilöstön kanssa 24.8.2020 Keuruulla.

#### 7.4 Seuraava LAYKKA-AMPGV versio

Tutkimuksen perusteella on järkevää jatkokehittää Laykka -AMPGV järjestelmää. Samalla tunnistettiin muutamia kehityskohtia, joita olisi mahdollista jatkokehittää Laykka X.4 runkoversioon. Ehdoton lisäys järjestelmään olisi toimiva datankeruuohjelma, jotta tekoälylle saadaan tarvittava koulutusmateriaali ja jatkokehitykselle arvokasta dataa. Isoimpina rakenteellisina kehityskohteina olisi jousitusjärjestelmän kehittäminen sekä modulaarisuuden lisääminen.

Nykyinen Laykka X.3 -runkomalli soveltuu erinomaisesti eri toiminta ympäristöihin, mutta jousitusta pitää kehittää, jos järjestelmää halutaan tehostaa entisestään ja luoda entistä tehokkaampi suorituskyky. Jousitusjärjestelmän rakenne pitäisi olla monimaastokelpoinen, sen pitäisi kyetä säilyttämään robotin asento mahdollisimman tasaisena maastomuodoista huolimatta sekä tarjota vähintäänkin 1.5 kertaisen maastoylityskyvyn nykyiseen nähden. Osaksi jousituksen toiminnallisuutta liitettäisiin tekoäly, joka kykenisi hallitsemaan jousituksen asetuksia osana kokonaisuutta. Tekoäly säätäisi maastosta sekä keliolosuhteista riippuen jousituksen korkeutta, jäykkyyttä ja kallistusta optimaaliseksi.

Laykka X.4 -runkomallin rakenteet olisi tarkoitus toteuttaa entistä modulaarisempina. Osat olisivat 3D-tulostettavia ja voisivat sisältää räjähdaineita, jolloin ne olisivat samalla kiinteä osa runkorakennetta. Laykka-järjestelmän erikoisuus on sen modulaarisuus sekä monipuolisuus. Nähtäväksi jää kuinka paljon Laykka tulee vielä kehittymään tästä. Näillä näkymin järjestelmä tulee kehittymään vielä hyvinkin paljon ja järjestelmän kautta tullaan saamaan paljon uutta tietoa UGV- laitteiden suorituskyvyistä sekä mahdollisista ominaisuuksista. Laykka tuo PV:lle uudenlaista innovaatiokehittämistä sekä toivottavasti rikkoo vanhoja käytänteitä, jotta PV:n sisäinen innovaatio sekä kehittäminen pääsisi kukoistamaan entistä paremmin.

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimustyön päätarkoitus oli selvittää kuinka monta suorituskykyvaatimusta Laykkan kehitynein runkomalli kykenee täyttämään, jotta riittävän monen vaatimuksen täytyessä sen kehitystyössä voidaan siirtyä seuraavaan vaiheeseen. Lisätarkoituksena oli selvittää Laykkan rakenteiden kesto, miten inkrementaalinen kehitys tukee robotin kehitystä sekä mikä on Laykkan mahdollinen maastoliikkumiskyky. Tutkimuksen aikana suoritettiin kolme kenttätestiä, yksi kenttäkoe sekä yksi kenttädemonstraatio.

Koetyyppien virallisia määritelmiä hakiessa havaittiin, ettei kenttätesti- ja kenttäkoetermien eroa ole esitetty selkeästi Tekniset Tutkimusmenetelmät Maanpuolustuskorkeakoululla -kirjassa tai muissa PV:n oppaissa ja oppikirjoissa. Koska kenttätesti- ja kenttäkoetermien käyttö sotateknisessä kontekstissa on epäjohdonmukaista, tutkimuksen lisätarkoituksena oli selkeyttää näiden termien käyttöä ja merkityseroja suunniteltaessa sotateknisiä kokeita ja testejä sekä raportoidessa niistä.

Tutkimuksen ensimmäisen kenttätestin perusteella havaittiin, että Laykka X.2 -runkoversio ei kykenisi suoriutumaan riittävällä tasolla. Siksi kehitettiin uusi runkoversio, Laykka X.3, jolla suoritettiin yksi kenttäkoe, kaksi kenttätestiä ja yksi kenttädemonstraatio. Yhdistettyjen tulosten perusteella Laykka X.3 kykeni täyttämään ehdottomista kyvykkyyksivaatimuksista 10/12 eli 83 %, joka ylittää vaaditun 50 %.

Vaatimukset K9 ja K16 eivät täytyneet, sillä kehitystyön aikana esiintyi sekä merkittäviä mekaanisia että ohjelmallisia ongelmia, joiden korjaaminen ei ollut mahdollista vielä tämän tutkimustyön puitteissa. K9-vaatimusta ei määritelty täytyneeksi, sillä laitteen kyvyssä paikantaa itseänsä esiintyi puutteita säännöllisesti. Laitteen varusmieskoulutukseen soveltuvuuteen liittyvää K16-vaatimusta puolestaan ei ollut aiheellista tutkia tämän tutkimuksen aikana, johtuen yksinkertaisesti palvelusturvallisuudesta ja luvussa 2 mainituista seikoista.

Apukysymyksiin saatiin vastauksia seuraavalla tavalla: muista kyvykkyyksivaatimuksista Laykka X.3 onnistui täyttämään 8/17, eli 47 %, joka sekin ylittää vaaditun 10 %. Kyvykkyyksivaatimukset, jotka eivät täytyneet tai täytyivät vain osittain ovat: K4, K7, K17, K18, K22, K24, K27 ja K28. Laykka X.3 täytti yhteensä kyvykkyyksivaatimuksista 18/29, eli 62 % kaikista vaatimuksista. Arvoa voidaan pitää hyvänä suhteessa kehitysvaiheeseen ja tällä perusteella järjestelmä voidaan siirtää TRL-tasolle 6.

Täyttyneiden vaatimusten suhteellista osuutta voidaan käyttää esimerkiksi tarjouskilpailuiden yhteydessä, kun verrataan laitteiden suorituksia kenttäkokeissa. Välttämättä yksikään tarjotuista järjestelmistä ei täytä aivan kaikkia kyvykkyyksivaatimuksia, jolloin vaatimusten suhteen puutteellinen järjestelmä saattaa voittaa kilpailutuksen. Pääasiassa kilpailutukseen osallistuu vain valmiita tai kehityksensä loppupäässä, TRL 8-9 -tasolla olevia järjestelmiä, jotka ovat saavuttaneet korkean toimintavarmuuden. Tähän suhteutettuna voidaan pitää hyvänä suorituksena, että Laykka X.3 täytti kyvykkyyksivaatimuksista 62 % kehitystyön vaiheen II puolivälissä. Kehitystyön vaiheet esitettiin luvussa 3.2.

Tutkimuksen lisäkysymykset koskivat robotin rakenteiden kestävyyttä pienikaliiberisen aseensarjatulen ja kantamusten aiheuttamille rasituksille, kehittyneimmän rungon maastoliikkumiskykyä sekä inkrementaalisen kehityksen soveltuvuutta robottijärjestelmän kehittämiseen. Laykka X.3:n rakenteiden vahvistettiin kestäväksi pienikaliiberiseen aseeseen (RK 7.62) sarjatulesta aiheutuvan rasituksen ja ylimääräisiä kantamuksia vähintään 15kg:an saakka, mikä vahvistettiin sekä kenttäkokeen aikana että viimeisen kenttätestin jälkeisen huollon yhteydessä. Rakenteet kyllä kestivät ylimääräisen kuorman, mutta siitä aiheutui ketjujen löystymisenä ilmeneviä ongelmia voimansiirrolle. Ketjunkturistaja mallia 2 ei ollut riittävän kestävä suoriutuakseen tehtävästään. Vaikka taakkojen kuljetusta ei enää testattu parannetulla mallilla 3, kolmannen kenttätestin havaintojen perusteella ongelma vaikuttaa korjaantuneen.

Laykka-järjestelmän maastoliikkumiskykyä mallinnettiin eri maaperillä MMP ja CI<sub>L</sub> -malleilla, joiden perusteella arvioitiin Laykkan omaavan potentiaalisesti erinomaisen maastoliikkumiskyvyn. Maastoliikkuvuuden mallinnuksilla parannettiin vaatimukseen K5 liittyvää toimintavarmuutta, sillä kyseisessä vaatimuksessa ei eritellä erikseen millaisessa maastossa pitää 1,5 km kyetä kulkemaan. Suuri osa mallinnusten tuloksista varmennettiin kenttätestien ja demonstraation aikana, mutta maastoliikkumiskykyä ei testattu suolla, rämeellä tai vetisissä hiekkamaastoissa. Muilla maastotyypeillä mallinnusten tulosten voidaan todeta pitävän paikkansa. Laykka X.3 kykenee suurien maastorenkaidensa ja keveytensä ansiosta liikkumaan vaivatta hiekka- ja asfalttitiellä, nousemaan ruohoista, kivistä ja märkää mäkeä ylös, sekä toimimaan lumessa. Luisto-ohjaus ei huonontanut Laykkan maastoliikkumiskykyä. Muut mallinnetut maasto-olosuhteet testataan seuraavissa tutkimuksissa.

Inkrementaalinen kehitys havaittiin robottijärjestelmän kehittämiseen sopivaksi. Kyseinen malli otettiin käyttöön tämän tutkimuksen alkuvaiheessa ja sen sopivuuden arviointi toteutettiin tutkijan havaintoihin ja saavutettuun lopputulokseen perustuen. Mallin avulla Laykka-järjes-



telmää kyettiin kehittämään noin 1 vuoden aikana sellaiseen toimintavarmuuteen, että se kykenee täyttämään 50 % ehdottomista vaatimuksista. Kehitysmalli on auttanut kohdentamaan niukoja materiaali-, henkilöstö- ja aikaresursseja tehokkaasti. Samalla isomman kehityksen kokonaisuuden hallitseminen onnistui siten, että järjestelmälle on selkeä kehityspolku jatkossakin. Tutkija kokeekin selkeän kehitysmallin hyödyntämisellä olleen keskeinen rooli nopean kehityksen mahdollistajana, jonka puuttuessa Laykka-järjestelmä olisi voinut jäädä vielä Laykka X.2 -runkomalliin.

Kaiken kaikkiaan tutkimus vastasi sekä pää- että lisätutkimuskysymyksiin. Laykka X.3 -runkomalli, kehittynein versio rungosta, onnistui täyttämään enemmän vaatimuksia kuin sille oli minimivaihtoehtoksi asetettu, joten tutkimuksen hypoteeseja voidaan pitää vahvistettuina. Laykka X.3 on ylittänyt kehittäjänsä odotukset ketteryydellään, hiljaisuudellaan sekä robustiudellaan ja saanut positiivista palautetta yleisöltään. Näin ollen voitaneen todeta, että Laykka-järjestelmä on runkomallilla X.3 valmis siirtymään kehitysasteella seuraavaan vaiheeseen, eli TRL 6 -tasolle, ja se on toimintavalmis tekoälyn kehittämiseen.

## LÄHTEET

- [1] RIA-novosti, 24 1 2019. [Online]. Available: <https://ria.ru/20190124/1549807789.html>. [Haettu 5 1 2020].
- [2] D. Cooper, "Dogs in History," 7 3 2016. [Online]. Available: <https://dogs-in-history.blogspot.com/2016/07/anti-tank-dogs-sent-on-suicide-missions.html>. [Haettu 1 10 2017].
- [3] C. A. Andersson, "MIEHITTÄMÄTÖN TIEDUSTELU- JA PANSSARITORJUNTAAJONEUVO "LAYKKA"," Tampereen Teknillinen Yliopisto, Tampere, 2018.
- [4] QuestionPro , "What is field research: definition, methods, examples and advantages," [Online]. Available: <https://www.questionpro.com/blog/field-research/>. [Haettu 27 5 2021].
- [5] K. Ojasalo, T. Moilanen ja J. Ritalahti, Kehittämistyön menetelmät-uudenlaista osaamista liiketoimintaan, 1 toim., Helsinki: WSOYpro, 2009.
- [6] E. Lappalainen ja J. Jormakka, Tekniset Tutkimusmenetelmät Maanpuolustuskorkeakoululla, E. P. Oy, Toim., Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos, 2004.
- [7] "D-Day Overlord," [Online]. Available: <https://www.dday-overlord.com/en/material/weaponry/sdkfz-302-goliath>. [Haettu 7 1 2021].
- [8] N. Leigh, "Overt defence," 21 10 2019. [Online]. Available: <https://www.overtdefense.com/2019/10/21/iran-unveils-heidar-1-ugvs/>. [Haettu 7 1 2021].
- [9] N. R. E. C. NREC, "Carnegie Mellon University," [Online]. Available: <https://www.nrec.ri.cmu.edu/solutions/otherindustries/mini-crusher.html>. [Haettu 7 1 2021].
- [10] PVMATLE, *ROBOTTI, RAIVAAMIS-TEODOR EOD IEDD HYVÄKSYNTÄ SOTAVARUSTEESI*, MAAVMATLE kirjaajat, 2005.  
PVMATLE SULI-OS, *ROBOTTI, RAIVAAMIS-TEODOR EOD IEDD SOVELTUVUUS SOTAVARUSTEESI*, MAAVMATLE kirjaajat, 2005.
- [12] Järjestelmäkeskus Maajärjestelmäosasto, *PVTOK PION 4:070 TIEDUSTELUROBOTTI EOD/IEDD*, 2020.
- [13] Inside Robotics, "IXTEK lands \$1.7m contract to supply bomb disposal robots to police," 26 6 2017. [Online]. Available: <https://www.insiderobotics.com.au/robotics/industrial-robots/XTEK-lands-over-1-m-contract-to-supply-bomb-disposal-robots-to-police/>. [Haettu 8 1 2021].
- [14] iRobot, "iRobot Wins Contracts Valued at \$9.6 Million from Canadian Department of National Defence," 8 9 2014. [Online]. Available: <https://media.irobot.com/2014-09-08-iRobot-Wins-Contracts-Valued-at-9-6-Million-from-Canadian-Department-of-National-Defence> . [Haettu 8 1 2021].
- [15] P. Thagard ja C. Shelley, "Abductive reasoning: Logic, visual thinking, and coherence," 1997. [Online]. Available: <http://cogsci.uwaterloo.ca/Articles/Pages/Abductive.html>. [Haettu 10 9 2021].
- [16] TRY QA, "What is Incremental model- advantages, disadvantages and when to use it?," [Online]. Available: <https://tryqa.com/waht-is->

- incremental-model-advantages-disadvantages-and-when-to-use-it/. [Haettu 2 6 2021].
- [17] C. Larman ja V. R. Basili, "Iterative and incremental developments. A brief history," *Computer*, osa/vuosik. 36, nro 6, pp. 47-56, 6 2003.
- [18] Nationa Aeronautics and Space Administration, "NASA," 2 4 2021. [Online]. Available: [https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology\\_readiness\\_level](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology_readiness_level). [Haettu 20 02 2022].
- [19] B. L. Goldense, *Machine Design*, osa/vuosik. 89, nro 5, p. 96, 2017.
- [20] Amazon, "Geared Motor, TBVECHI 350W 24V DC Electric Geared Motor Bicycle Bike Scooter Gear Reduction Brushed E Bike Scooter 24 Volt 350Watt," [Online]. Available: <https://www.amazon.com/TBVECHI-Electric-Bicycle-Scooter-Reduction/dp/B07RL7R58L>. [Haettu 18 9 2020].
- [21] Amazon, "Amazon.de," [Online]. Available: [https://www.amazon.de/GLOBACT-Vollmetallgetriebe-Hochdrehmoment-verstellbare-Metall-Servoarme/dp/B092HM6W54/ref=sr\\_1\\_4\\_sspa?dchild=1&keywords=ds3225sg+servo&qid=1631551530&sr=8-4-spons&psc=1&spLa=ZW5jcnlwdGVkUXVhbGlmaWVyPUEyUEpaQIZDWDRCNIRRJmVuY3J5cHRIZEI](https://www.amazon.de/GLOBACT-Vollmetallgetriebe-Hochdrehmoment-verstellbare-Metall-Servoarme/dp/B092HM6W54/ref=sr_1_4_sspa?dchild=1&keywords=ds3225sg+servo&qid=1631551530&sr=8-4-spons&psc=1&spLa=ZW5jcnlwdGVkUXVhbGlmaWVyPUEyUEpaQIZDWDRCNIRRJmVuY3J5cHRIZEI). [Haettu 13 9 2021].
- [22] Amazon, "Amazon.uk," [Online]. Available: [https://www.amazon.co.uk/gp/product/B01HQE9TN6/ref=ppx\\_yo\\_dt\\_b\\_asin\\_title\\_o07\\_s00?ie=UTF8&psc=1](https://www.amazon.co.uk/gp/product/B01HQE9TN6/ref=ppx_yo_dt_b_asin_title_o07_s00?ie=UTF8&psc=1). [Haettu 13 9 2021].
- [23] Suomenakut, "Suomenakut.fi," [Online]. Available: [https://www.suomenakut.fi/akut-ja-paristot/exide-mp-akku-agm12-31-12v-30ah-166x126x175----\(yix30l-bs\)-tehdassul/p/3661024034944/?gclid=EAlaIQobChMIpvLnLn88gIVFJayCh0Y1Q3XEAQYAiABEgL4h\\_D\\_BwE](https://www.suomenakut.fi/akut-ja-paristot/exide-mp-akku-agm12-31-12v-30ah-166x126x175----(yix30l-bs)-tehdassul/p/3661024034944/?gclid=EAlaIQobChMIpvLnLn88gIVFJayCh0Y1Q3XEAQYAiABEgL4h_D_BwE). [Haettu 13 9 2021].
- [24] Amazon, "Amazon.de," [Online]. Available: [https://www.amazon.co.uk/gp/product/B07H3T2K96/ref=ppx\\_yo\\_dt\\_b\\_asin\\_title\\_o03\\_s00?ie=UTF8&psc=1](https://www.amazon.co.uk/gp/product/B07H3T2K96/ref=ppx_yo_dt_b_asin_title_o03_s00?ie=UTF8&psc=1). [Haettu 13 9 2021].
- [25] PiBorg, "PiBorg.org," [Online]. Available: <https://www.piborg.org/motor-control-1135/diablo>. [Haettu 14 9 2021].
- [26] Dimension Engineering, "dimensionengineering.com," [Online]. Available: <https://www.dimensionengineering.com/products/sabertooth2x32>. [Haettu 14 9 2021].
- [27] M. Saarilahti, Maastoliikkuvuuden perusteet, osa/vuosik. 390, M. tutkimusosasto, Toim., Helsinki: Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja, 1991.
- [28] M. Saarilahti, "Soil Interaction Model, appendix report No 5," University of Helsinki, Helsinki, 2002.
- [29] Y. . C. D. WONG, . H. . H. S. LIM ja . W. . Q. W. CHAN, "An Assessment of Land Vehicles' Trafficability," pp. 54 -63, 2016.
- [30] J. Wong, P. Jayakumar, E. Toma ja J. Preston-Thomas, "A review of mobility metrics for next generation vehicle mobility," *Journal of Terramechanics*, nro 87, pp. 11 - 20, 2020.
- [31] M. Saarilahti, "Soil Interaction Model," University of Helsinki, Helsinki, 2002.
- [32] M. Saarilahti, "Soil Interaction Model, appendix report No 4," University of Helsinki, Helsinki, 2002.

- [33] J. C. Larminie, "Standards for mobility requirements," *Journal of Terramechanics*, osa/vuosik. 3, nro 25, pp. 171-189, 1988.
- [34] International Organization for Standardization, "Online Browsing Platform," [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:18646:-2:ed-1:v1:en>. [Haettu 21 9 2021].

## LIITTEET

YLILUUTTNANTI ANDERSSON TUTKIELMAN

LIITE 1

## LAYKKA KYVYKKYYSVAATIMUKSET

Tunnus	Vaatus	Tarve Ehdoton/Tarpeellinen/Lisä	Perustelu/ Tarkennus vaatimukselle ja vaatimuksen antaja (VA)
K1	Laitteen on kyettävä liikkumaan ulkomaastossa.	E	Laykkaa on tarkoitus käyttää maantiellä ja metsämaastossa. VA: Tilaaaja
K2	Kyettävä ylittämään pienet esteet ja kuopat.	E	Halutaan hyvä maastoliikkuvuus ja maavaraa, jotta laite ei jäisi ”pienestä” kiinni. VA: Tilaaaja
K3	Kyettävä toimimaan eri keliolosuhteissa.	T	Laitteen käyttö ei rajoittuisi liikaa sääolosuhteista. Halutaan, että laite toimisi aurinkoisessa, sateisessa, lumisateisessa, sumussa, pimeässä ja kylmässä/lämpimässä kelissä. Ääriolosuhteita ei tässä tarkoiteta, kuten myrskyä tai vast. VA: Tilaaaja
K4	Laitteen on kyettävä lamauttamaan/vaurioittamaan raskaan/keskiraskaan panssarivunun, sekä henkilöstöä.	T	Laitteen on tarkoitus lamauttaa panssari, ajoneuvokalustoa ja henkilöstöä. VA: Tilaaaja & asiantuntija 2
K5	Laitetta on kyettävä käyttämään etäältä. 1,5 Km päästä.	E	Asiantuntijan haastattelun perusteella 1,5 Km toimintasäde on enemmän kuin riittävä, erinäisten tiedustelu- ja lamauttamistehtävien suorittamiseen. VA: Asiantuntija 1
K6	Laitteen on kyettävä liikkumaan metsätiellä ja asfalttitiellä.	E	Laitteen pääasiallinen käyttö tulee rajoittumaan tiestöön. Pienessä ruuhikossa ja pienten 20 Ø x10cm kokoisten kuoppien ylityskyky oltava. Kyettävä nousemaan auto tien ojasta ylös tielle. VA: Tilaaaja & asiantuntija 1&2
K7	Laitteen on oltava riittävän nopea, että se kykenee saavuttamaan kohteensa maastossa (noin 15 km/h).	T	Toivotaan nopeata laiteta, jotta siihen reagointi liikkeestä olisi vaikeata. VA: Tilaaaja
K8	Laitteen on kyettävä kuljettamaan pohjamiinan 87 tai vastaavan määrän räjähdettä kohteeseensa ja räjäytettävä sen.	E	Halutaan hetkellistä isoa tuhoivoimaa halvalla. VA: Tilaaaja
K9	Laite on kyettävä tiedustelutoimintaan.	E	Pitää kyetä paikantamaan itsensä ja toimimaan myös pimeällä. VA: Tilaaaja & asiantuntija 1
K10	Laite on pyrittävä rakentamaan pääasiassa osista, jotka ovat kaupallisesti saatavissa.	E	Halutaan, että laitteen osat olisi mahdollista ostaa verkkokaupasta tai mistä muusta elektroniikka liikkeestä, jotta vaihto-osien saatavuus olisi mahdollisimman suurta. VA: Tilaaaja & asiantuntija 1
K11	Laite on kyettävä tarvittaessa varustamaan kevyellä aseistuksella.	T	Kevyellä aseistuksella tarkoitetaan RK62 7.62 tai MP5 vastaava ase, jolla voidaan vaikuttaa myös henkilöstöön. VA: Tilaaaja & asiantuntija 1
K12	Laitteen oltava riittävän halpa, jotta tarvittaessa laite olisi uhrattava/kertakäyttöinen.	T	Alustava hinta ”halvalle” on 5000e. Jonka perusteella pyritään laite rakentamaan. VA: Tilaaaja & asiantuntija 1&2
K13	Laite on kyettävä toimimaan -25c pakkasessa.	L	Halutaan toimintakykyä myös talvella VA: Tilaaaja
K14	Laitteen toiminta aika oltava riittävän pitkä täyttääkseen mahdollisen tiedustelutehtävän 1,5 km päässä.	T	Toiminta aika on annettu noin 1 tunti normaali toiminta olosuhteissa (20c lämpöä). VA: Tilaaaja

K15	Osien mahdollinen 3D tulostus.	L	Halutaan tuottaa rungon vaihto-osia 3D tulostuksella. VA: Tilaaja
K16	On oltava soveltuva varusmieskoulutukseen ja käyttöön.	E	Tuotetta käyttäisivät mahdollisesti myös varusmiehet. Jolloin laitteen pitää olla riittävän kestävä ja yksinkertainen, jotta sen käyttö voidaan kouluttaa varusmiespalveluksen aikana, ja ottaa käyttöön. VA: Tilaaja
K17	Komponenttien ja osien vaihto oltava yksin-kertaista. Modulaarisia.	T	Koulutettu henkilö voisi vaihtaa ”nopeasti” uudet osat paikalleen. Modulaarisuudella halutaan nopeutta ja yksinkertaistaa osien ja komponenttien vaihtoa/ lisäystä VA: Tilaaja
K18	Oltava vedenkestävä mutta ei uintikykyinen.	T	Halutaan, että laite toimii myös sateessa ja jos ylittää lätköitä. VA: Tilaaja
K19	Standby tilassa akkujen on kestävä 1+ tuntia. Tässä tilassa kyettävä lähettämään live kuvaa.	T	Standby tilan jälkeen laitteen on kyettävä myös vielä toimimaan 5min, jotta saa mahdollisen tuho lastinsa toimitettua kohteeseensa ja räjäytettyä sen. VA: Tilaaja & Asiantuntija 2
K20	Järjestelmä kykenee nousemaan mäkiä ylös ja laskeutumaan mäkiä pitkin	E	Minimi vaatimus noustavalle mäen kaltevuudelle on 20 astetta VA:tilaaja
K21	Aseistusta ei tarvitse ottaa hinnassa huomioon.	E	Tilaaja haluaa itse asettaa aseet. VA: Tilaaja
K22	Kameroilla kyettävä valvomaan 360° omaa ympäristöään.	T	Halutaan, että ainakin yhdellä kameralla voidaan valvoa vähintään 180° ja toisella suoraan eteenpäin. VA: Tilaaja & Asiantuntija 1
K23	Rungon ja muitten rakenteiden pitää olla riittävän kestäviä, jotta laite kykenee toimittamaan 15kg painoisen lastinsa kohteeseensa haastavissakin maasto-olosuhteissa.	E	Rungon pitää kestää kaikki värinät ja rasitukset kun sillä on täysi kuorma päällä. Vähimmäispaino on pohjamiinan paino +10 %. VA: Tilaaja & Asiantuntija 2
K24	Laitteelle voitaisiin laittaa telat, jos halutaan parempaa maasto liikkuvuutta.	L	Jos laite toteutetaan pyörialustaisena, niin haluttaisiin mahdollisuus teloillekin, jotka voidaan asentaa pyörien päälle. Jos laite on teloilla liikkuva, niin tälle vaatimukselle ei ole tarvetta. VA: Tilaaja & Asiantuntija 1
K25	Asetelineen ei tarvitse kääntyä sivuttain.	T	Aseen kääntäminen sivuttain halutaan toteuttaa koko runkoa kääntämällä ampumasuuntaan. VA: Tilaaja & Asiantuntija 1
K26	Asetta on pystyttävä liikuttamaan ylös ja alas.	E	Asetta pitää pystyä nostamaan pystysuunnassa ja kyettävä ampumaan. VA: Tilaaja & Asiantuntija 1
K27	Pystyttävä ampumaan myös liikkeestä.	T	Laitteen on kestävä aseeseen rekyylin ja pysyttävä tasapainossa myös liikkeen aikana, kun ajetaan 50 % maksimi nopeudesta. VA: Asiantuntija 1
K28	Oltava lämpökamera tähyystystä varten. Kameran on kyettävä erottamaan ihmisen erillisestä lämpökohteesta 400m päästä.	T/L	Jos lämpökamera lisätään, sen pitää täyttää tämä vaatimus ja oltava ”sopivan” hintainen (alle 1000e). VA: Asiantuntija 1
K29	Laitteen on oltava sen kokoinen ja painoinen, että se mahtuu panssarivaunun ja auton kyytiin. Kaksi ihmistä jaksaa nostaa laitteen.	E	Laite ei saa ylittää 100kg kokonaispainoa. ei saa olla kooltaan yli 1200x1200x500mm. VA: Tilaaja & Asiantuntija 1

Taulukko 1. Laitteelle asetetut kyvykkyyksivaatimukset ja tavoitteet. [3]

## LAYKKA TEKNISET SPESIFIKAATIOT

Tun-nus	Toteutus	Tarve	Perustelu
T1	Laitteen tietokoneena käytetään Raspberry Pi:tä /Arduinoa tai näitten yhdistelmää.	E	Raspberry pi on halpa pienoistietokone, jossa on riittävästi laskenta tehoa tällaiseen toimintaan. Arduino on mikroprosessori, joka voi tukea Raspberry Pi:n toimintaa. Kummatkin mahdollistavat osien helpon kiinnittämisen (modulaarisuuden). Hinnasta johtuen ei tarvitse käyttää ylimääräisiä resursseja erillisten mikropiirien kehittämiseen. Näille laitteille löytyy paljon valmiita komponentteja ja ohjelmia, joita voidaan hyödyntää laitteen kehityksessä ja rakentamisessa.
T2	Komponenttien on oltava Raspberry Pi/Arduino yhteensopivia.	T	Yhteensopivuudella vähennetään huomattavasti erillistä ohjelmointia ja sovitteita. Samalla säilytetään modulaarisuus ja toiminta varmuus.
T3	Laitteen paikannus toteutetaan 1kpl GPS (Global Positioning System) antenni ja 1 kpl IMU (Inertial Measurement Unit) moduuleja.	T	GPS:llä saadaan laitteen oma paikka esille kartalle ja pystytään seuraamaan laitteen liikettä myös sitä kautta. IMU moduulin avulla helpotetaan laitteen liikettä ja toimintaa maastossa.
T4	Laitteen ohjelmoinnissa käytetään Python ohjelmointikieltä ja avointa lähdekoodia.	T	Python tarjoaa valmiita ohjelmointiblokkeja robotin ohjelmointiin. Jos käytetään päätietokoneena Raspberry Pi:tä, niin suositellaan käytettävän Pythonia sen ja sen laitteiden ohjelmoimiseen. Avointa lähdekoodia käytettäessä helpotetaan omaa ohjelmointia. Koodia ei ole tarkoitus julkaista yleiseen käyttöön, kriittisten toimintojen osalta.
T5	Laite kykenee lukittumaan valittuun kohteeseen ja seuraamaan kohdetta kameranäöllään.	T	Laitteen ei tarvitse tunnistaa erilaisia vaunuja tai muita kohteita. Vaan yksinkertainen kohteeseen lukitus riittää.
T6	Laite kykenee liikkumaan esiasetuilla karttapisteillä, jotka syötetään operaattorin päätelaitteelta hyödyntäen sähköistä karttaaineistoa.	L	Lisä ominaisuus, jota voidaan käyttää helpottaakseen operaattorin toimintaa. Laite kykenisi kulkemaan tietä pitkin määrättyllä nopeudella asetettujen pisteiden kautta. Tällöin operaattori voi keskittyä ympäristön valvontaan.
T7	Pyörät olisivat pääasiallinen alustan siirto-tapa.	E	Koska laitetta käytetään pääasiassa erilaisilla teillä, niin silloin nopein tapa liikkua ovat pyörät. Pyörillä toteutettuna rungon rakenne, sekä voimansiirron rakentaminen on yksinkertaisempaa myös rakenteeltaan. Ei tarvitse rakentaa erillistä jousitusta telapyörästä varten. Renkaat ovat myös halvempia hankittavaksi ja helpompi vaihtaa. Jos yksi pyörä menisi toiminnan aikana rikki, laitetta voitaisiin siltikin käyttää. Mutta jos sama tapahtuisi telojen kanssa, eli tela hyppäisi pois paikaltaan, niin laitteen liikkumiskyky lakkaisi siihen paikkaan. Pyörien kokoa vaihtamalla voidaan maavaraa nostaa tai laskea tarpeen mukaan.
T8	Neljä sähkömoottoria, yksi jokaiselle renkaalle.	T	Neljällä moottorilla saadaan paras vääntömomentti ja pito, mutta ne myös kuluttavat sähkökin. Tällä tavalla voidaan toteuttaa tankkiohjaus. Tällöin laitetta pystytään kääntämään paikaltakin 360°.
T9	Tankki kääntö.	T	Tällä tavalla pystytään toteuttamaan ase kääntö toivotulla tavalla.
T10	Aseteline kallistetaan ylös ja alas suoraohjaus servo moottorilla.	E	Suoraohjausservo moottorilla ohjattuna ohjaus voidaan toteuttaa samalla koodilla kuin muittenkin servojen ohjaus, jolloin vähennetään ohjelmointi-työn määrää. Samalla se voidaan kiinnittää moottoriin suoraan, jolloin erillistä virtapiiriä ei ole tarvetta hankkia. Nykyiset mallit ovat sen verran vahvoja ja tukevia, että ne kestävät tärinät ja vastukset riittävän hyvin. Simulaattorilla pitää testata minkä kokoinen työntö tankko pitää olla ja kuinka tehokas moottori.
T11	Asetelineen alle on kyettävä varamaan 100 patruunanvyölle tilaa.	L	Jos ase on vyökäyttöinen, niin patruunat voidaan laittaa asetelineen alle, johon muuten asennettaisiin lisäräjähde.
T12	Lisäräjähde ja esisirpaloitu kulho.	T	Räjähdeellä varmistetaan itsetuho jos laite on jäämässä vääriin käsiin. Esisirpaloidulla kulholla lisätään räjähdys sirpalevaikutusta.

T13	Lämpökamera.	T/L	Rajoittavina tekijöinä lämpökameralle ovat: hinta, sen koko ja yhteensopivuus Raspberry Pi:n kanssa. Jos laitteen yleinen hinta on alle hintatavoitteen, silloin voidaan etsiä sopiva lämpökamera. Muuten se on lisätarvike, joka tilataan erikseen.
T14	Kiinteä kamera edessä ja yksi pyörivä kamera takana.	E	Tällä tavalla saadaan 360° tähytys. Edessä oleva kamera on laitteen ohjaamista varten ja takana oleva kamera pystyisi kääntymään sivuttain ainakin 180° ja nostamaan/laskemaan kameraa 90°. Kumminkin kamerat olisivat pimeänäkökykyisiä. Jos asennetaan myös lämpökamera, niin silloin kääntyvä kamera olisi lämpökameralla varustettuna.
T15	Tiedon lähetys toteutetaan XBee moduulilla.	T	Xbee moduuli mahdollistaa 2 km päähän varman toiminta yhteyden ja tarjoaa samalla yhteydelle suojan.
T16	Yhteys varmennetaan GSM (Global System for Mobile Communications) moduulilla.	T	Xbeen yhteys varmennetaan GSM yhteydellä. Teoriassa, jos yhteydet toimivat hyvin voidaan ohjaus toteuttaa tämän moduulin kautta, jolloin kantama olisi huomattavasti yli 2 km. Samalla laite naamioitetaan GSM puhelimeksi tutkahavainnoissa. Tämän moduulin toteutus vaatii paljon ohjelmointia ja testausta.
T17	Operaattorin päätelaite koostuisi samanlaisista osista kuin laite.	T	Päätelaite käyttäisi samaa tietokonetta ja vastaanotto/lähetysmoduuleja ja antennia kuin laitekin. Näin saadaan toiminta varmat ja yhteensopiva järjestelmä.
T18	Laitteen ohjaus toteutetaan käyttämällä jotakin kaupallista peliohjainta.	T	Peliohjaimen avulla pystytään pitämään järjestelmän käyttö yksinkertaisena, ottaen huomioon nykypäivän sukupolven, joista lähes kaikki ovat pelanneet konsoleilla. Tällöin ohjaus olisi osittain tuttua. Peliohjaimessa pitää olla kaksi tattia, joilla sitten tankkiohjaus toteutetaan.
T19	Parempi yönäkö.	L	Lisäominaisuutena voidaan parantaa pimeänäkökameran tarkkuutta pimeällä, hankkimalla parempi kamera.
T20	Uinti kyky.	L	Suunnitellaan laite vedenkestäväksi ja kelluvaksi. Tällöin se tulee vaatimaan lisäosia ja lisää suunnittelua. Se saattaa muuttaa tuotetta olennaisesti. Tämä toteutetaan vain erikseen tilattuna lisäominaisuutena.
T21	20% lisää kantokykyä.	L	Yli 20 % lisäkantokyky muuttaa tuotteen rakenteita olennaisesti. Mutta alle sen, voidaan toteuttaa vielä pienillä muutoksilla.
T22	Lisäkamerat.	L	Tarvittaessa voidaan asentaa 4 lisäkameraa. Näille kameroille tarvittavat kuvut, servot ja telineet liitetään erikseen.
T23	Tehokkaammat moottorit.	L	Vakio moottorit voidaan tarvittaessa vaihtaa tehokkaampiin moottoreihin. Tämä vaihdos kuitenkin vaikuttaa virrankulutukseen ja tällöin toiminta-aikaan. Maximissaan voidaan asentaa 40V 55A moottorit, johtuen moottoriohjaimen rakenteesta.
T24	Ohjaus toteutetaan 2 moottorilla.	L	Vaihtoehtoisesti ohjaus voidaan toteuttaa kahdella moottorilla, jotta neliveto ja tankkiohjaus säilyisi on tällöin tehon välitys tapaa muutettava.
T25	Lion-ion akut.	L	Voidaan asentaa tehokkaampien moottoreiden yhteyteen, jolloin kevyemmät akut keventäisivät painoa ja lisääisivät toiminta-aikaa. Huomioitavana on kuitenkin akkujen hinta, joka on moninkertainen verrattuna AGM akkuihin.
T26	Lisätoimintasäde.	L	Kantamaa voidaan kasvattaa aina 10km saakka, mutta jokainen kilometri tuo lisäkustannuksia ja lisää antennia ja piirejä. Näin pitkällä etäisyyksillä ei ole vielä varmaa, miten laite tulee toimimaan katveissa, ja kuinka pitkät lähetys/vastaanotto viiveet ovat.
T27	2kpl GPS ja IMU moduuleja lisää.	L	Lisä GPS antennilla voidaan parantaa oman paikannusta entisestään. Tämä on varsin tarpeellista, silloin kun kantamaa kasvatetaan yli 2km. IMU moduuleilla parannetaan laitteen käyttöä maastossa, ja mahdollistetaan autonomisempi toiminta.
T28	Maalinpaikannuslaitteen-15(MPL) kiinnitys ja maalinpaikannus.	L	Voidaan suunnitella erillinen aseteline kiinnikke, johon voidaan MPL kiinnittää. Ohjelmistoon tehtäisiin lisäys, jonka mahdollistaisi MPL:n mittauksen lukemisen operaattorin päätelaitteelta.
T29	Lisätelat.	L	Koska laite tehdään pyörille, haluttiin mahdollisuus teloillekin. Suunnitellaan telat, jotka voidaan asentaa pyörien päälle, mutta tämä olisi erillinen lisälaite.
T30	Kevyt kertasingon kiinnitys ja laukaisu.	L	Suunnitellaan erillinen aseteline, johon voidaan kiinnittää kevyt kertasingo. Laite kykenisi poistamaan varmistuksen ja laukaisemaan ase.

Taulukko 2. Tekniset spesifikaatiot, jonka perusteella suunnitellaan toteutusvaihtoehdot.



**KENTTÄTESTI 1, SUNNUNTAI 22.11.2020**

**Keli:** Puolipilvistä, kostea yöllä ollut sadetta

**Lämpö:** noin +7 astetta

**Kentän pinta:** Nurmikko sekä juoksurata kosteita ja osittain märkiä

**Tuuli:** 4 m/s

**Laykka runko:** V X.2; Kuva 1

**Paikka:** Helsinki, Santahamina: yleisurheilurata

**Testi rata:** 8-rata Iso (Kuva 2), 1 kierros noin 450 m, mitattu mittanauhalla. Arvioitu virhe +-5m

**Testi alkoi klo:** 14:00

**Testi loppui klo:** 16:53

**Painot:** Ei lisäpainoja

**Moduulit:** Miinamoduuli, tyhjänä

**Akku lataus alussa:** 25.8V mitattu jännitemittarilla (kalibroitu: 25.7.2018)

**Akku lataus lopussa:** 24.8V

**Tavoitteet:**

- 1) Ajaa vähintään 2km yhtäjaksoisesti
- 2) Ajaa 4km yhtäjaksoisesti
- 3) Ylläpitää ohjausyhteyden
- 4) Ylläpitää kamerayhteyden
- 5) Kytä nousemaan noin 20 asteinen mäki
- 6) Testataan ketjunkiristinmallien toimivuudet
- 7) Testata akkujen kesto

**Havainnot testin aikana:**

Isoin haaste rakenteissa oli ketjun kiristimisessä. Laykkasta V X.2 löytyi kaksi erityyppisiä ketjunkiristintä, joita oli tarkoitus testata. Kuvassa 3 on esitetty miten ketjukiristin malli 2 runko vääntyi merkittävästi. Rikkoutuminen tapahtui ensimmäisen 50 m aikana, joka huomattiin merkittävän kovaäänisenä ketjun rahinan ja narskunnan äänenä, joka johtui ketjujen hyppimisestä hammasrattaissa. Tämä johti lopulta 100m ajon jälkeen etuoikealla olevan ketjun hyppäämisen pois kokonaan rattailtaan. Laykka kykeni vielä ajamaan kolmella moottorilla noin 10m matkan, toki hyvin vaivallisesti ja ohjaus veti vahvasti vasemmalle tässä kohtaa. Layk-

kan ketjut laitettiin paikalleen ja ”korjattiin” kiilaamalla kiristin paikalleen toisella kiristimellä.

Laykkalla kyettiin ajamaan puolikas kierros, jolloin päätettiin tarkistaa ketjunkiristykset. Etuoikea ketjukiristin vaihdettiin uuteen ja sen alle sijoitettiin ketjukiristin mallia 1. Ajoa kyettiin suorittamaan noin ¼ kierros lisää, kunnes takavasen kiristin mallia 2 petti samanlailla kuin etuoikeakin, samalla takaoikea kiristin mallia 1 irtosi paikaltaan. Tämä kaikki tapahtui kaarteissa vasemmalle. Ennen ketjukiristimien pettämistä Laykka pyörähti ympäri täydestä vauhdista juoksuradan märällä pinnalla. Tämä johtui renkaiden huonosta pidosta märällä pinnalla. Korjattua kiristykset kyettiin ajamaan loput ¼ kierrosta loppuun nilkutellen. Korjauksien aikana Laykkaa ei sammutettu missään vaiheessa, järjestelmää kylläkin käynnistettiin uudelleen useampaan kertaan, mutta kyseinen toiminta ei katkaise missään vaiheessa virransyöttöä järjestelmään.

Yhteyksissä huomattiin satunnaisia katkoja, jotka eivät johtuneet radio tai GSM yhteyksissä. Ongelmaksi paikallistettiin moottoriohjaimiin mallia Diablo A55. Syytä miksi moottoriohjaimet välillä tippuivat pois ajon aikana ei kyetty testin aikana paikallistamaan.

Radio sekä GPS ja karttapalvelut toimivat ohjelmiston puolesta hyvin. GPS tarkkuuksia ei saatu järjestelmästä ulos, sillä kyseisten tietojen esitystä ei oltu ohjelmoitu näytettäväksi, sekä kyseisten tietojen esille ottaminen testin aikana ei olisi ollut mahdollista ajan puitteissa eikä käytännöllistä. GPS piirto näytti silmämääräisesti oikealta. GPS data ei saatu otettua talteen, sillä järjestelmä jouduttiin usein käynnistämään uudelleen, jotta yhteydet Diabloihin saataisiin uusittua.

Testin viimeisillä hetkillä päätettiin testata, että kykeneekö Laykka nousemaan kivistä ja ruohikoista mäkeä ylös. Mäki on arvioitu karttojen perusteella olevan noin 20 asteinen. Mäki sijaitsee urheilukentän varressa. Laykka kykeni nousemaan mäen kivistä puolta ylös, sekä laskeutumaan ruohikoista puolta alas, välillä ajaen myös kyseistä mäkeä sivuittaissuunnassa. Tasapainon suhteen ei ilmennyt ongelmia. Renkaiden pidossa oli haasteita, tämä huomattiin jo juoksuradalla. Testi päättyi siihen, kun Diablot katkaisivat yhteydet viimeisen kerran, samalla kannettavan tietokoneen akku loppui, jolloin oli myös järkevää lopettaa kenttätesti, jotta lisävahingoilta vältyttäisiin.

### **Lopputulokset:**

Laykka kykeni ajamaan yhteensä noin 500m, hyvin katkonaisesti. Täten tavoitteet 1 ja 2 eivät täytyneet eikä myöskään tämän mukaiset vaatimuksetkaan. Tavoitteet 3 ja 4 täytyivät, yhteydet pysyivät auki niin GSM, radio kuin SSH (vaati internet tai GSM yhteyden) yhteyden kautta koko ajan. Ohjausyhteydet oli koko ajan saatavilla vaikka yhteydet Diabloihin ei ollut päällä. Tämä voitiin varmistaa katsomalla kameran lähettämään kuvaa, vaihtamalla lähettävän kameran kuvaa (käsky lähetetään joko radioteitse tai GSM yhteyttä pitkin) tai liikuttamalla

servoja (kameroita) näin tehtiin aina kun Laykka pysähtyi äkillisesti. Joka kerta Laykka vastasi jollain tavalla lähetettyihin ohjauksiin.

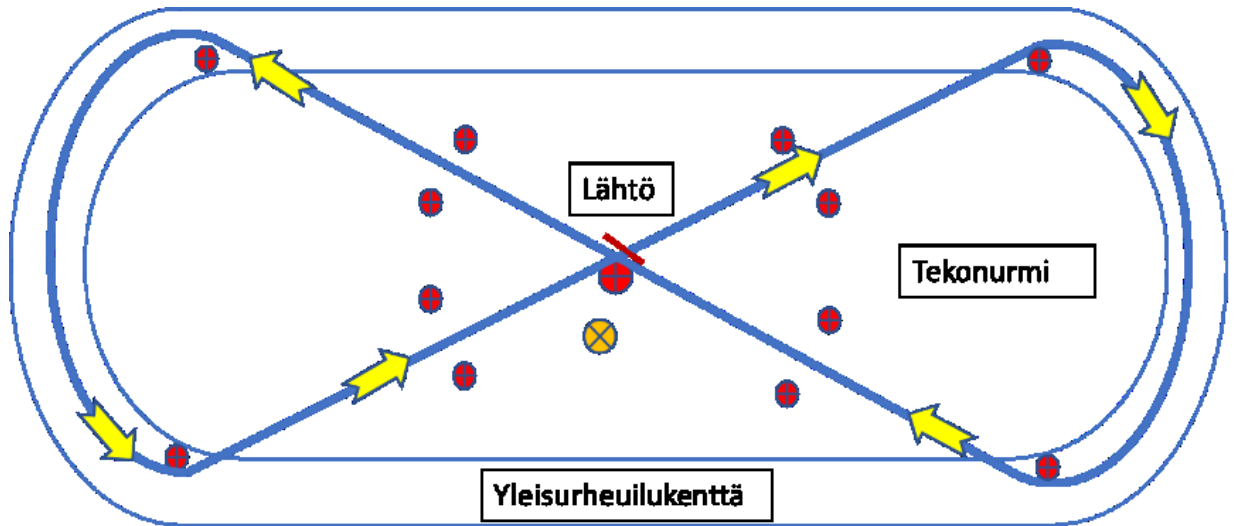
Tavoite 5 täyttyi, tämäkin kovalla rytinällä, sillä kiilat ja kiristyksset olivat pettäneet melkein kokonaan, mutta kestivät juuri sen verran että rinne ajo kyettiin testaamaan auttavasti. Tavoite 6 täyttyi, ja kyettiin toteamaan, että ei kumpikaan kiila rakenne ole riittävä sellaisenaan tähän käyttösovellukseen. Muilta osin Laykkan runko oli moitteettomassa kunnossa. Akun kesto oli yllättävän hyvä. Teoriassa akkujen puolesta ajoa oltaisiin voitu jatkaa merkittävästi pidemmälle.

#### **Jatko selvitystä ja kehitystä:**

- Diablojen ”putoaminen” pitää selvittää sekä korjata.
- Maavara sekä pitoa pitää parantaa vaihtamalla renkaat. Tämä tarkoittaa akseliston uusimista ja uudelleen suunnittelua.
- Kiilojen rakenne on suunniteltava uusiksi.



Kuva 1. Laykka V X.2


**Merkkien selitykset**

-  Operaattori
-  Kartio
-  Ajosuunta

Kuva 2. Kenttätesti 1 ajettava 8-rata.



Kuva 3. Yksi vääntyneistä ketjunkiristimistä sekä väliaikainen korjaus kiilaamalla kiihalla mallia 1.

**MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU**

SM10-kurssi / 1SM3 ja 1SM4

1A-työryhmä

Helsinki

**RAPORTTI**9.12.2020

---

## UGV-LAYKKAN KENTTÄKOERAPORTTI 8.12.2020

### 1. JOHDANTO

UGV-Laykkan kenttäkokeet toteutettiin 8.12.2020 Helsingissä Santahaminassa. Kenttäkokeen tarkoituksena oli testata UGV-Laykkan asejärjestelmän toimintakykyä ja testata järjestelmälle asetetut käyttäjän vaatimukset. Saatujen testitulosten perusteella voidaan käyttäjän vaatimuksia vielä tarkentaa. Kenttäkokeen tulokset sisältyvät hankkeen vaatimusten määrittelyyn.

UGV-Laykka on toistaiseksi demonstraattori, jonka suorituskykyvaatimuksia voidaan vielä tarkentaa.



Kuva 1: UGV-Laykka sekä asemoduuli varustettuna RK62 M1 asejärjestelmällä.

### 2. KENTTÄKOKEEN AIKATAULU, TOTEUTUS JA TOIMIHENKILÖT

Kenttäkoesuunnitelman mukaiseen aikatauluun tuli muutoksia johtuen järjestelmän käyttäjän korjaavista toimenpiteistä kenttäkokeiden aikana. Kenttäkokeen aikataulu on esitetty liitteessä 1.

Kenttäkokeen johti yliluutnantti Christian Andersson. Kenttäkokeeseen osallistui yhteensä kuusi (5) toimihenkilöä, jotka on esitetty kenttäkoesuunnitelmassa liitteessä 2. Lisäksi kenttäkokeeseen osallistui kadetti J Vainio keräämään havaintoja omaan kandidaatin tutkimukseensa järjestelmän toiminnasta.

Kenttäkokeen tarkempi maastoanalyysi ja kenttäkokeen aikana otetut valokuvat on esitetty liitteessä 3. Kenttäkokeen toteuttamishetkellä ilman lämpötila oli -2°C ja tasainen kylmä tuuli noin 5m/s. Puuskissa tuulennopeus oli noin 8m/s. Ilman lämpötila saatiin auton lämpömittarista ja tuulen voimakkuus tarkastettiin ilmantiiteenlaitoksen sivuilta. Kenttäkokeen toimintaympäristö eristettiin ja valvottiin toimihenkilöiden toimesta. Järjestelmän toiminnasta otettiin kuva- ja videomateriaalia kenttäkokeiden aikana.

Kenttäkokeen tulokset dokumentoitiin toimihenkilöiden toimesta testien suoritushetkellä. Tulokset on esitetty liitteessä 4.

Kenttäkokeen aikana noudatettiin seuraavia Puolustusvoimien varomääräyksiä:

MAAVVAROM D 2.1; AMMUNNAT JALKAVÄEN ASEILLA	HP941
PVVAROM D 1.2; YLEISET VAROMÄÄRÄYKSET ASEIDEN, ASEJÄRJESTELMIEN JA RÄJÄHTEIDEN KÄSITTELYSSÄ SEKÄ KÄYTÖSSÄ	HI540
PVVAROM D 7.5; KUULON SUOJAAMINEN	HJ407

### 3. JÄRJESTELMÄN OMINAISUUDET

Kenttäkokeen alussa toteutettiin järjestelmän punnitseminen ja mittaaminen. Mittaustulokset on esitetty taulukossa 1.

JÄRJESTELMÄN MITAT	
<b>Dimensiot UGV-Laykka (PxLxK)</b>	Renkaiden kanssa: 121cm x 121cm x 57 cm Ilman renkaita: 100 cm x 100 cm x 47 cm Rungon korkeus asetelineen kanssa: 113 cm Asetelineen korkeus (RK62 M1 + ACOG): 60 cm
<b>UGV-Laykka + moduulien painot</b>	UGV:n Runko + renkaat: 118kg UGV + miinamoduuli: 120kg UGV + asemoduuli: 132,5kg Aseteline + RK62 M1 + AGOC: 14kg UGV:n renkaan paino: 9kg / kpl Vaa'an virhe: +-0,5kg

<b>Dimensiot Ohjaimet (paino)</b>	Järjestelmän ohjaimena käytettiin tietokonetta (Dimension), Xbox-pelikonsolin ohjainta sekä lähetinmoduulia. Tietokone (Dimension): 2kg Xbox-ohjain: n. 500g Lähetinmoduuli: n. 500g
-----------------------------------	---

Taulukko 1: UGV-Laykka-järjestelmän painot ja mitat.

#### 4. KENTTÄKOKEEN TULOKSET

Kenttäkokeessa järjestelmälle asetettiin seitsemän (7) vaatimusta:

<b>Vaatus 1</b>	Järjestelmä on kyettävä varustamaan kevyellä aseistuksella.
<b>Vaatus 2</b>	Järjestelmän kameroilla on kyettävä valvomaan omaa ympäristöä 360°.
<b>Vaatus 3</b>	Järjestelmän rungon ja muiden rakenteiden tulee kestää 15kg hyötykuorman haastavissa maasto-olosuhteissa.
<b>Vaatus 4</b>	Järjestelmään kiinnitettyä aseistusta tulee pystyä liikuttamaan ylä- ja alasuunnassa.
<b>Vaatus 5</b>	Järjestelmän tulee pystyä ampumaan suoraan liikkeestä.
<b>Vaatus 6</b>	Kahden ihmisen on kyettävä nostamaan järjestelmä henkilö- ja/tai panssariajoneuvon kyytiin.
<b>Vaatus 7</b>	Järjestelmän ollessa STANDBY-tilassa, tulee akkujen kestää vähintään yhden (1) tunnin ajan.

Testaushenkilöstön koostuessa ensimmäistä kertaa laitteen näkevästä Puolustusvoimien upseereista, kerättiin toimihenkilöiltä kysely järjestelmän käyttöön liittyen. Kysely toteutettiin heti kenttäkokeiden jälkeen samana päivänä. Kyselyn kysymykset ja vastaukset ovat liitteessä 5.

#### 5. JÄRJESTELMÄN TESTAUSMENETELMÄT

Järjestelmälle asetettuihin vaatimuksiin vastataan seuraavilla testausmenetelmillä:

<b>Testi 1</b>	Järjestelmään kiinnitetään RK62M M1-asejärjestelmä. Arviointi toteutetaan KYLLÄ/OSITTAIN/EI asteikolla.  KYLLÄ = Asejärjestelmä on saatu kiinnitettyä laitteeseen ja ase pysyy kiinni järjestelmässä ilman käyttäjän korjaavia toimenpiteitä. OSITTAIN = Käyttäjä joutuu toteuttamaan korjaavia toimenpiteitä asejärjestelmän toimintaan operoinnin aikana. EI = Asejärjestelmä ei pysy kiinni järjestelmässä käyttäjän korjaavista toimenpiteistä huolimatta.
<b>Testi 2</b>	Järjestelmä asetetaan maastoon. Järjestelmän käyttäjä tarkkailee järjestelmän lähettämää videokuvaa päätelaitteen kautta. Koehenkilö kulkee laitteen ympärille piirrettyä kehää (r=5m). Arviointi

	<p>toteutetaan asteikolla KYLLÄ/OSITTAIN/EI.</p> <p>KYLLÄ = Järjestelmän käyttäjä näkee koehenkilön koko kierroksen (360°) ajan laitteen päätelaitteesta.</p> <p>OSITTAIN = Järjestelmän käyttäjä näkee koehenkilön osittain (&gt;360°) laitteen päätelaitteesta.</p> <p>EI = Järjestelmän käyttäjä ei näe koehenkilöä laitteen päätelaitteesta.</p>
<b>Testi 3</b>	<p>Testi sisältää yht. 5 kokonaisuutta:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Järjestelmän runko ja rakenteet tarkastetaan ja kuvataan ennen testin aloittamista.</li> <li>2. Järjestelmän päälle asetetaan 15kg kuorma käyttäen levypainoja. Järjestelmän runko sekä rakenteet tarkastetaan ja kuvataan uudelleen mahdollisten muutosten takia.</li> <li>3. Järjestelmällä ajetaan 50m matka hiekkatiellä, minkä jälkeen runko ja rakenteet tarkastetaan sekä kuvataan.</li> <li>4. Järjestelmällä ajetaan metsämaastossa 50m matka, minkä jälkeen laitteen runko ja rakenteet tarkastetaan ja kuvataan.</li> <li>5. Järjestelmällä ajetaan kivikkoisessa maastossa 50m, minkä jälkeen laitteen runko ja rakenteet tarkastetaan ja kuvataan.</li> </ol> <p>Jokainen kokonaisuus arvioidaan asteikolla KYLLÄ/OSITTAIN/EI</p> <p>Jos laite ei ole liikunta kykyinen testiin tullessa, tällöin tehdään kohdat 1 ja 2 sekä kuvataan mahdolliset muutokset rungossa. Lisänä laitetaan 25kg paino rungon päälle ja katsotaan runkoon aiheutuvat muutokset. Laitetta voidaan siirtää manuaalisesti, mikäli se on mahdollista.</p> <p>KYLLÄ = Järjestelmän runko sekä rakenteet ovat testien päättymisen jälkeen siinä kunnossa, ettei niillä ole heikentävää vaikutusta laitteen käytölle.</p> <p>OSITTAIN = Järjestelmä suoriutuu vain alle viidestä (&gt;5) testin kokonaisuudesta ja/tai käyttäjä joutuu puuttumaan järjestelmän toimintaan korjaavin toimenpitein testin/testien aikana.</p> <p>EI = Järjestelmän runkorakenteessa on selkeä murtuma/ halkeama mikä on havaittavissa tai yli 5° vääntymä rungossa testin/testien jälkeen.</p>
<b>Testi 4</b>	<p>Järjestelmän käyttäjä liikuttaa päätelaitteen kautta järjestelmän asetelineeseen kiinnitettyä RK62M M1-asetta. Arviointi toteutetaan asteikolla KYLLÄ/OSITTAIN/EI.</p> <p>KYLLÄ = Järjestelmän asetelineeseen kiinnitetty asejärjestelmä liikkuu käyttäjän päätelaitteen välityksellä ylä- ja alasuunnassa.</p> <p>OSITTAIN = Järjestelmään kiinnitetty asejärjestelmä liikkuu käyttäjän päätelaitteen välityksellä ylä- tai alasuunnassa tai tilanteessa, jossa käyttäjä joutuu tekemään korjaavia toimenpiteitä.</p> <p>EI = Asejärjestelmä ei liiku käyttäjän päätelaitteen välityksellä ylä- ja alasuunnassa.</p>
<b>Testi 5</b>	<p>Järjestelmään kiinnitetään RK62M M1-asejärjestelmä ja lipas. Käyttäjä ohjaa järjestelmää 25-50 % nopeudella maksiminopeudesta ja ampuu asejärjestelmällä suoraan liikkeestä yhteensä kolmekymmentä</p>



	<p>(30) laukausta. Arviointi toteutetaan asteikolla KYLLÄ/OSITTAIN/EI.</p> <p>KYLLÄ = Järjestelmä saavutti yhteensä kolmenkymmenen (30) laukauksen ampumisen suoraan liikkeestä 25-50 % nopeudella maksiminopeudesta.</p> <p>OSITTAIN = Järjestelmä saavutti yhteensä kolmenkymmenen (30) laukauksen suoritusvaatimuksen, mutta käyttäjä joutui tekemään korjaavia toimenpiteitä testin aikana (ei oteta huomioon häiriön poistoa tai aseensa lataamista tai jos laite ei kykene liikkumaan itse).</p> <p>EI = Järjestelmä ei saavuttanut yhteensä kolmenkymmenen (30) laukauksen suoritusvaatimusta käyttäjän korjaavista toimenpiteistä huolimatta.</p>
<b>Testi 6</b>	<p>Järjestelmä nostetaan kahden koehenkilön toimesta henkilö- ja/tai panssariajoneuvon kyytiin. Arviointi toteutetaan asteikolla KYLLÄ/OSITTAIN/EI.</p> <p>KYLLÄ = Koehenkilöt jaksavat nostaa järjestelmän henkilö- ja/tai panssariajoneuvon kyytiin. Lisäksi järjestelmä mahtuu henkilö- ja/tai panssariajoneuvon kyytiin.</p> <p>OSITTAIN = Koehenkilöt jaksavat / eivät jaksa nostaa järjestelmää henkilö- ja/tai panssariajoneuvon kyytiin. Lisäksi järjestelmä mahtuu / ei mahdu henkilö- ja/tai panssariajoneuvon kyytiin.</p> <p>EI = Järjestelmä on liian painava kahden koehenkilön nostettavaksi ja järjestelmä ei mahdu henkilö- ja/tai panssariajoneuvon kyytiin.</p>
<b>Testi 7</b>	<p>Käyttäjä asettaa järjestelmän sisätiloihin ja päätelaitteen erilliseen huoneeseen. Laitteesta kytketään kuvan lähetys päälle tunnin ajaksi. Arviointi toteutetaan asteikolla KYLLÄ/OSITTAIN/EI.</p> <p>KYLLÄ = Järjestelmä on lähettänyt suoraa videokuvaa päätelaitteeseen yhteensä yhden tunnin ajan ilman käyttäjän toimenpiteitä.</p> <p>OSITTAIN = Järjestelmä on lähettänyt suoraa videokuvaa päätelaitteeseen yhteensä yhden tunnin ajan, mutta käyttäjä on joutunut suorittamaan korjaavia toimenpiteitä testin aikana (esim. akkujen vaihtaminen).</p> <p>EI = Järjestelmä ei ole yhden tunnin aikana lähettänyt yhtäjaksoisesti suoraa videokuvaa päätelaitteeseen käyttäjän korjaavista toimenpiteistä huolimatta.</p>

Varsinaisten testien lisäksi testaushenkilöstön koostuessa ensimmäistä kertaa laitteen näkevistä upseereista tullaan näiltä keräämään FIR, joka litteroidaan järjestelmän suunnittelijan hyödynnettäväksi tulevaa jatkokehitystä varten.

## 6. KENTTÄKOKEEN TOIMINTAYMPÄRISTÖANALYYSI

Kenttäkoe tullaan suorittamaan Santahaminan esteradan lähi- maastossa. Järjestelmä on suunniteltu toimivan hiekkatiellä, asfaltilla, pienissä ojissa ja kangasmaastossa. Tarvittavat maasto-olosuhteet löytyvät esteradan lähiympäristöstä, mikä vastaa järjestelmän loppukäyttäjän toimintaympäristöä. Kenttäkokeen toimintaympäristö on kuvattu liitteessä 1. Kenttäkokeen toimintaym-

päristössä ei ole erillisiä häirintälaitteita, joilla aiheutettaisiin tarkoituksenmukaista häiriötä järjestelmälle. Testien ajaksi kenttäkoealue eristetään ja valvotaan toimihenkilöiden toimesta.

## 7. KENTTÄKOKEEN VAROMÄÄRÄYKSET JA- OHJEET

MAAVVAROM D 2.1; AMMUNNAT JALKAVÄEN ASEILLA	HP941
PVVAROM D 1.2; YLEISET VAROMÄÄRÄYKSET ASEIDEN, ASEJÄRJESTELMIEN JA RÄJÄHTEIDEN KÄSITTELYSSÄ SEKÄ KÄYTÖSSÄ	HI540
PVVAROM D 7.5; KUULON SUOJAAMINEN	HJ407

## 8. KENTTÄKOKEEN HENKILÖSTÖ

Kenttäkokeen johtajana toimii: ylil C Andersson  
Toimihenkilöt: ylil J Aaltonen, ylil A-P Koskimies, ylil T Malinen ja kad J Vainio  
EA-henkilö: ylil A Liakka  
Kirjaaja: ylil L Väättäinen

## 9. KENTTÄKOKEEN TESTITULOKSET

JÄRJESTELMÄN VAATIMUKSET (NRO)	JÄRJESTELMÄN VAATIMUKSEN MÄÄRITTELY	ARVIOINTIMETODELMÄ (KYLLÄ/OSITTAIN/EI)	LISÄHAVAINNOT
<b>Vaatus 1</b>	Järjestelmä on kyettävä varustamaan kevyellä aseistuksella	KYLLÄ	Asetelineen laukaisuservoa on muutettava ja laukausuliipaisua on parannettava.
<b>Vaatus 2</b>	Järjestelmän kame-roilla on kyettävä valvomaan omaa ympäristöä 360°	OSITTAIN	Takasektori vaaka 60° (1000°), kamera kääntyvä Etusektori 72° (1200°), kamera kiinteä Yhteensä valvoi 132° (2200°)
<b>Vaatus 3</b>	Järjestelmän rungon ja muiden rakenteiden tulee kestää 15kg hyötykuorman loppukäyttäjän toimintaympäristössä.	OSITTAIN	Runkoon ei tullut mitään murtumia. Ohjausjärjestelmiin ei tullut vikoja, laite liikkui ja kääntyi testin aikana.  Ennen testiä järjestelmän voimansiirtoa voitettiin ohjausvirheen takia, jonka seurauksena testiä ei voitu suorittaa kokonaan.
<b>Vaatus 4</b>	Järjestelmään kiinnitettyä aseistusta tulee pystyä liikuttamaan ylä- ja alasuunnassa	KYLLÄ	Ase liikkui ylä- ja alasuunnassa yhteensä 36° (600°)  Yläkoro: 18° (300°) Alakoro: 18° (300°)
<b>Vaatus 5</b>	Järjestelmän tulee pystyä ampumaan suoraan liikkeestä	OSITTAIN	Ennen testiä järjestelmän voimansiirtoa voitettiin ohjausvirheen takia, jonka seurauksena testiä ei suoritettu.  Järjestelmällä ammuttiin paukkupatruunoita yhteensä 199 laukasta. Järjestelmä oli paikallaan ammunnan aikana.
<b>Vaatus 6</b>	Kahden ihmisen on kyettävä nostamaan järjestelmä henkilö-	KYLLÄ	UGV-Laykka mahtuu VW-transporterin takatilaan renkaiden ja asetelineen kanssa koottuna.

	ja/tai panssariajoneuvon kyytiin.		
<b>Vaatus 7</b>	Järjestelmän ollessa STANDBY-tilassa, tulee akkujen kestää vähintään yhden (1) tunnin ajan.	KYLLÄ	Laitteen akku kesti koko testin ajan yli neljä (4) tuntia. Akkua ei testattu tyhjäksi asti.

Kenttäkokeessa saatiin seuraavanlaiset tulokset:

## 10. JOHTOPÄÄTÖKSET

Kenttäkokeessa saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että konsepti on toimiva kokonaisuus, vaikka järjestelmä vaatii vielä jatkokehittämistä.

Kenttäkokeessa testatut seitsemän (7) eri vaatimusta olivat osa järjestelmän kaikista asetetuista vaatimuksista. Kenttäkokeiden seitsemästä vaatimuksesta järjestelmä suoriutui yhteensä neljästä (4) testistä täysimääräisesti ja kolmesta (3) osittain.

Havainnot testien mukaisesti:

Testissä 1 havaittiin, että servon ja laukaisimen asento on huono. Lisäksi liipaisin on heikko. Edellä mainittuja rakenteita pitää parantaa ja kehittää, mutta konsepti on toimiva. Asetelineeseen saa kiinnitettyä RK62 M1- ja RK62-asejärjestelmän. Asejärjestelmä oli helppo ja nopea asentaa kiinni moduuliin.

Testissä 2 järjestelmä täytti osittain sille asetetun vaatimuksen. Järjestelmä ei kyennyt valvomaan 360 astetta, mutta kykeni valvomaan 132 astetta omaa lähialuettaan edestä ja takaa. Takakamera oli pyörivä, mikä paransi taka-alueen valvontaa. Etukamera oli laajalla perspektiivillä toimiva kiinteä kamera. Etukamera on sellaisenaan hyvä, mutta takakameran kääntösektoria pitää parantaa vähintään 180 asteiseksi. Vaatimusta kannattaa muuttaa 360 asteen sijasta 250 asteeseen. Tämä aste määrä riittäisi hyvin laitteen lähialueen valvomiseen.

Testi 3 johtuen operaattorin ohjausvirheestä, voitettiin järjestelmän voimansiirtoa. Järjestelmä toimi ohjausvirheestä huolimatta, mutta kenttäkokeen johtaja päätti lyhentää testiä lyhentämällä ajomatka viidestäkymmenestä (50) metrillä viiteen (5) metriin. Vaatus täyttyi hyvin 15kg hyötykuorman testissä. Järjestelmä testattiin 16kg:n kahvakuulalla, joka sijoitettiin asemoduuliin (+14kg) eli yhteensä 30kg. Järjestelmä ylitti sille asetetun vaatimuksen yhteensä 15kg:lla. Hyötykuorma ei vaikuttanut silmämääräisesti järjestelmän toimivuuteen tai runkorakenteeseen.

Testi 4 toteutui vaatimusten mukaisesti. Korot ovat järjestelmään sopivat. Korokulman säätönopeutta voisi lisätä nykyisestä noin 50 %.

Testi 5 johtuen operaattorin ohjausvirheestä, voitettiin järjestelmän voimansiirtoa. Järjestelmä toimi ohjausvirheestä huolimatta, mutta kenttäkokeen johtaja päätti lyhentää testiä. Ampuminen toteutettiin järjestelmän ollessa paikallaan. Aseen asennuksen aikana rikottiin asemoduulin laukaisin, jonka takia laukaisu piti suorittaa manuaalisesti narusta vetämällä. Järjestelmällä ammuttiin 199 laukausta sarja- ja kertatulella eri korokulmilla. Asemoduuli ja järjestelmä kestivät rekyylit erinomaisesti. Silmämääräisiä murtumia / vioittumia ei löydetty. Järjestelmä toimi tarkoitetulla tavalla testin jälkeenkin.

Testi 6 toteutui vaatimusten mukaisesti. Järjestelmän kokonaispaino moduulien kanssa on nykyiseltään lähellä maksimiarvoa, mitä kaksi henkilöä jaksaa kantaa / käsitellä toimiessaan järjestelmän kanssa. Järjestelmä mahtui VW transporter pakettiautoon koottuna. Tämä täyttää vaatimuksen, mutta järjestelmän koko ei saa kasvaa yhtään nykyisestään.

Testissä 7 järjestelmää pidettiin käynnissä yhtäjaksoisesti yhteensä neljä (4) tuntia. Järjestelmä kykeni lähettämään suoratoistokuvaa, liikkumaan, lähettää paikkatietoa ja muuta informaatiota. Testissä ei saatu tyhjennettyä UGV-Laykkan akkuja, mutta päätelaitteen (HP 720 kannettava tietokone) akku tyhjeni neljän tunnin jatkuvan käytön jälkeen. Vaatimus ylitettiin erinomaisesti.

Ehdotukset vaatimusten muutoksesta:

Vaatimus 1: Vaatimus on sopiva.

Vaatimus 2: Järjestelmän kameroilla on kyettävä valvomaan omaa ympäristöä 250°. Lisäksi toisen kameran pitää kääntyä vähintään 180°.

Vaatimus 3: Järjestelmän on kyettävä toimimaan haastavissa maasto-olosuhteissa 20kg:n hyötykuormalla.

Vaatimus 4: Vaatimus on sopiva.

Vaatimus 5: Vaatimus on sopiva.

Vaatimus 6: Järjestelmä ei saa painaa yli 140 kg. Järjestelmän koko ei saa ylittää 121 cm x 121 cm x 60 cm.

Vaatimus 7: Vaatimus on sopiva.

**11. ALLEKIRJOITUKSET**

	Kenttäkokeen johtaja Yliluutnantti	.12.2020	Christian Andersson
	Toimihenkilö Yliluutnantti	.12.2020	Jarkko Aaltonen
	Toimihenkilö Yliluutnantti	.12.2020	Ari-Pekka Koskimies
	Toimihenkilö Yliluutnantti	.12.2020	Taneli Malinen
	Toimihenkilö (oto. EA-henkilö) Yliluutnantti	.12.2020	Aaro Liakka
	Toimihenkilö (oto. Kirjuri) Yliluutnantti	.12.2020	Lauri Väätäinen
LIITTEET	5 = 10 sivua		
JAKELU	Työryhmän projektikansio TUVE-PVMOODLE Opintojakson opettajat		
TIEDOKSI	1A-työryhmän jäsenet		

**Kenttäkokeen aikataulu 8.12.2020**

<b>Tapahtuma</b>	<b>Aikataulu (klo)</b>	<b>Paikka</b>	<b>Kuka vastaa</b>
Valmistelut	7.12.2020	Santahamina	CAn
Auton nouto	7.12.2020 12:00	Santahamina	CAn
Patruunoiden nouto	7.12.2020 11:00	Santahamina	CAn
Robotin nouto	7.12.2020 18.00	Parola	CAn
Järjestelmän lyhyt koulutus ja esittely	8.12.2020 09:00	Ritaritalon parkkipaikka	CAn + kokoryhmä
Testin aloittaminen	8.12.2020 09:00	Ritaritalon parkkipaikka	CAn
Testi 1	8.12.2020 09:15	Ritaritalon parkkipaikka	CAn + JAa
Testi 6	8.12.2020 09:30	Ritaritalon parkkipaikka	Koko ryhmä
Järjestelmän punnitseminen	8.12.2020 10:00	Santahaminan Keskusvarasto	Koko ryhmä
Testi 7	8.12.2020 10:30	Esteradan maasto	Koko ryhmä
Ruokatauko	8.12.2020 11:30-12:00	Santahamina ruokala	Koko ryhmä
Testi 2	8.12.2020 12:15	Santahaminan urheilukenttä	Koko ryhmä
Testi 3	8.12.2020 12:30	Santahaminan urheilukenttä	Koko ryhmä
Testi 4	8.12.2020 12:45	Santahaminan urheilukenttä	Koko ryhmä
Testi 5	8.12.2020 13:00	Vanha pistoolirata	Koko ryhmä
Testin päättäminen ja kenttäkokeen purkaminen	8.12.2020 13:45	Santahamina	CAn + Koko ryhmä
Raportin puhtaaksi kirjoittaminen	9.12.2020	Santahamina/etänä	CAn + JAa

**Kenttäkokeen toimintaympäristö ja testien kuvamateriaali**

Kuvissa 1-3 on esitetty kenttäkokeen toimintaympäristö, jossa järjestelmää testattiin.

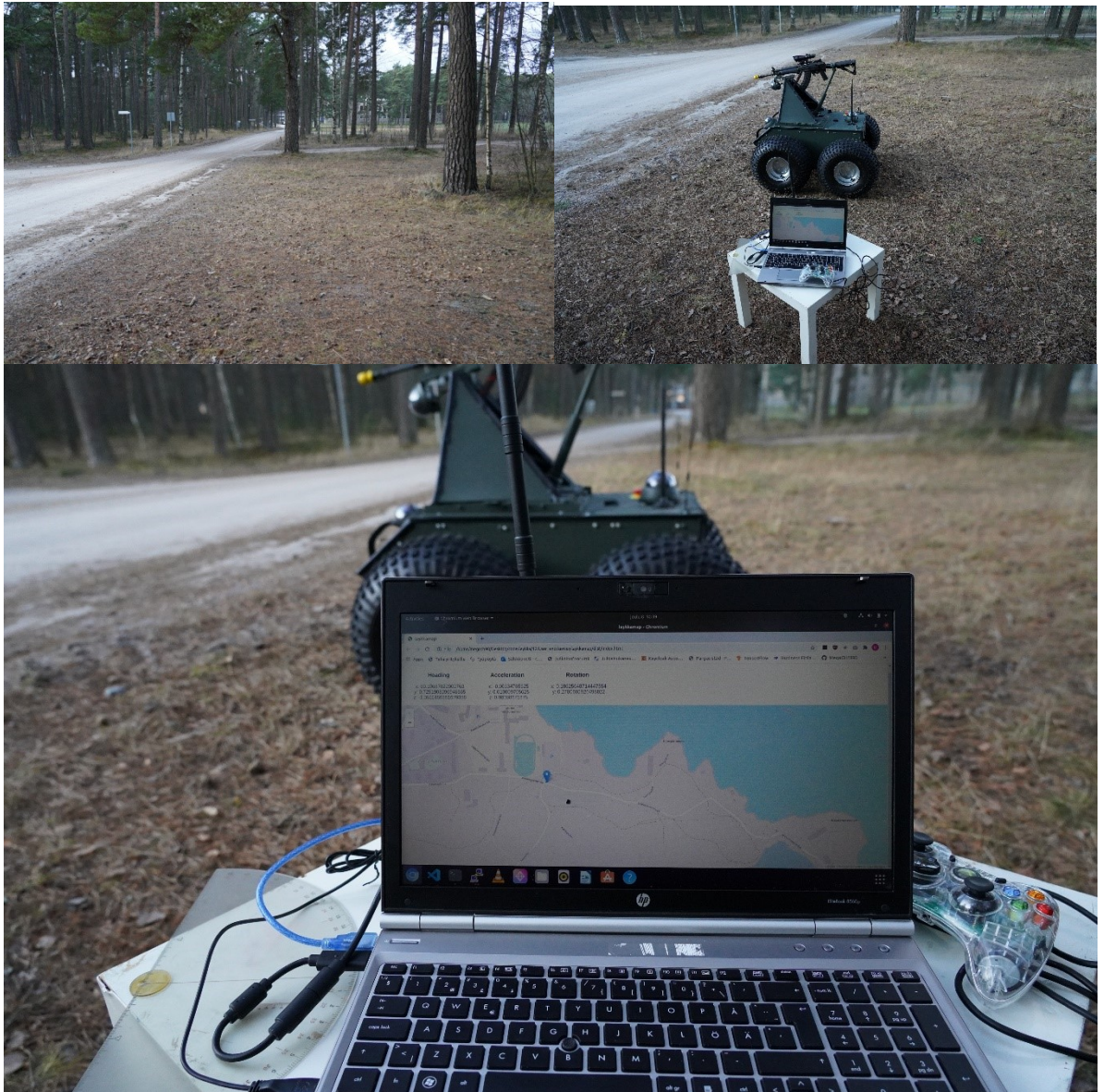




Kuva 1: Järjestelmää käytettiin päällystetyllä tiellä testeissä 1-4.



Kuva 2: Järjestelmällä ammuttiin paikaltaan pistooliradalla testissä 5



Kuva 3: Esteradan maastossa toteutettiin testi 7.

**TULOSLOMAKE, UGV-LAYKKA**

Testi	Tulos (Kyllä/osittain/ei)	Muut havainnot		
1 (Aseen kiinnittäminen)	Kyllä			
2 (Näkökenttä)	Osittain	Takasektori +/- 500 <sup>v</sup> Etusektori +/- 600 <sup>v</sup>		
3 (Lisäpaino ja ajaminen)	1	Silmämääräinen tarkastus	Kyllä	Rungon päällä aseteline + 16 kg kahvakuula. Laite liikkui, mutta ajotestiä ei voitu suorittaa löysällä olevien ketjujen takia. Laitteessa ei havaittu lisäpainosta johtuvia murtumia tai vääntymiä.
	2	Painon lisäys 15kg	Kyllä	
	3	50m ajo hiekkatiellä	Osittain	
	4	50m ajo metsämaasto	Ei	
	5	50m ajo kivikkoisen	Ei	
4 (Aseen koron säätäminen)	Kyllä	Koro säätyi vaakatasosta +/- 300 <sup>v</sup>		
5 (Ampuminen liikkeestä)	Osittain	Sarjatulta ammuttiin 30 laukausta kerrallaan ilman merkkejä murtumista tai vääntymistä. Testi suoritettiin paikallaan olevasta laitteesta.		
6 (Järjestelmän kannettavuus)	Osittain	Kaksi koehenkilöä sai nostettua renkailla ja asetelineellä varustetun laitteen VW Transporterin kyytiin. Panssariajoneuvon kyytiin nostamista ei testattu. Korkeamman auton lavalle (testissä kuvattiin lastauslaiturilla) nostettaessa tarvittiin kolmas koehenkilö nostamaan, kun laitteessa oli pyörät ja aseteline paikoillaan.		

7 (Akun kesto)	Kyllä	Ensimmäinen käynnistys klo 10.35, testi päättyi 13.35. Järjestelmä oli käynnissä yhtäjaksoisesti 1h useita kertoja, eikä akun keston kanssa ollut haasteita. Testi toteutettiin ulkoilmassa, lämpötilan ollessa noin -2°C.
----------------	-------	--

## KYSELY

### 1. Ensireaktio laitteesta? Mitä ajatuksia herätti ennen ensimmäistä ajoa?

Pohdin koneen käyttötarkoitusta, suurta kokoa ja kuljetettavuutta.

Järjestelmän koko yllätti. Jotenkin oletin sen kompaktimmaksi, nyt varsinkin suurilla renkailla oli jo melko kookas. Tietysti kyseessä on vielä DEMO, joten liikaa ei saisi vakiintua nykyiseen ulkomuotoon.

Vaikutti kooltaan suuremmalta mitä mielikuvat olivat antaneen koneesta.

Järjestelmän koko ja siihen integroitavissa olevat aseteline + pohjamiinan sija yllättivät positiivisesti.

Laite oli tukevan ja kestävä tuntuinen. Tuntui hurjalta, että PV:ssä voitaisiin hankkia jotain tuollaista uhrattavaksi vaunun alle.

### 2. Mihin ja miten käyttäisit laitetta itse? (omassa aselajissa/ toiminnassa)

Laitetta voisi erikoisjoukkotehtävissä hyödyntää esim. kriittisten paikkojen tiedusteluun. Esim. mahdoll. IED, jokin sisäänmenopiste, kadun pätkä tai vastaava. toinen käyttökohde olisi ehdottomasti jonkin reitillä olevan esteen tuhoaminen tyyliin IED:n rai-vaus. Oven, portin tai muurin murtaminen räjähteillä tai vastaava.

Sirotemiinoittaminen (vaatisi oman "lavetin" miinalingolle/vast.), miinojen raivaamiseen ampumalla (ihan kaikkien aselajien käyttöön, ei pelkästään pioneerien). Voisi myös käyttää releasemanan hyökkäyksessä (kärjessä etenevän joukkueen ja komentopaikan välillä esimerkiksi); pioneeri tuppaa työskentelemään hieman vanhemmalla kalustolla, joten M18 on aika utopiaa monellekin SA joukolle.

Järjestelmän käyttö osana puolustukseen ryhmittynyttä jääkärijoukkuetta. Voisi käyttää mm. sivustan suojaamiseen (valvonta suoran videokuvan välityksellä) sekä vaikuttamalla (tuhota) vastustajan panssariajoneuvoja vastaan. Liitettynä osaksi muita (epäsuoratuli, miinoittaminen, pst-aseet...) saataisiin tehokkaampi vaikutus.

Ilmatorjunnan johtopaikkojen lähipuolustuksen ja vartioinnin tukena, esim. etupesäkkeen lisäksi tuottamaan kuvaa kauempaa. Mahdollisesti myös uusien tuliasemien tiedusteluun, tietyn rajauksin.

### 3. Mitä lisäominaisuuksia järjestelmä mielestäsi tarvitsisi, varsinkin omaa käyttöäsi varten?

Kauko-ohjattava maasto-ugv tarjoaa jos jonkinlaisia mahdollisuuksia, omassa aselajissa lähettitoiminta kai olisi lähimpänä, mutta yleisesti näkisin logistisena ratkaisuna pienten artikkelien kuljettamiseen ja haavoittuneiden evakuoitinta varten. Varsinkin

myöhemmässä vaiheessa mikäli järjestelmään saadaan enemmän autonomisia ominaisuuksia, kuten hakeutuminen ohjelmoituun pisteeseen, toimisi se merkittävänä tukena esimerkiksi etäisten ryhmien huollossa. (Erilliset viestiasemat, tiedustelijat ja it-ryhmät).

Erikoisjoukkojen käyttöön laite on ehdottomasti liian iso ja vaikeasti kuljetettavissa. painoa ja kokoa voisi käyttötarkoitukseeni pienentää vähentämällä mm. maastoliikkuvuutta ja kantokykyä. (pienemmät renkaat, pienempirunko etc.)

Autonomia. Nyt vaadittava jatkuva ohjaus syö yhden miehen käytännössä koko ajo-  
tehtävän ajan.

Sivunäkyvyys kameroille.

Lämpökamera olisi hyvä lisä! Varsinkin jos luminen maasto. Syvään lumeen järjestelmää ei ole luotu, malli "Arktinen" tarvitsisi telat / vast. alle.

Pitäisi saada hieman kevyemmäksi, jotta olisi helpompi nostaa kuorma-auton lavalle.

#### **4. Mitä vikoja/ virheitä näet järjestelmässä?**

Ohjain konfiguraatio oli mielestäni hyvä, mutta ehkä käyttölaite tulisi saada kompaktimmaksi ja esim. ainoastaan yksi komponentti jolla järjestelmää käytetään ja ohjataan.. tyyliin padi..

Nykyiseen aseiden käyttöön sekä mahdolliseen PST-aseiden käyttöön ohjauksen ja varsinkin tähtäyksen nopeutta ja tarkkuutta olisi mielestäni parannettava.

Paikallaan kääntymisessä jonkin paikan pitää antaa periksi, tänään ne olivat ketjut. Mikäli ketjut olisi ollut kierällä, olisi se rasittanut moottoreita. Koodiin olisi hyvä ohjelmoida että, kun halutaan kääntyä paikallaan ympäri osaisi moottorit pyöriä eri puolilla konetta eri suuntiin automaattisesti, näin ongelman pitäisi ainakin pienentyä.

RK:n aselavetti on hidas ja hieman kömpelö. Parannus esim. tähtäinkuvio päätelaitteeseen / vast.? Nyt on aika lailla pelote enemmän kuin tuottaa tappioita-idea. Lisäksi liipaisin mekanismi hyvin herkkä, meni rikki kuljetuksen/kiinnittämisen aikana. Lisäksi internetin vaatimus järjestelmän käytölle pitää saada niin, ettei huono internetyhteys estä laitteen käyttöä (varsinkin Lapissa kun internet ei kauhiast toimi jänkhäl!)

Liikkuvuuden parantamiseen ketjuvedon vaihtaminen hihnavetoon mahdollistaisi hihnan luistamisen, jolloin moottorit eivät petä ensimmäisenä. Toinen vaihtoehto olisi tehdä laitteesta takavetoinen, jolloin vastukset eivät nousisi moottoreilla niin suuriksi (ehkä). Rynnäkkökiväärin korvaaminen tarkoitukseen tehdyllä asejärjestelmällä olisi varmempi ratkaisu kuin irrallinen RK laitteen päällä. Näin voitaisi saada esim. sähköllä toimiva laukaisu ilman että tarvitsee mekaanisesti painaa liipaisinta. ITKK:n apuaseen tyyppinen ase, jonka saisi tukevammin kiinni ilman ylimääräistä painoa.

#### **5. Mikä yllätti positiivisesti?**

Koko projekti. Jo tämänhetkinen vaihe on todella pitkällä yksittäisen keksijän päähänpistosta lopulliseen tuotteeseen.

Monipuoliset tiedonsiirto ja ohjaus "reititykset" → voi käyttää radion ja netin välityksellä etc.

Kokonaisuus. Vaikkei kaikki toiminutkaan täydellisesti, tulee järjestelmässä olemaan hyviä ominaisuuksia kun se vaan saadaan valmiiksi.

Järjestelmän tarkoitus ilmeni hyvin jo demonstraatiosta! Ei kannata tehdä kallista ja hienoa, jos ensisijainen tehtävä on tuhota panssarivaunuja tuhoamalla järjestelmä siinä samalla. Ensimmäiseksi kenttäkokeeksi tällä demolla hyvä suoritus, pieniä parannuksia niin se on siinä!

Jämäkkyys ja yllättävän viimeistelty kokonaisuus. Liikkuvuus oli yllättävän ketterää ja aseteline pysyi paikoillaan. Laite tuntuu jo nyt fyysisesti suhteellisen kestävältä, vaikka ohjelmisto ja elektroniikka vaatiikin vielä ruggerointia.

## 6. Vapaa sana

Hyvä prototyyppi, jota hiomalla ja parantelemalla laitteesta voi saada erittäin käyttökelpoisen tai se voi vähintäänkin toimia esikuvana useille uuden sukupolven järjestelmille. Ammattimainen ja kekseliäs toteutus.

Muutamia heittoja, saa käyttää mut ei pakko ole. Tosiaan se ohjaamisen menetelmän manuaalinen valinta helpottaa varsinkin demoamisvaiheessa. Esimerkiksi 4-tilainen kytkin (AUTO-VPN-RF-BT), joissa auto tekisi nykyisen ohjelman mukaisesti ja muut pakottaisi tietyn tyyppin ohjauksen. Helpottaisi myös eri ominaisuuksien kokeilua. Lisäksi edelleen tartun tähän, että jokaiselle renkaalle oma moottori, varsinkin kun olet asettanut ohjaukset vetämään samantahtisesti puolille (eli molempia vasemmanpuoleisia renkaita ohjataan samalla syötteellä). Nyt aiheuttaa turhaa kitkaa koska moottorit eivät kuitenkaan aivan täysin identtisesti toimi, jolloin samanpuoliset renkaat pyrkivät pyörimään eri nopeudella. Jos puolella olisi yksi moottori ja voima vain siirrettäisiin samansuuruisena molemmille akselille (vaikka pitkällä ketjulla jos ei muuten) kierrosnopeudet pysyisivät varmasti samana ja paino sekä kustannukset pienenisivät.

Kaiken kaikkiaan huikea projekti, oli hauska nähdä miten pitkälle olet jo päässyt! Kiitos demonstraatiosta.

Kenttäkoe saatiin toteutettua maastoliikkuvuustestiä lukuunottomatta hyvin. Lisäksi ampuminen liikkeestä jäi toteuttamatta, mutta paikaltaan onnistui hyvin pikku kikkailujen ansiosta. Materiaali kenttäkokeeseen oli riittävä, varsinkin a-tarvikkeiden osalta. Akku laitteessa on riittävä, tietokoneen akku kylmissä olosuhteissa ei kestä kauaa (olisiko Tough book / vast. ratkaisu? sama mitä kentällä käytetään?). Painon puolesta ollaan maksimissa, laitetta haastava kantaa kahdestaan yli 20m pitempiä matkoja (kahvojen kehittäminen paremmiksi?). Laite käyttää perus tavara-kaupasta saatavaa materiaalia, hyvä niin! Ja vieläpä halpaa (suurimmaksi osaksi?).

Kunnioitettava kokonaisuus. Kenttäkokeessa saatiin mielestäni testattua oikeita asioita ja havainnot olivat tässä vaiheessa projektia hyviä, jotta asiaa saadaan kehitettyä eteenpäin. Ohjausjärjestelmää pitäisi saada kehitettyä taistelunkestävämmäksi (muutenkin kuin maalaamalla ohjain vihreäksi) ja yksinkertaisemmaksi. Lopputuotteena näkisin LAYKA:n sellaisena, että siinä on yksi kytkin, jolla saadaan virrat

päälle. Ja ohjaimessa olisi mahdollisimman vähän kytkimiä tai ominaisuuksia. Ehkäpä käyttö kahdella operaattorilla, joista toinen ajaa ja toinen käyttää oheislaitteita, kuten aseistusta ja kameroita?



**KENTTÄTESTI 2, LAUANTAI 03.04.2021**

**Keli:** Puolipilvistä, kostea, osittain märkää lunta maassa

**Lämpö:** noin +5 astetta

**Kentän pinta:** Nurmikko sekä juoksu rata kosteita ja osittain märkiä, märkää lunta juoksuralalla. Lunta juoksuralalla noin 5-8 cm, mitattu viivoittimella. Kuva 1.

**Tuuli:** 5 m/s

**Laykka runko:** V X.3; Kuva 2

**Paikka:** Helsinki, Santahamina: yleisurheilurata

**Testi rata:** 8-rata pieni (Kuva 3), 1 kierros noin 140 m, mitattu mittanauhalla. Arvioitu virhe +- 5m

**Testi alkoi klo:** 14:45

**Testi loppui klo:** 16:53

**Painot:** Ei lisäpainoja

**Moduulit:** Miina moduuli, tyhjänä

**Akku lataus alussa:** - jännitemittari jäi testeistä pois

**Akku lataus lopussa:** -

**Tavoitteet:**

- 1) Ajaa vähintään 2km yhtäjaksoisesti
- 2) Ajaa 4km yhtäjaksoisesti
- 3) Kyetä toimimaan sekä ajamaan lumenpäällä jäämättä kiinni.
- 4) Testataan ketjunkiristinmallien toimivuudet
- 5) Moottorihidastamisen yleinen toimivuus

**Havainnot testin aikana:**

Laykka kykeni siirtymään ajamalla lumisen kumpareen yli ja mäkeä alas. Mäen alla olevan lumen päällä Laykka kykeni moitteettomasti ajamaan pois lumenpäältä nurmikolle jäämättä kiinni. Laykkalla ajettiin melkein yhtäjaksoisesti 10 kierroksen verran. Radan päässä Laykka teki käännökset lumihangessa, joka rasitti järjestelmää merkittävästi. Tästä rasituksesta Laykka selvisi mekaanisilta osilta todella hyvin. Laykassa oli asennettu 3 versiot ketjunkiristimistä sekä uudet akselinkiristimet. Uudet laakerinkiristimet toimivat moitteettomasti, sillä Laykka ei pitänyt minkäänlaista ”krahinaa” ketjuista ensimmäiset 3 kierrosta. Tätä edesauttoi myös ohjelmoitu hidastin. Tällöin pysähdys on hallitusti hidastettu eikä niin äkkipikainen kuten vielä kenttäkokeessa, joka johti ketjujen ”löystymiseen” ja näin krahinaan. Muuten kuten aiemmista testeistä oltiin ajoittain huomattu, Laykka on hyvin hiljainen, tämä hiljaisuus korostui varsinkin nyt kun kyettiin ajamaan pidempi jakso yhtäjaksoisesti. Kuitenkin lumen tuoma rasitus näkyi, ja edesauttoi paikantamaan rakenteellista ongelmaa. Muilta pyöriltä ”krahina” on onnistut poistamaan, ja ”krahinan” ääni kuuluu selkeästi etuoikeasta voimansiirrosta. Ketjujen löystyminen havaittiin tapahtuvan erityisesti kun pyörimissuunta vaihtui sellaiseen suuntaan missä ketjun kiristystä ei ollut (eli päältä), jolloin kun kiristys tehtiin kaksipuoliseksi, ketjun värähtely pysähtyi ylärullaan sekä piti ketjut kumpaakin pyörimissuuntaan kiireänä, poistaen näin ”karhinnan”. Etuoikean moottorin sekä ketjun ”krahina”, johtuu moottori

kiinnityksen jatkuvasta löystymisestä. Ruuveihin on selkeästi lisättävä tight lock ainetta. Kun ruuvit pääsevät tärinästä aukeamaan, moottori pääsee joustamaan juuri sen verran istukassaan, että ketjujen hyppääminen (täten krahinan ääni) tapahtuu.

Moottorin hidastin ohjelma toimi moitteettomasti yleisellä tasolla. Moottorin hidastin toimii myös kiihdytyksen tasaajana. Testihetkellä ohjain oli mallia lineaarinen. Ohjaimen avulla halettiin tasata voimansiirtoon kohdistuvaa äkillistä räsitusta ja estää äkkipysähdykset, jotka räsittävät turhaan rakenteita. Hidastinta pitää säätää sopivammaksi, sillä vaikka se teki tehtävänsä ja äkki pysähdykset ja kiihdytyksen onnistuttiin eliminoimaan ei se kuitenkaan vastannut ohjausta riittävän hyvin, ei ollut riittävän ”pehmeä”.

Järjestelmään ohjelmoitu EPO-reset sekä ohjaimen ohjelmoitu toiminnallisuus mahdollisti robotin ajamisen ja moottoriohjaimien resetoinnin vaivattomasti. Tämän ansiosta ajoa kyettiin tekemään yhtäjaksoisesti noin 2 kierroksen välein, jonka jälkeen yleensä EPO kytkeytyisi päälle.

Noin 11 kierroksen käänöksessä (lumessa) tapahtui jotain odottamatonta. Vasemmanpuolen moottoriohjain lakkasi toimimasta. Suoritettiin järjestelmä analyysi. Järjestelmästä kyseinen moottoriohjain oli toiminnassa mukana, mutta moottorit pitivät nakuttavaa ääntä. Ohjain ei kyennyt jostain syystä enää antamaan tarpeeksi virtaa. Suoritettiin ristiin kytkentöjä, jolla todettiin, että vika ei ollut moottoreissa, sillä ne saatiin toimimaan oikeanpuolen moottoriohjaimella. Ohjainta silmämääräisesti tarkastellen, pintapuolisesti mitään selkeästi erottuvaa ongelmaa ei näkynyt. Järjestelmä kuitenkin edelleen välitti virtaa muulle järjestelmälle ja löytyi virtuaalisesti. Koska yksikään sulake ei ollut palanut, voi poissulkea virtapiikin akuilta. Mutta on hyvin mahdollista virtapiikki toisesta suunnasta eli moottoreilta. Pitää poistaa kyseinen virtapiiri ja tarkastella sitä lähemmin löytääkseen vian.

Kenttätesti keskeytettiin moottoriohjaimen rikkoutumisen johdosta.

### **Lopputulokset:**

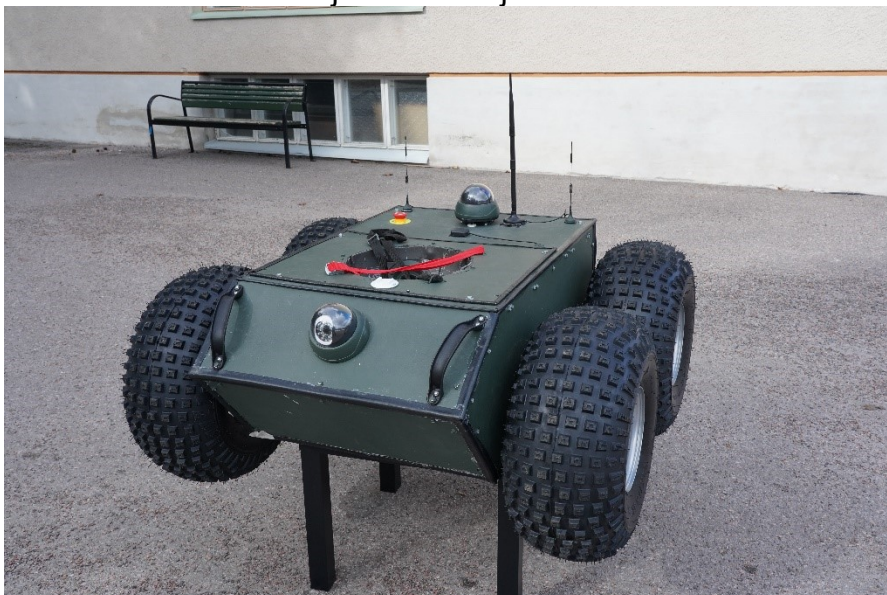
Laykka kykeni ajamaan noin 1.5 km osittain katkonaisesti. Tavoitteet 1 ja 2 eivät toteutuneet. Laykka kykeni ajamaan lumikasan yli ja lumenpäällä. Lumenpäällä kykeni kääntymään sekä toimimaan hyvin jäämättä pohjastaan kiinni. Tavoite 3 täten toteutui. Ketjunkiristimien osalta voidaan todeta mallin 3 olevan hyvä ja tekevän työnsä erinomaisesti, vähentäen melua ja pitäen ketjut hyvin kireänä. Etuoikean voimavälityksen ”krahinan” äänen syy on nyt kyetty paikallistamaan tarkemmin ja voidaan poissulkea huono ketjujen kiristys ongelman syynä. Tavoite 4 toteutui. Tavoite 5 toteutui osittain, ohjelma oli robusti ja toimi oikein. Tarvitaan lisää ajoa, jotta ohjain saadaan sopivan pehmeäksi ja responsiiviseksi taatakseen mukavan ajo-ominaisuuden.

### **Jatko selvitystä ja kehitystä:**

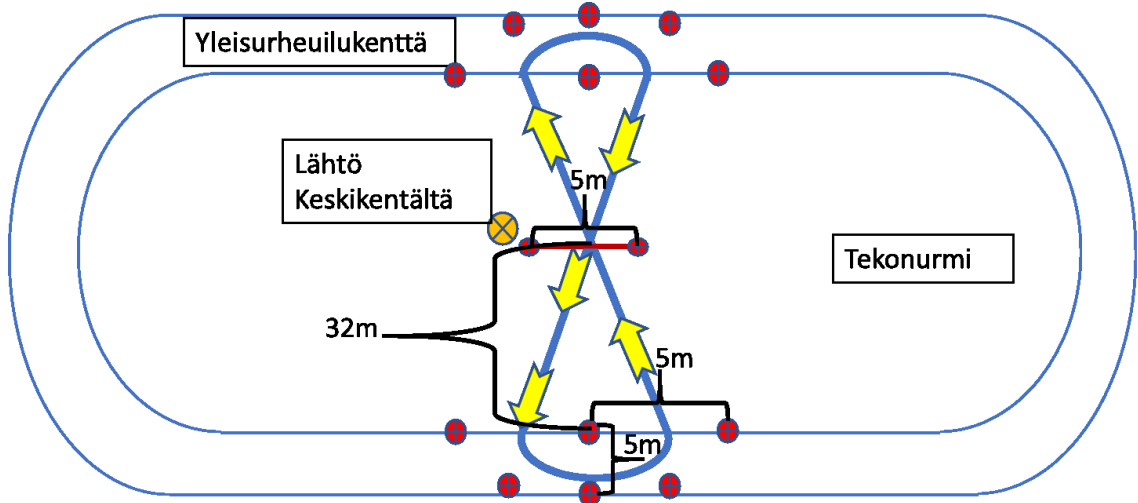
- Selvitetään Diablo moottoriohjaimen rikkoutumisen syy
- Säädetään moottorihidastimen toimintaa
- Tarvittaessa vaihdetaan moottoriohjaimet Sabertooth 2x32:eihin
- Kiristetään etuoikean moottorin kiinnitysmuttereita sekä ketjua. Lisätään kiinnitysmuttereihin tight lockia. Tarkastellaan seuraavassa testissä krahinan vähentymistä ja moottorin kiinnitystä.



Kuva 1. Keliolosuhteet ja lumisuus juoksu radalla.



Kuva 2. Laykka runko X.3



Huom! Kuva ei mitta  
suhteessa

**Merkkien selitykset**

-  Operaattori
-  Kartio
-  Ajosuunta

Kuva 3. 8-rata mallia pieni

**KENTTÄTESTI 3, PERJANTAI 23.07.2021**

**Keli:** Aurinkoista

**Lämpö:** noin +20 astetta

**Kentän pinta:** Nurmikko sekä juoksu rata kuivia Kuva 1.

**Tuuli:** 5 m/s

**Laykka runko:** V X.3 Kuva 1.

**Paikka:** Helsinki, Santahamina: yleisurheilurata

**Testi rata:** 8-rata mallia pieni, 1 kierros noin 140 m, mitattu mittanauhalla. Arvioitu virhe +/- 5m

**Testi alkoi klo:** 09:45

**Testi loppui klo:** 11:30

**Painot:** Ei lisäpainoja

**Moduulit:** Miina moduuli, tyhjänä

**Akku lataus alussa:** 25.8V (100 %)

**Akku lataus lopussa:** 23.8V (30 %)

**Tavoitteet:**

- 1) Ajaa vähintään 2km yhtäjaksoisesti
- 2) Ajaa 4km yhtäjaksoisesti
- 3) Testata Sabertooth 2x 32 toimivuus
- 3) Testata mikrofonin toiminta
- 4) Tarkastella etuoikean ketjujen kireyttä sekä mahdollista kahinan syntyä
- 5) Testata GUI:n toimivuutta
- 6) Tarkastaa uuden kameransuojuksen heijastuksen vähenemistä

**Havainnot testin aikana:**

Laykka ajettiin mäkeä alas ja testipaikalle. Oli jo heti silmiin nähtävissä, että uudet moottoriohjaimet toimivat erittäin hyvin. Laykka tuntui ja näytti paljon tehokkaammalta, sekä näytti silmin kulkevan ripeämmin. Nopeus ja kiihdytys data ei voitu saada ikävä kyllä vielä kukaan laitteesta ulos GUI:n välityksellä. GUI:ssa havaittiin muutamia muitakin puutteita. Kartta ei toiminut ja täten GPS paikannus ei piirtynyt. Myöskään ei saatu koordinaatteja eikä nopeuksia esille. Ongelma on ollut tiedossa, ja siihen on löytynyt ratkaisu, jota ei vaan keritty implementoimaan täysimääräisesti ennen testiä.

Kamerakuvassa ja äänessä noin 1s viive. Yhteyksissä ilmeni testin aikana pieniä ongelmia, ne saattoivat katketa hetkellisesti, jolloin kun vaihtoi radiosta GSM yhteyteen, yhteydet palasivat heti ja toisinpäin. Näin kävi yhteensä 2 kertaa. Ensimmäinen tapahtui 18 kierroksen aikana ja toinen kerta tapahtui 25 kierroksen jälkeen.

Laykka ajoi onnistuneesti 18 kierroksen verran (2,5km). Tässä kohtaa yhteyskatkos oli jostain syystä pidempi ja käytiin robotilla tarkastamassa se. Latausta oli selkeästi riittävästi (24.5V eli noin 55 % virtaa jäljellä). Moottorit olivat tosin hyvin lämpimät, mahdollisesti moottorinohjain oli hetkellisesti pysäyttänyt liikkeen estääkseen ylikuumentumisen. On myös mahdollista, että yhteydet olivat vain hetkellisesti matalana. Sillä robottia ei tarvinnut resetoita tarkistuksen jälkeen, se alkoi taas toimimaan itsestään vaihtamalla yhteystyyppiä muutaman kerran edestakaisin ja noin 5 min tauon jälkeen.

Etuoikea ketjun ”krahina” oli vähentynyt selvästi, kun ketjua kiristettiin entisestään sekä lock tightia lisätty moottorin kiinnitysmuttereihin, mutta ei kokonaan eliminoitu. Kun 18 kierroksen jälkeen tarkistettiin Laykkaa kyettiin ongelman syy paikantamaan. Moottori pääsee pitää kahinan ääntä kun ketju pääsee hyppäämään hammasrattailla moottorin päässä. Tämä hyppy tapahtuu koska ketjun kireys on löysällä. Tässä tapauksessa ketjun kireys ei päässyt löystymään vaan moottori joustaa kovan paineen alla juuri sen verran että hyppy pääsee tapahtumaan. Jousto johtuu vääntyneestä moottorin kiinnityssiivekkeestä, joka ei istu riittävän tukevasti kiinnityspalkkia vastaan vaan pääsee joustamaan.

Taipuneen siivekkeen syynä on postitus. Jossain toimituksen vaiheessa kyseinen moottori oli kokenut kovan kolauksen siivekkeeseen, johtuen mitä todennäköisemmin huonosta paketinkäsittelystä. Rungon rakentamisen alkuvaiheissa, kun moottorit olivat saapuneet, siivekettä yritettiin suoristaa niin suoraksi kuin vaan oli mahdollista, siinä onnistuttiinkin jossain määrin, mutta näköjään ei riittävästi. Ainoana vaihtoehtona on korvata moottori uudella vastaavanlaisella moottorilla, jossa siivekkeet olisivat ehjät. Ominaisuudesta huolimatta, tällä kertaa ”krahina” ei pahentunut tai ajo muuttunut huonommaksi, vaan pysyi tasaisena läpi testin.

Hidastinta pitänee säätää vielä entisestään. Sillä täysillä tehoilla ajattaessa Laykka on hankala ohjattava ja ”lähtee niin sanotusti helposti lapasesta”. Vaatii ajajalta paljon keskittymistä ajoon. Ajon aikana ei saa tehdä liian äkkinäisiä liikkeitä tai ohjauksia, jotta ”ei lähde lapasesta”.

Laykka ajoi yhteensä 30 kierrosta (4.2km) jonka jälkeen Laykka ajettiin mäkeä ylös takaisin parkkipaikalle. Laykka annettiin olla paikallaan kaikki laitteet päällä noin 15 min verran. Tämän aikana testattiin kameroita. Etukameran häiritsevä heijastus, taitto sekä sumeus oltiin saatu poistettua vaihtamalla kameran suojusta. 15 min tauon jälkeen Laykkalla ajettiin vielä noin 50m matka, todistaakseen, että laite kykenee toimimaan vielä pitkän ajon ja odotuksen jälkeen moitteettomasti. Latausta oli Laykkassa testin päätyttyä 23.8V eli noin 30 % virtaa

jäljellä. Kaikki kenttätestille asetetut tavoitteet oltiin tällöin saavutettu. Testi oli hyvää päättä tähän kohtaan, sillä operaattorin päätelaitteesta loppui myös akku.

### **Lopputulokset:**

Tavoitteet 1 ja 2 saavutettiin erinomaisesti ja jopa ylitettiin. Tavoite 3, Sabertooth 2x32 toimivuuden testaus onnistui erinomaisesti. Moottorinohjaimet toimivat erittäin hyvin ja oli silmiin nähtävissä parantunut kiihdytys sekä ajo. Tavoite 4, jossa todettiin mikrofonin toimivuus, voidaan todeta onnistuneeksi. Mikrofonin toimii hyvin. Viive on sama kuin video kuvassakin tällä hetkellä, noin 1s. Mikrofonin pystyi sammuttamaan ja hiljentämään GUI:sta. Tavoite 5; onnistuttiin selvittää eliminoimalla eri ongelmat lähteet aina ongelman alku juurelle. Tavoite 6 GUI toimi yleisellä tasolla moitteettomasti. Karttanäkyvyys ongelmat, koordinaattien puute sekä nopeuden puute eivät johdu GUI:n toimimattomuudesta, vaan Skriptien asetusten virheellisyydestä. Tavoite 7 etukameran heijastus ja taitto väheni merkittävästi uuden suojuksen ansiosta. Verrokkina toimi takakamera, jossa kupua ei oltu vielä päivitetty, ja ero oli merkittävä. Takakamera pitänee päivittää vastaavanlaiseen tai parempaan suojukseen.

Summa summarum: Kaikki testille asetetut tavoitteet saavutettiin. Ennen kaikkea oli hienoa huomata kuinka hyvin Laykka toimi kokonaisuutena.

### **Jatko selvitystä ja kehitystä:**

- Ohjauksen tasausta ja kiihdyttimen säätöä. Luodaan tasainen kiihdytys kummallekin puolelle ja tasataan ohjaus eroja isoilla nopeuksilla, jotta robotti pysyy paremmin hallinnassa.
- Pienenetään kameran ja mikrofonin viivettä. Luodaan automaatti ohjelma, joka ohjaa kameran resoluutiota ja freimejä sekä bittejä yhteyden laadun mukaan
- Tilataan uusi ehjä moottori ja vaihdetaan se vanhan tilalle.
- Valmistetaan takakameralle uusi parempi kameransuojus
- Korjataan GUI:n puutteet. Lisätään datan keruun ja tallennus ominaisuus sensoreilta.
- Testataan Laykkan maastoliikkumiskyvyt maastoradalla moottorivaihdon jälkeen



Kuva 1. Laykka X.3 urheilukentällä testiajossa.