



Porin jääkäriprikaatin tykistö- patteriston järjestelmien luotettavuusanalyysi

Markku Uusi-Rasi

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2023

Teknologiaosaamisen johtaminen
Insinööri (Ylempi AMK)

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Teknologiaosaamisen johtaminen (Ylempi AMK)

UUSI-RASI, MARKKU

Porin jääkäriprikaatin tykistöpatteriston järjestelmien luotettavuusanalyysi

Opinnäytetyö 81 sivua, joista liitteitä 7 sivua
Huhtikuu 2023

Opinnäytetyön tarkoituksena on ollut tutkia, mitkä ovat Porin jääkäriprikaatin tykistöpatteriston ase- tai johtamisjärjestelmissä sellaisia laitteita tai laitekoko-
naisuuksia, joiden luotettavuuden puutteet voivat heikentää patteriston kykyä toimia osana prikaatin operaatioita. Tutkimustulosten avulla patteriston komen-
taja ja muu henkilöstö saavat tietoa esimerkiksi operaatiosuunnittelun tueksi. Tutkimuksessa tykistöpatteriston tärkeimmän kaluston, eli 155 K 98 kanuunoi-
den ja Pasi XA-202 komentopanssariajoneuvojen, vikaantumistietoja kerättiin eri tietojärjestelmistä, huoltokirjoista sekä kunnossapitotöiden raporteista.

Vikaantumisen vaikutusta tykistöpatteriston luotettavuuteen arvioidaan työssä hyödyntäen patteriston kaluston ajokilometrejä, käyttötunteja kuin myös lau-
kausmääriä, jotta saadaan selville käyttömääriin perustuvat keskimääräiset vi-
kaantumisvälit. Keskimääräisten vikaantumisvälien ja operaatiosuunnitelmien
tietojen perusteella laadittiin luotettavuusanalyysi, jonka perusteella voidaan
arvioida tykistöpatteriston toimintakykyä eri skenaarioissa. Tutkimuksen aineisto
ja tulokset ovat luottamuksellisia, jonka takia työn julkisessa versiossa eri suori-
tuskykytiedot ja analyysiesimerkit sisältävät viitteellisiä arvoja.

Operaatiosuunnitelmiin perustuva tykistöpatteriston luotettavuusanalyysi on
poistettu kokonaan työn julkisesta versiosta. Puolustusvoimille luovutettava ver-
sio opinnäytetyöstä sisältää todelliset suorituskyky- ja vikaantumistiedot sekä
niiden pohjalta laaditut luotettavuusanalyysit.

Tutkimuksen tulokset viittaavat siihen, että tykistöpatteriston luotettavuus ja ky-
ky suoriutua sille tarkoitetuista tehtävistä on kohtalaisen hyvä, kunhan kaluston
yleisimmät vikaantumismallit huomioidaan patteriston henkilöstön koulutukses-
sa ja varaosakokoonpanossa huomioidaan paremmin toiminnan kannalta kriitti-
simmät laitteet.

Asiasanat: toimintavarmuus, luotettavuusanalyysi, puolustusvoimat, kenttä-
tykistö

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Technology Management

UUSI-RASI, MARKKU

Reliability analysis of the systems of Pori jaegerbrigade's artillery battalion

Master's thesis 81 pages, appendices 7 pages

April 2023

The purpose of this thesis is to study the failures of the weapon and communication systems of the Pori jaegerbrigade's artillery battalion, and to determine which equipment are most likely to cause degradation in system reliability and in the operational capability of the artillery battalion. The findings of the study are meant to make the operational planning easier for the battalion commander and also for his or hers subordinates. The fault data of the 155 K 98 cannons and the Pasi XA-202 armoured command vehicles was collected from different databases, service manuals and maintenance reports.

The effects of faults are estimated using the total number of faults, equipment mileages, motor runtimes and the number of rounds fired, which all are used to determine the *MTBF*-values for different sub-systems. The *MTBF*-values and the data gathered from operational plans are used for the system reliability analysis. The analysis can be used to assess the capability of the artillery battalion in different scenarios. The data and the results of the study are confidential, so the values used in the public version of the study are imaginary examples. The full analysis of the system reliability is only available in the confidential version of this study, which is handed to the Finnish Defence Forces.

The results of this study indicate that the reliability and the operational capability of the artillery battalion is relatively good, as long as the most common fault types are considered in the training of the battalion's personnel and the most critical parts of the system are better included in the artillery battalion's spare parts.

Key words: reliability, reliability analysis, defence forces, field artillery

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
1.1	Tutkimuksen tavoite ja rajaukset	7
1.2	Tutkimuskysymykset	8
1.3	Tutkimusmenetelmä	8
1.4	Tutkimuksen aineisto	8
1.5	Porin jääkäriprikaatin tykistöpatteriston suorituskykyvaatimukset	9
1.6	Aikaisempi tutkimus	10
2	LUOTETTAVUUSANALYYSI	13
2.1	Luotettavuuskeskeinen kunnossapito	13
2.2	Vikaantuminen	14
2.3	Luotettavuus eksponentiaalisessa mallissa	15
2.4	MTBF	17
2.5	MTTR	18
2.6	MMBF ja MRBF	18
2.7	MTBEFF ja MTBOMF	19
2.8	Toimintatodennäköisyys	20
2.9	Normaalijakauma	21
2.10	Poisson-jakauma	23
2.11	Todennäköisyyksien ilmaiseminen sanallisesti	25
2.12	Vikaantuneiden yksilöiden määrä ja varaosatarve	25
2.13	Luotettava käyttöikä	27
2.14	Käyttöaste	28
3	PATTERISTON JÄRJESTELMIEN LUOTETTAVUUSANALYYSI	29
3.1	Vikatietojen keräys	29
3.1.1	155 K 98	30
3.1.2	Komentopanssariajoneuvo	31
3.2	155 K 98 vikaantuminen	33
3.2.1	Vikatyytit	33
3.2.2	Toiminnalliset viat ja kriittiset osajärjestelmät	35
3.2.3	MTBF ja käyttöaste	37
3.2.4	Apuvoimalaitteen MTBF	38
3.2.5	MRBF	40
3.2.6	MMBF	42
3.2.7	MTTR	43
3.2.8	MTBEFF	43
3.3	Komentopanssariajoneuvon vikaantuminen	44

3.3.1 Vikatyypit	45
3.3.2 Toiminnalliset viat ja kriittiset osajärjestelmät	48
3.3.3 MTBF ja käyttöaste	49
3.3.4 Sähkövoimakoneen ja voimapaketin MTBF	50
3.3.5 Johtamisjärjestelmän MTBF	52
3.3.6 MMBF	53
3.3.7 MTTR	54
3.3.8 MTBEFF	54
3.4 Vikaantumisen yhteenveto	55
4 SOTILAALLISEN TOIMINNAN ASETTAMAT VAATIMUKSET	56
4.1 Tykistöpariston käyttöhuolto ja kunnossapito	56
4.2 Tulen vaikutus ja pienin sallittu tulenantokyky	59
4.3 Toiminnallisen vikaantumisen perusteella laskettu toiminta-aika	62
4.4 Esimerkki pariston luotettavuusanalyysistä	63
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	68
6 POHDINTA	70
LÄHTEET	72
LIITTEET	75
Liite 1. Normaalijakaumataulukko	75
Liite 2. Laskuesimerkki normaalijakauman käytöstä	76
Liite 3. Tulen vaikutus ja pienimmän sallitun tulenantokyvyn laskeminen	77

ERITYISSANASTO

<i>F</i>	Epäluotettavuus, toimintavarmuuden puute
<i>f</i>	Vikatiheys
KOPA	Komentopanssari
KUPI	Kunnossapito
MEF	Mission Essential Function, tehtävälle olennainen toiminto
<i>MMBF</i>	Mean mileage between failures, keskimääräinen ajomatka vikojen välillä
<i>MR</i>	Mean radius, iskemien keskimääräinen etäisyys iskemäkeskeispisteestä mitattuna
<i>MRBF</i>	Mean rounds between failures, keskimääräinen laukausmäärä vikojen välillä
<i>MTBEFF</i>	Mean time between essential function failures, keskimääräinen aika tärkeiden toimintojen vikojen välillä
<i>MTBF</i>	Mean time between failures, keskimääräinen aika vikojen välillä
<i>MTBOMF</i>	Mean time between operational mission failures, keskimääräinen aika operatiivisten tehtävien epäonnistumisten välillä
<i>MTBSA</i>	Mean time between system abort, keskimääräinen aika systeemitointojen keskeytysten välillä
<i>MTTR</i>	Mean time to recovery, keskimääräinen palautumisaika
<i>R</i>	Luotettavuus, toimintavarmuus
RAM	Reliability, availability and maintainability, luotettavuus, käytettävyys ja huollettavuus
RCM	Reliability centered maintenance
SAP	System analysis program, toiminnanohjaukseen tarkoitettu ohjelmisto
SVK	Sähkövoimakone
<i>t</i>	Toiminta-aika
λ	Vikataajuus

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tavoite ja rajaukset

Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, mitkä ovat Porin jääkäriprikaatin tykistöpatteriston ase- tai johtamisjärjestelmissä sellaisia laitteita tai laitekokonaisuuksia, joiden luotettavuuden puutteet voivat heikentää patteriston kykyä toimia osana prikaatin operaatioita. Tutkimustulosten avulla vastaavalla kalustolla toimivien patteristojen komentajat ja muu henkilöstö saavat tietoa operaatio- suunnittelun sekä poikkeusolojen päätöksenteon tueksi.

Tutkimuksessa keskitytään tykistöpatteristoon kuuluvien 155 K 98 kenttäkanuunoiden ja Pasi XA-202 komentopaikkapanssariajoneuvojen luotettavuuden tutkimiseen, sillä ne muodostavat patteriston suorituskyvyn olennaisimmat toiminnot, eli tulenantokyvyn ja johtamiskyvyn. Tutkimuksesta rajataan pois muu aseistus ja ajoneuvokalusto, sillä kevyemmät aseet toimivat lähinnä patteriston omasuoja-aseina ja muu ajoneuvokalusto voi olla hyvinkin kirjavaa riippuen siitä, onko patteristolla käytössä Puolustusvoimien ajoneuvoja vai ottokalustoa. Myöskään tykeillä oleviin johtamisjärjestelmien osiin, kuten kenttäradioihin ja eri päätelaitteisiin, ei tässä tutkimuksessa syvennytä.

Luotettavuusanalyysissä vikoja käsitellään suurempina kokonaisuuksina, eikä syvennytä yksittäisten laitteiden osakomponenttien vikoihin. Muuten työn laajuus kasvaisi kohtuuttoman suureksi.

Tutkimukselle on myönnetty tutkimuslupa Maavoimien esikunnan Suunnitteluosaston asiakirjalla MS2449 / 23.2.2022 (Puolustusvoimat 2022a).

Työn julkisessa versiossa järjestelmien suorituskykyarvoja ja operaatioturvallisuuteen liittyviä asioita sekä muuta turvaluokiteltua materiaalia on muutettu viitteellisiksi arvoiksi tai poistettu kokonaan näkyvistä.

1.2 Tutkimuskysymykset

Tutkimuksen tutkimuskysymyksiä ovat:

1. Mitkä ovat kriittisiä laitekokonaisuuksia?
 - Minkälaista vikaantumisen on?
 - Miten vikaantuminen vaikuttaa patteriston toimintakykyyn?
 - Onko patteristolla kykyä korjata kriittisten laitteiden vikoja?
2. Miten voidaan kehittää varustelukokoonpanoon kuuluvien laitteiden tai laitekokonaisuuksien käyttötapaa, kokoonpanoa tai kunnossapitoa luotettavuuden parantamiseksi?
 - Tulisiko joitain laitteita tai laitekokonaisuuksia kahdentaa?
 - Tulisiko varaosakokoonpanoa kehittää?

1.3 Tutkimusmenetelmä

Tutkimus suoritetaan kvantitatiivisena tutkimuksena, jossa hyödynnetään tilastollista analyysiä tykistö-patteriston tehtävien täyttämisen kannalta kriittisten laitteiden vikahistoriaa. Vikahistoria selvitetään laitteiden SAP-toiminnanohjausjärjestelmään kirjatusta vikailmoituksista, kantakirjoista ja katsastusraporteista. Kirjallisuuskatsauksessa selvitetään, onko muista tykistöjärjestelmistä saatavilla luotettavuusteknistä tietoa, johon tutkimuksen tuloksia voitaisiin verrata.

1.4 Tutkimuksen aineisto

Tutkimuksen pääaineisto on kerätty SAP-toiminnanohjausjärjestelmästä, johon tutkittavien laitteiden kunnossapitotietoa on tallennettu vuodesta 2010 alkaen. Aineiston keruun viimeisenä päivänä oli 31.12.2022, jolloin vikahistorian tarkastelujakson pituus on tutkittavien laitteiden ensimmäisistä kunnossapitomerkinnoistä riippuen 10 – 12 vuotta. Muuta aineistoa on kerätty tykkien kantakirjoista sekä panssariajoneuvojen määräaikaishuolto- ja katsastusraporteista.

1.5 Porin jääkäriprikaatin tykistöpatteriston suorituskykyvaatimukset

Jotta voidaan arvioida jonkin järjestelmän luotettavuutta, pitää olla tiedossa, mikä on sille toteutettavaksi määritetty tehtävä tai haluttu suorituskyvyn taso.

Porin jääkäriprikaatiin kuuluvalla tykistöpatteristolle annetut vaatimukset selviävät Kenttätykistön käsikirjasta ja Kenttäohjesäännöistä.

Porin jääkäriprikaati on yhtymä, jolla on kyky ottaa johtoonsa muita joukkoja. Sen iskukyky muodostuu panssaroiduilla pyöräajoneuvoilla varustetuista lähi-taistelukykyisistä jääkäripataljoonista, joita tuetaan muilla aselajeilla. Prikaatia käytetään ratkaisutaisteluissa koko valtakunnan alueella ensisijaisesti ylemmän johtoportaan sotatoimen osana. Se kykenee toimimaan myös itsenäisesti joko kootusti tai hajautetusti, ja se kykenee yhteistoimintaan helikopteri- ja tiedustelulennoikkyyksiköiden kanssa. (Puolustusvoimat 2016, 22.)

Kenttätykistön käsikirjan mukaan tykistöpatteriston tehtävänä on operatiivinen tulenkäyttö ja jääkäriprikaatin tai yhtymän pataljoonien ja yksiköiden taistelun tukeminen (Puolustusvoimat 2019, 50).

Tärkeimmäksi tehtäväksi on nostettu operatiivinen tulenkäyttö vastustajan kriittisiä maaleja vastaan. Operatiivisen tulenkäytön lisäksi patteristo tukee myös taktisella tulenkäytöllä prikaatin taistelua. (Puolustusvoimat 2019, 53.)

Operatiivisen tulenkäytön määritelmä on, että se on operaation ja joukkojen välillistä tukemista vaikuttamalla niihin vihollisen maaleihin, jotka eivät ole välittömässä taistelukosketuksessa. Operatiivinen tulenkäyttö voi sisältää vastavalmisteluja sekä maahanlaskujen ja merikoukkausten torjunnan tukemista.

Taktinen tulenkäyttö puolestaan on joukkojen välitöntä tukemista. Se toteutetaan taistelukosketuksessa olevia vihollisen joukkoja ja järjestelmiä vastaan, ja sillä mahdollistetaan tuettavan joukon tehtävän täyttäminen. (Puolustusvoimat 2014b, 16.)

Kriittiset maalit, joihin operatiivisessa tulenkäytössä vaikutetaan, ovat kohteita, joiden lamauttaminen tai tuhoaminen vaikuttaa nopeasti vihollisen toimintakykyyn (Puolustusvoimat 2019, 103).

Kriittisiä maaleja ovat esimerkiksi:

- Panssarihaupitsi – ja raketinheitinpatteristot
- Johtamispaikat ja esikunnat
- Viesti- ja elektronisen sodankäynnin asemat
- Vastatykistö- ja ilmavalvontatutkat
- Huoltokeskukset- ja kuljetukset
- Raivaus – ja ylimenokalusto sekä ylimenopaikat
- Taistelusta irti olevat joukot

(Puolustusvoimat 2014b, 17)

Tiivistetysti eri oppaiden tiedot asettavat patteriston suorituskyvyille seuraavia vaatimuksia:

- Kyettävä operatiiviseen tulenkäyttöön, eli ampumaan tarkasti kaukana olevia vihollisen tärkeitä kohteita, jotka ovat kooltaan kohtalaisen pieniä maaleja.
- Kyettävä taktiseen tulenkäyttöön, eli tukemaan epäsuoralla tulella lyhyellä vasteajalla taistelukosketuksessa olevia joukkoja.
- Kyettävä liikkumaan pitkiäkin matkoja tuettavan joukon mukana ja toimimaan laajalla alueella.

Luotettavuuden tutkimisen näkökulmasta tärkeimmiksi toiminnoiksi nousevat tykin ampumatoiminta, KOPA-ajoneuvojen johtamisjärjestelmien toimivuus ja kummankin laitteen liikkumiskyky.

1.6 Aikaisempi tutkimus

Suomalaisen sotilasilmailun parissa on eri järjestelmien luotettavuutta tutkittu paljon, esimerkiksi Atte Sievälän (2020) Valvontalentokoneen elinjaksonhallinta Pro gradu – tutkielmassa selvitettiin Dornier 228 lentokoneen vikaantuvuuden ja korjattavuuden vaikutusta sen elinjaksokustannuksiin. Maavoimien osalta tutkimusta eri järjestelmien luotettavuudesta on tehty vähemmän. Tykistöaselajin sisältä esimerkkinä luotettavuustutkimuksesta on Kari Takalan (2022) YAMK-opinnäytetyö raskaan raketinheittimen varaosakomponenttien logistiikasta, jossa tutkittiin heittimen kriittisten osien vikaantumista.

Yhdysvalloissa RAM-analyysiä, eli luotettavuusanalyysiä, on julkisten lähteiden mukaan tehty eri tykistöasejärjestelmille jo monta vuosikymmentä. Se on sinänsä luonnollista, sillä ensimmäinen luotettavuuskeskeiseen kunnossapitoon keskittyvä kirja julkaistiin vuonna 1978 United Airlines lentoyhtiön ja Yhdysvaltain puolustusministeriön yhteistyön tuloksena. Kirjan eräänä tavoitteena oli soveltaa siviili-ilmailusta opittuja hyviä kunnossapitokäytänteitä myös erilaisiin sotilaskäytössä oleviin laitteisiin (Heap & Nowlan 1978, 4).

Lähivuosilta eräs esimerkki on M109-panssarihaupitsin A7-mallin operatiivisen suorituskyvyn arviointi vuodelta 2017. Arviointiin liittyvässä tutkimuksessa, jota johti Yhdysvaltain puolustusministeriön testauspäällikkö Michael Gilmore (2017, 13), havaittiin että M109A7 ei kyennyt täyttämään sille asetettuja luotettavuusvaatimuksia arvioitaessa *MTBSA*-suuretta (Mean time between system abort). Asetetut vaatimukset ja tutkimuksen tulokset M109A7-panssarihaupitsin osalta ovat nähtävissä taulukon 1 ylemmässä SPH-sarakkeessa.

TAULUKKO 1. M109A7:n luotettavuusanalyysin tulokset (Gilmore 2017, 15)

Measure/System	MTBSA Requirement	Demonstrated MTBSA (80% Confidence)	Mission Reliability Requirement	Demonstrated Mission Reliability (80% Confidence)
SPH	62	45.4 (32.3 – 65.2)	0.75	0.67 (0.57 – 0.76)
CAT	103	248 (112 – 676)	0.84	0.93 (0.85 – 0.97)
Reliability Results Without Legacy Breach Failures for the M109A7 SPH				
SPH	62	145.2 (78.3 – 298.5)	0.75	0.88 (0.79 – 0.94)

M109-panssarihaupitsin aiemman A6-mallin, joka oli prototyypivaiheessa 80- ja 90 lukujen taitteessa, *MTBSA*-vaatimus oli myös 62 tuntia. Kenttäkokeiden jälkeisessä luotettavuusanalyysissä havaittiin, että todellinen *MTBSA* oli 26,6 tuntia. (Davis 1992, 16.)

Luotettavuus parani siis lähes kaksinkertaiseksi, kun A6-malli päivitettiin A7-konfiguraatioon, mutta luotettavuus jäi silti selkeästi vajaaksi asetetusta vaatimuksesta.

Yhdysvaltalaisessa kirjallisuudessa tykistöaseiden luotettavuuden parametreinä käytetään *MTBSA*:n lisäksi myös keskimääräistä laukausten määrää vikojen välillä (Mean rounds between failures, *MRBF*) ja keskimääräistä ajomatkaa vikojen välillä (Mean mileage between failures, *MMBF*). Esimerkiksi telahaupitsimallille M109A1, joka on kaliiperiltaan 155 mm, *MRBF* on ilmoitettu olevan 775 laukausta ja *MMBF* on 245 mailia (394,3 km) (DARCOM 1979, 43-6).

Vaikka monissa lähteissä käytetään samaa suuretta luotettavuuden mittaamisessa, haasteeksi tiedon laatua arvioitaessa muodostuu se, että samalle tykille voi olla ilmoitettu hyvinkin vaihtelevia luotettavuustietoja eri lähteissä.

Esimerkiksi Robert F. Chandlerin (1976, 13) mukaan M110A1-telahaupitsin *MRBF* on 400 laukausta ja *MMBF* on 155 mailia (249,4 km).

Kun taas Yhdysvaltain armeijan materiaalilaitoksen vuonna 1979 julkaiseman teknisen suunnittelun käsikirjan mukaan M110-telahaupitsin *MRBF* on 100 laukausta ja *MMBF* on 580 mailia (933,4 km) (DARCOM 1979, 43-6).

M110A1 on modernisoitu malli M110 telahaupitsista, jolloin on uskottavaa, että parannusten jälkeen *MRBF* kasvaa. Mutta se, että *MMBF* vanhalla M110-mallilla olisi 425 mailia pidempi kuin uudemman M110A1-mallin *MMBF*, aiheuttaa selkeän ristiriidan tiedoissa. Tietämättä mitä modernisoinnissa on tavoiteltu, mitä muutoksia on tarkalleen tehty ja mitkä ovat olleet muutosten vaikutukset, on hankala arvioida miksi *MMBF* on laskenut.

Luotettavuuden tutkimisessa yleinen ongelma näyttää olevan lähes joka tasolla riittävän laadukkaan kunnossapitotiedon kerääminen.

Esimerkiksi vuonna 2002 Marvin Norcross tutki Pro gradu – työssään Yhdysvaltain merijalkaväen käyttövarmuuden hallintaa, jossa hän havaitsi, että kunnossapitotietojen puuttuminen ja heikkoudet käytännössä monesti estivät keskimääräisten vikaantumisaikojen laskennan. Erityisenä puutteena oli operatiivisen käytön aikainen vikaantumistieto, jonka avulla pystyttäisiin selvittämään vikataajuuksia. Johtuen vikatietojen puutteellisuudesta, kunnossapidon laatumittarina käytettiin yleensä keskimääräistä huoltoväliä, joka ei itsessään tee eroa ennakoivan ja korjaavan huollon välillä. Huoltotietoihinkaan ei voinut täysin luottaa, sillä niidenkin laatu oli pääosin heikko. (Norcross 2002, 86.)

2 LUOTETTAVUUSANALYYSI

2.1 Luotettavuuskeskeinen kunnossapito

Luotettavuuskeskeinen kunnossapito on laajasti ilmailussa ja muilla laitteiden korkeaa toimintavarmuutta edellyttävillä aloilla käytetty kunnossapitotoimien kohdentamistapa. Yleisesti käytetty lyhenne luotettavuuskeskeisestä kunnossapidosta on RCM (Reliability centered maintenance).

Tässä tutkimuksessa ei ole tarkoitus laatia kokonaisvaltaista RCM-pohjaista kunnossapito-ohjelmaa tykistö patteriston kalustolle, vaan tutkimuksessa hyödynnetään RCM-menetelmän oppeja kriittisten laitekokonaisuuksien tunnistamisessa ja niiden luotettavuuden analysoinnissa.

Käyttäen järjestelmän eri osista kerättyjä turvallisuus- ja vikatietoja, RCM-menetelmässä pyritään tunnistamaan ne osat, jotka ovat kriittisiä järjestelmälle määritetyn tehtävän suorittamisen ja turvallisen käytön kannalta. Kun järjestelmästä on tunnistettu kriittiset komponentit ja asetettu ne prioriteettijärjestykseen, voidaan laatia aiempaa tehokkaammat suunnitelmat kunnossapitotöiden kohdentamiseksi, jolloin voidaan minimoida suunnittelemattomat toiminnan keskeytykset sekä turhien huoltojen määrä.

Kunnossapitotöitä tulisi tehdä kriittisille osille vain silloin, kun niillä voidaan estää luotettavuuden tai turvallisuuden heikkeneminen ei-hyväksyttävälle tasolle tai niillä saadaan alennettua elinikäkustannuksia. Ei-kriittisille osille kunnossapitotöitä tehdään vain, jos niillä saadaan laskettua elinikäkustannuksia.

(Anderson & Neri 1990, 13 – 14.)

Ylimääräinen huoltaminen kuluttaa resursseja sekä voi pahimmillaan heikentää järjestelmän luotettavuutta. Huoltojen yhteydessä laitteistojen sisään voi päätyä vierasesineitä ja likaa, pultit voidaan kiristää väärin tiukkuuksiin, osien kokoaminen tehdään väärin tai käytetään vääränlaisia voiteluaineita

(Anderson & Neri 1990, 2).

RCM-kunnossapitomenetelmää käyttöönotettaessa pääsee alkuun seitsemän peruskysymyksen avulla:

- Mitkä ovat laitteen toiminnot ja tehokkuusvaatimukset sen nykyisessä toimintaympäristössä?
- Millä tavalla laite voi olla täyttämättä siltä vaadittuja toimintoja?
- Mistä toiminnalliset vikaantumiset johtuvat?
- Mitä tapahtuu vikaantumisen ilmetessä?
- Mihin asioihin vikaantumisella on vaikutusta?
- Mitä voidaan tehdä vikaantumisen ennustamiseksi tai ehkäisemiseksi?
- Mitä pitäisi tehdä, jos sopivaa ennaltaehkäisevää toimenpidettä ei löydy?

(Moubray 1997, 7)

2.2 Vikaantuminen

IEC 60050-192-standardi (2015) antaa vian määritelmäksi laitteen kyvyttömyyden vaadittuun toimintaan sen sisäisen tilan takia. Vikaantumistilanne on melko harvoin kuitenkin näin yksiselitteinen, jolloin luotettavuusanalyysissä on järkevämpää keskittyä ns. toiminnallisiin vikoihin.

Toiminnallisen vian määritelmänä on:

- Laitteen kykenemättömyys toteuttaa käyttäjän edellyttämä toiminto käyttäjän hyväksymällä suorituskyvyllä (Laitinen 2020, 18).

Esimerkkinä tykin toiminnallinen vika voi olla se, että sen painontasaimissa ei pysy kunnolla typpipaine sisällä, joka vaikeuttaa ja hidastaa merkittävästi tykin tuliputken suuntaamista oikealle korotukselle. Tykki kykenee edelleen toteuttamaan tulitehtävän, mutta ei riittävän nopeasti vastataksaan käyttäjän asettamiin tulenantokykyvaatimuksiin. Komentopanssariajoneuvon toiminnallinen vika taas voi olla esimerkiksi sähkövoimakoneen ylikuumentuminen käytössä, jolloin joudutaan käyttämään suunniteltua enemmän varavirtalähteeksi tarkoitettua akustoa johtamisjärjestelmän sähköistämiseksi.

2.3 Luotettavuus eksponentiaalisessa mallissa

Luotettavuudella tarkoitetaan sitä ehdollista todennäköisyyttä, jolla tietyllä luotamusvälillä laitteisto suorittaa sille tarkoitetun toiminnon tyydyttävästi tai ilman häiriöitä. Toisin sanoen se toimii sille määriteltyjen suorituskykyrajojen sisällä, ottaen huomioon laitteiston iän, määritetyn toiminta-ajan, toimintajakson tai tehtävän keston ja kun sitä käytetään sellaisella tavalla ja tarkoituksessa, jotka vastaavat laitteistolle määritettyjä sovelluksia ja toimintaympäristöjä niihin liittyvillä rasitustasoilla. (Kececioglu 2002a, 61 – 62.)

Toimintavarmuus tai luotettavuus R eksponentiaalisessa mallissa on

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t}, \quad (1)$$

jossa λ on vikataajuus ja t on toiminta-aika. Toiminta-ajan tilalla voidaan käyttää myös esimerkiksi ajokilometrejä, käynnistyskertoja, ammuttuja laukauksia yms.

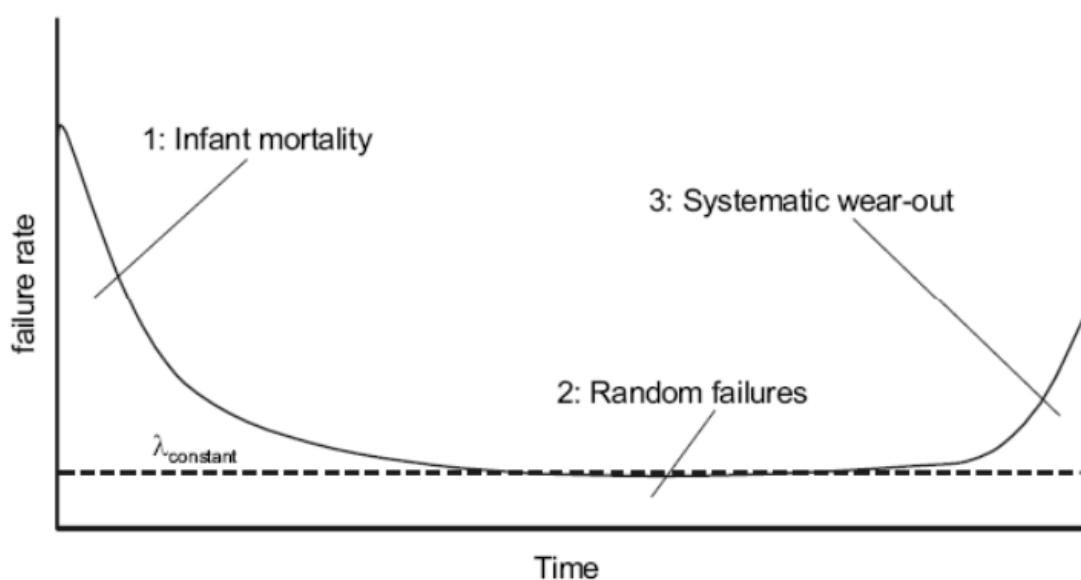
Eksponentiaalisessa mallissa vikataajuus λ on vakio. Eksponenttimalli on hyvin suosittu sen yksinkertaisuuden vuoksi. Lisäksi myös siksi, että se soveltuu hyvin monimutkaisten systeemien luotettavuuden kuvaukseen, erityisesti niiden käyttövaiheen aikana. (Teeriaho 2015, 44.)

Kececioglun (2002b, 341) mukaan systeemissä, jossa on n -lukumäärä itsenäisiä laitteita, jotka luotettavuusteknisesti ajatellen ovat sarjaan kytkettyjä, joilla on omat vikaantumismallinsa ja korvausosansa, joista jokaisen vikaantuminen aiheuttaa systeemin pysähdyksen ja jotka rikkoutuessaan korvataan uudella osalla, voidaan systeemin vikaantumisen olettaa noudattavan eksponenttimallia, kun toiminnan monimutkaisuus ja käyttöaika kasvaa.

Edellä esitettyä ns. Drenickin teoreemaa hyödynnetään tykistöpatteriston luotettavuuden analysoinnissa siten, että työssä eri toiminnoille määritetään vain yksi vikataajuus laskentaa varten ja vikojen jakaantumisen mallintamisessa hyödynnetään eksponenttimallia. 155 K 98 kenttätykki ja KOPA-ajoneuvo ovat niin monimutkaisia järjestelmiä, että niiden vikaantumista on hankala mallintaa niiden kaikkien komponenttien yksilöllisten vikaantumistaajuuksien avulla ilman että tutkimuksen laajuus kasvaisi liiaksi.

Kuviossa 1 on esitetty vikataajuuden tyypillinen käyttäytyminen laitteen käyttöajan aikana. Vikataajuus muodostaa ns. kylpyammemallin, jossa alun lastentautien ja loppuvaiheen loppuun kulumisen aiheuttamien vikapiikkien välissä on käyttöajan keskivaiheen tasaisen satunnaisen vikataajuuden jakso.

Lapin ammattikorkeakoulun vanhemman lehtorin Jouko Teeriahon (2015, 44) mukaan vanhoissa monimutkaisissa systeemeissä, joissa on sekaisin alkupe- räisiä osia ja varaosia, rikkoutumistodennäköisyys asettuu dynaamiseen tasa- painotilaan, jossa vikataajuus säilyy suurin piirtein vakiona. Tässä tutkimukses- sa luotettavuusanalyysin oletuksena on, että jo useita vuosia käytössä olleet 155 K 98 tykit ja KOPA-ajoneuvot ovat saavuttaneet kyseisen tasapainotilan.



KUVIO 1. Vikataajuuden kylpyammekäyrä (Korhonen 2011, 18)

Epäluotettavuus tai toimintavarmuuden puute F lasketaan kaavalla

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t}, \quad (2)$$

jossa R on luotettavuus, λ on vikataajuus ja t on toiminta-aika.

Vikatiheys f ajan funktiona t saadaan selville kaavalla

$$f(t) = \frac{\Delta F}{\Delta t} = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t}, \quad (3)$$

jossa F on toimintavarmuuden puute, t on toiminta-aika ja λ on vikataajuus.

Vikataajuus λ saadaan selville vikatiheyden ja luotettavuuden suhteen kaavalla

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}, \quad (4)$$

jossa f on vikatiheys ja R on luotettavuus.

Vikataajuus λ voidaan määrittellä myös keskimääräisen vikaantumisvälin *MTBF* (Mean time between failures) käänteislukuna.

2.4 MTBF

MTBF (Mean time between failures) tarkoittaa keskimääräistä vikaantumisaikaa järjestelmissä, jotka ovat vikaantumisen jälkeen vielä korjattavissa. Jos järjestelmä tai laite ei ole korjattavissa rikkoutumisen jälkeen, kuten hehkulamppu, puhutaan *MTTF*:stä (Mean time to failure).

MTBF lasketaan käyttöajan ja vikojen kokonaismäärän avulla kaavalla

$$MTBF = \frac{t}{F}, \quad (5)$$

jossa t on käyttöaika ja F vikojen kokonaismäärä.

Vaihtoehtoisesti *MTBF* saadaan selville vikataajuuden λ avulla kaavalla

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (6)$$

MTBF:n yksikkönä käytetään tavallisesti tunteja tai muuta ajan yksikköä, mutta vikaantumisväliä voidaan ilmaista myös esimerkiksi ajokilometrien tai ammuttujen laukausten avulla. Tällöin myös suureen nimi vaihtuu kuvaamaan käytettyä yksikköä, esimerkiksi laukausten kohdalla *MTBF* vaihtuu muotoon *MRBF* (Mean rounds between failures).

2.5 MTTR

MTTR (Mean time to recovery) on suure, jolla mitataan keskimääräistä aikaa vikaantumisesta siihen, että laite tai järjestelmä on takaisin käytössä. Siinä otetaan huomioon varsinaisen korjaamistyöhön kuluvan ajan lisäksi myös vianselvittelyyn kuluva aika sekä myös varaosien hankkimiseen kuluva aika. Esimerkiksi jos tarkastelujakson aikana laitteeseen tulee 4 vikaa, joita korjataan yhteensä 10 tuntia, *MTTR* on tarkastelujaksolla:

$$MTTR = \frac{10 \text{ h}}{4} = 2,5 \text{ h}$$

Samaa lyhennettä käytetään myös pelkkään korjaamistyöhön kuluva keskimääräisestä ajasta (Mean time to repair), josta voi aiheutua sekaannusta.

2.6 MMBF ja MRBF

MTBF on perinteisesti laskettu vikaantumisten välisestä ajasta, mutta muut yksiköt kuten ajokilometrit vikaantumisten välillä, keskimääräiset käyttöjaksot tai käynnistykset vikaantumisten välillä tai keskimääräiset ammutut laukaukset vikaantumisten välillä, voivat olla parempia ilmaisemaan vikaantumisvälejä (Norcross 2002, 103).

Jos yksikkönä käytetään ajokilometrejä, kyseessä on *MMBF* (Mean mileage between failures). Jos taas tarkastelussa on tykillä tai muulla aseella ammutut laukaukset, kyseessä on *MRBF* (Mean rounds between failures).

Suomalaisessa järjestelmässä ammuskulutusta seurataan yleisesti ns. tuliannoksina, joka vastaa epäsuorantulen joukon pääaseistuksen keskimääräistä ammuskulutusta vuorokaudessa (Puolustusvoimat 2014b, 89).

Esimerkiksi jos yhden aseenn tuliannokseksi on määritelty 50 laukausta päivässä, ja se vikaantuu keskimäärin 200 laukauksen välein, sen *MRBF* tuliannoksina määritettynä on:

$$MRBF_{t,ann} = \frac{MRBF (ls)}{Tuliannos (ls)} = \frac{200 ls}{50 ls} = 4,0 t. ann$$

2.7 MTBEFF ja MTBOMF

Bellin ja Beardenin (2013, 1) mukaan monet Yhdysvaltain puolustusministeriön ohjelmat perustavat niiden luotettavuuden kehittämismallinsa tehtäväkohtaisiin luotettavuusvaatimuksiin. Niissä otetaan huomioon vain sellaiset tehtävän suorittamisen aikaiset viat, joista aiheutuu tehtävän keskeytys tai lopetus.

Suureita, jotka ottavat huomioon tehtävän suorittamisen estävät kriittiset viat, ovat esimerkiksi *MTBEFF* (Mean time between essential function failures) ja *MTBOMF* (Mean time between operational mission failures).

MTBEFF:ään laskettavaksi viaksi kuuluu esimerkiksi tykin jarrujen hajoaminen, jolloin sitä ei voi enää turvallisesti kuljettaa kuorma-auton perässä moottorimarssilla. Tällöin tykin todetaan olevan ei-operatiivisessa kunnossa, vaikka vika ei sinänsä estä tykillä ampumista.

MTBOMF:ään laskettava vika taas suoraan lopettaa tykin tärkeimmät toiminnot. Tällainen vika voisi olla esimerkiksi tykin sulkukappaleen hajoaminen, jolloin tulitoiminnan jatkaminen ei ole enää mahdollista.

2.8 Toimintatodennäköisyys

Kun tiedetään laitteen *MTBF*, saadaan kaavan 7 avulla laskettua laitteen luotettavuus R ajanhetkellä t , eli kuinka todennäköisesti laite on vielä toimintakykyinen kyseisenä hetkenä.

$$R(t) = e^{\frac{-t}{MTBF}}, \quad (7)$$

Esimerkiksi jos laitteen keskimääräinen vikaantumisaika on 52,3 h, todennäköisyys sille, että se on toimintakykyinen ajanhetkellä 22 h on:

$$R(22 \text{ h}) = e^{\frac{-22 \text{ h}}{52,3 \text{ h}}} = 0,6566 \dots \approx 65,7 \%$$

Järjestelmissä on usein monia alajärjestelmiä, jotka osaltaan vaikuttavat koko järjestelmän luotettavuuteen. Riippuen järjestelmän kokoonpanosta, alajärjestelmät ovat joko sarjaan- tai rinnankytkettyjä toisiinsa nähden.

Esimerkiksi 155 K 98 tykin laukaisumekanismissa laukaisuvipu, laukaisulaite, niiden väliset virepinnat, laukaisulaitteen sisäiset iskujousi ja iskuri sekä sulkukappaleessa oleva nallilukko muodostavat sarjaan kytketyn kokonaisuuden. Jos yksikin niistä vioittuu kriittisesti, laukaisutapahtuma ei onnistu.

Sarjakytketyn järjestelmän luotettavuus lasketaan kaavalla 8:

$$R = R_1 \cdot R_2 \dots \cdot R_n, \quad (8)$$

jossa R on järjestelmän kokonaisluotettavuus ja $R_1 - R_n$ ovat osajärjestelmien luotettavuuksia.

Jos taas järjestelmän osat ovat rinnankytkettyjä, kuten johtamisjärjestelmäkon- tin kahdennettu sähkönsyöttö, niin pääasiallisen sähkönsyötön vikaantuessa järjestelmä pysyy edelleen toimintakykyisenä, jos varalla oleva sähkönsyöttöyh- teys on toimiva.

Rinnankytketyn järjestelmän luotettavuus lasketaan kaavalla 9:

$$R = 1 - (1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \dots \cdot (1 - R_n), \quad (9)$$

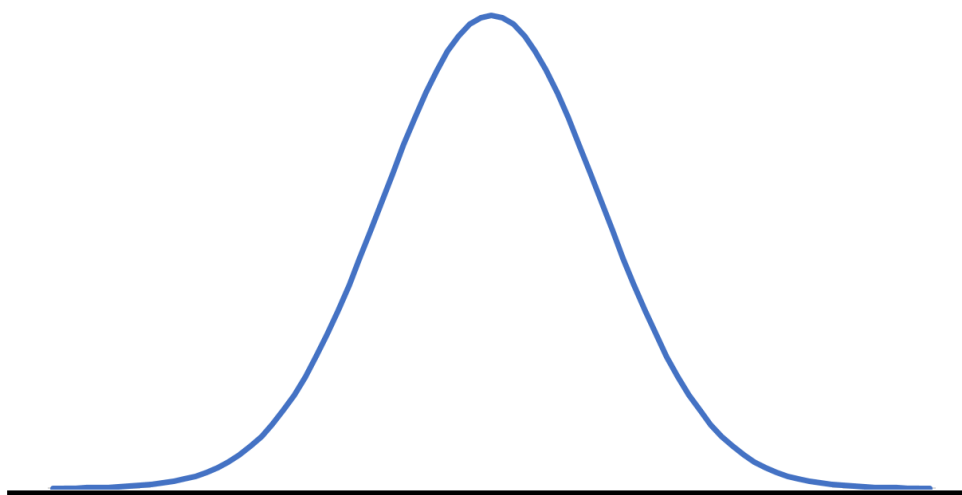
jossa R on järjestelmän kokonaisluotettavuus ja $R_1 - R_n$ ovat osajärjestelmien luotettavuuksia.

2.9 Normaalijakauma

Arvioitaessa tykistöjärjestelmän luotettavuutta, yhtenä kriteerinä voidaan pitää sen kykyä suoriutua sille käsketyistä tulitehtävistä. Kun lasketaan tarvittavien laukausten määrää maalin tuhoamiseksi, iskemähajonnan vaikutusta osuamprosenttiin kuvaa parhaiten normaalijakauma (Puolustusvoimat 2014c, 23).

Saksalainen fyysikko ja matemaatikko Carl Friedrich Gauss (1777 – 1855) havaitsi, että monessa satunnaisessa ilmiössä on kuitenkin havaittavissa säännönmukaisuutta ja havaintojensa perusteella kehitti normaalijakauman, jota myös Gaussin jakaumaksi kutsutaan (Salomäki 2003, 184 – 185).

Kuviossa 2 on esitetty ideaalisen Gaussin jakauman muodostama kuvio.



KUVIO 2. Gaussin jakauma

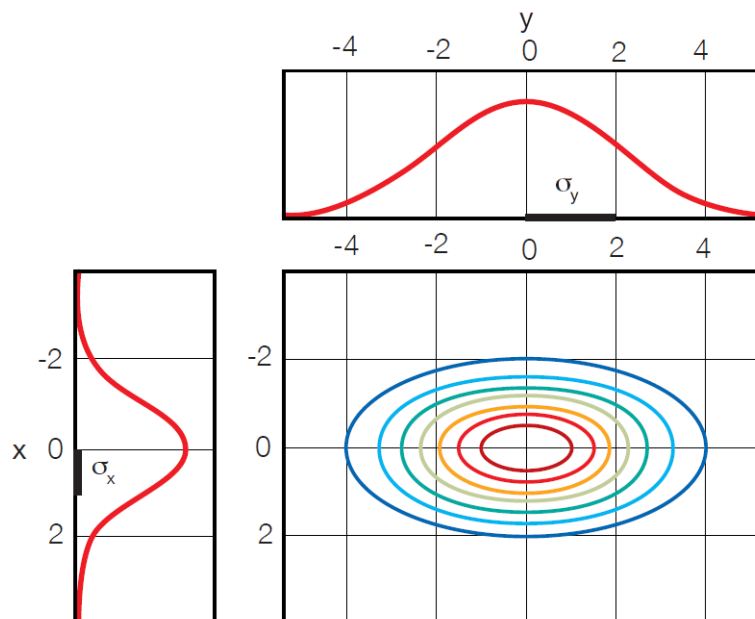
Kuvassa 1 on lämpökameralla varustetun lennokin kuvaama 2 – 3 raketinheittimen ampumien rakettien iskemähajontakuvio maalialueella.

Kuvassa kirkkaan valkoiset kohteet ovat raketin räjähdyspisteitä, joiden tiheys maalialueella muodostaa melko hyvin normaalijakautuneen kuvion niin pituus- kuin leveys suunnassa ampumasuuntaan nähden.



KUVA 1. Lämpökameralla kuvattu raketinheitinjaksojen hajontakuvio (Defense Update 2016, muokattu)

Kun vertaa kuvassa 1 näkyvien iskemähajontakuvioita kaksiuotteisen normaalijakauman tiheysfunktion kuvaajaan, joka on esitetty kuviossa 3, nähdään että ne vastaavat melko hyvin toisiaan.



KUVIO 3. Kaksiuotteisen normaalijakauman tiheysfunktion kuvaaja (Puolustusvoimat 2014c, 27 muokattu).

Jos satunnaismuuttuja-arvot ovat normaalijakautuneita, minkä tahansa satunnaisarvon voi normittaa, kun tiedetään odotusarvo μ ja keskihajonta σ .

Normitettu arvo z lasketaan kaavan 10 avulla seuraavasti:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}, \quad (10)$$

jossa x on normitettavan muuttujan arvo, μ on odotusarvo ja σ on keskihajonta.

Normitetusta arvosta nähdään, kuinka suuresti se poikkeaa keskiarvosta suhteutettuna keskihajontaan. Esimerkiksi jos normitettu arvo on -2, se on kahden keskihajonnan verran keskiarvoa pienempi.

Normitetun normaalijakauman kertymäfunktion avulla voidaan laskea todennäköisyyksiä. Todennäköisyyslaskennassa voidaan käyttää laskentaohjelmistoja tai valmiiksi laskettua normaalijakaumataulukkoa, kuten liitteessä 1, jossa on normitettuja arvoja vastaavia todennäköisyyksiä.

Laskuesimerkkejä normaalijakauman käytöstä osumatodennäköisyyden laskennassa eri tilanteissa on liitteissä 2 ja 3.

2.10 Poisson-jakauma

Jos jonkin tapahtuman todennäköisyys jollain aikavälillä on vakio ja tapahtumien ajankohdat eivät riipu toisistaan, voidaan tällöin tapahtumien määrää halulla aikavälillä mallintaa Poisson-jakauman avulla. Esimerkiksi jos tarkastellaan vikaantumista satunnaisilmiönä ja tunnetaan jonkin laitteen keskimääräinen vikaantumisväli *MTBF*, voidaan Poisson-jakauman avulla arvioida varaosien määrän tarvetta tietyn aikavälin sisällä.

Vikaantumisten lukumäärän todennäköisyyden kertymäfunktio $P(x)$ saadaan laskettua kaavan 11 avulla:

$$P(x \leq k) = \sum_{i=0}^k e^{-\lambda} \cdot \frac{\lambda^i}{i!} = \sum_{i=0}^k e^{-\frac{d}{MTBF}} \cdot \frac{\left(\frac{d}{MTBF}\right)^i}{i!}, \quad (11)$$

jossa k on vikaantumisten lukumäärä tarkastelujakson aikana, λ on keskimääräinen vikaantumisten määrä tarkastelujaksolla. Tässä tapauksessa λ on tarkastelujakson pituus d jaettuna keskimääräisellä vikaantumisvälillä $MTBF$.

Esimerkiksi jos laitteen $MTBF$ on 400 h, mikä on todennäköisyys sille, että 14 päivän, eli 336 tunnin, aikana laitevikoja on enintään 2 kappaletta?

$$P(x \leq 2) = e^{-\frac{14 \cdot 24 \text{ h}}{400 \text{ h}}} \cdot \left(\frac{\left(\frac{14 \cdot 24 \text{ h}}{400 \text{ h}}\right)^0}{0!} + \frac{\left(\frac{14 \cdot 24 \text{ h}}{400 \text{ h}}\right)^1}{1!} + \frac{\left(\frac{14 \cdot 24 \text{ h}}{400 \text{ h}}\right)^2}{2!} \right)$$

$$P(x \leq 2) = 0,9466 \dots \approx 0,95$$

Jos halutaan tietää, montako varaosaa laitteelle on varattava 14 päivän ajalle toiminnan varmentamiseksi, pitää ensin määrittää haluttu toiminnan varmuustaso. Olkoon esimerkissä haluttu varmuus 75 %. Edellä esitetty laskenta voidaan suorittaa Excel-taulukointiohjelmassa, jossa laskentaa voidaan toistaa ja laajentaa nopeasti. Taulukossa 2 on esitetty todennäköisyyslaskennan tulokset määrittäessä varaosien määrän tarvetta. Haluttu 75 % varmuus savutetaan jo yhden varaosan kohdalla, eikä kahta suurempi määrä enää kasvata varmuutta.

TAULUKKO 2. Tarvittavien varaosien määrä 75 % varmuudella

Varaosien määrä	P	P_{summa}
0	0,43	0,43
1	0,36	0,79
2	0,15	0,95
3	0,04	0,99
4	0,01	1,00
5	0,00	1,00
6	0,00	1,00
7	0,00	1,00
8	0,00	1,00

2.11 Todennäköisyyksien ilmaiseminen sanallisesti

Jotta järjestelmän luotettavuusarviota voidaan käyttää operaatiosuunnittelussa, on oltava käytössä vakiomuotoinen sanamuotojen ja todennäköisyyksien luettelo, jonka tiedon analysoija ja tiedon perusteella päätöksiä tekevä henkilö ymmärtävät samalla tavalla. Puolustusvoimien Kenttäohjesääntö 2 Sotilastiedustelu määrittää tiedustelutietojen todennäköisyyksien ilmaisemisen taulukon 3 mukaan. Vikaantumistodennäköisyyksien ja haluttujen varmuuksien sanallisessa ilmaisussa olisi edullista käyttää samaa taulukkoa raportointitapojen yhtenäistämiseksi.

TAULUKKO 3. Todennäköisyyksien ilmaisu (Puolustusvoimat 2015b, 34)

Sanamuoto	Sanontaa vastaava todennäköisyys
Erittäin epätodennäköinen	5 %
Epätodennäköinen	20 %
Mahdollinen	50 %
Todennäköinen	75 %
Erittäin todennäköinen	90 %

2.12 Vikaantuneiden yksilöiden määrä ja varaosatarve

Jotta voidaan arvioida tehtäväaikaista korjaustarpeen määrää tai kuinka monta laitetta selviää ehjänä tietyn pituisesta tehtävästä, voidaan siihen käyttää kaavaa 12 (Kececioglu 2002a, 237).

$$N_f(t) = N - N \cdot e^{-\lambda \cdot t}, \quad (12)$$

jossa N_f on tehtävän aikana vikaantuneiden laitteiden määrä, N on laitteiden kokonaismäärä, λ on vikataajuus ja t tehtävän pituus.

Kaavaa 12 kannattaa käyttää yhdessä Poisson-jakauman kanssa varauduttaessa tehtävän aikaiseen kunnossapitoon, jotta saadaan selville odotettujen vikaantumisten määrä sekä halutun varmuustason mukainen varaosien määrä.

Lasketaan esimerkki, jossa pitää suunnitella järjestelmän varaosatarve 14 päivän mittaiselle tehtävälle, siten että tarkasteltavien komponenttien varaosien määrä on todennäköisesti riittävä. Järjestelmässä on 4 kpl tarkasteltavia komponentteja, joiden *MTBF* on 400 h. Valitaan halutuksi varmuudeksi taulukon 3 mukaan 75 %.

Kaavan 12 avulla tehtävän aikana vikaantuvien komponenttien keskimääräiseksi kappalemääräksi saadaan:

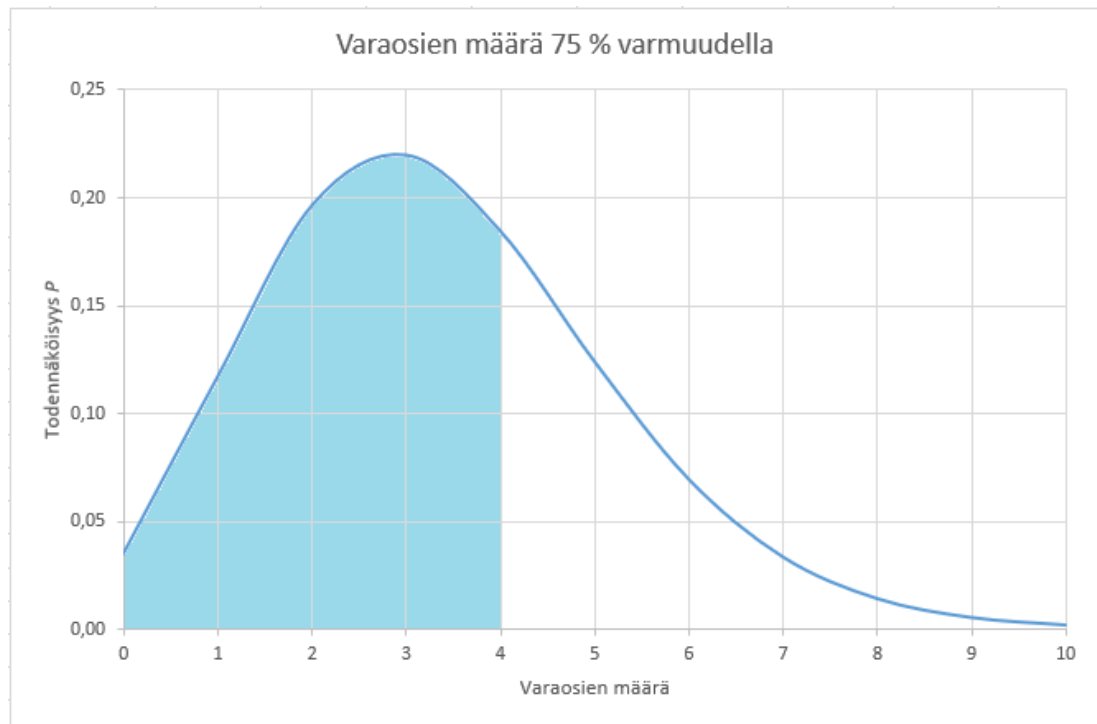
$$N_f(25 \text{ d}) = 4 - 4 \cdot e^{-\frac{24}{400} \cdot 14} = 2,273 \dots \rightarrow 2 \text{ vikaantunutta komponenttia}$$

Lasketaan seuraavaksi varaosien määrä 75 % varmuudella hyödyntäen kaavaa 11 Excel-tilukointiohjelmassa. Tulokset on esitetty taulukossa 4, josta nähdään, että haluttu 75 % varmuus saavutetaan neljällä varaosalla.

TAULUKKO 4. Tarvittavien varaosien määrä 75 % varmuudella.

Varaosien määrä	<i>P</i>	<i>P_{summa}</i>
0	0,03	0,035
1	0,12	0,151
2	0,20	0,348
3	0,22	0,567
4	0,18	0,752
5	0,12	0,876
6	0,07	0,945
7	0,03	0,978
8	0,01	0,992
9	0,01	0,998
10	0,00	0,999

Kuviossa 4 on havainnollistettuna esimerkin vikaantumistodennäköisyyden kertymäfunktio. Vaalean sininen pinta-ala neljännen varaosan kohdalla vastaa 75,2 % varmuutta varaosien riittävydestä.



KUVIO 4. Varaosien määrä 75 % varmuudella

Tehtävän aikana vikaantuu siis keskimäärin 2 komponenttia, mutta jos varataan mukaan vain 2 varaosaa, ei sillä taulukon 4 mukaan saavuteta kuin 34,8 % varmuus varaosien riittävyydestä. Halutun 75 % varmuuden saavuttamiseksi varaosia pitää esimerkkilaskun tapauksessa ottaa mukaan kaksinkertainen määrä verrattuna siihen, moniko komponentti tehtävän aikana keskimäärin vikaantuisi. Myös jo kertaalleen korjattu laite voi vikaantua uudestaan tehtävän aikana.

2.13 Luotettava käyttöikä

Kececioglun (2002a, 231) mukaan sitä aikaa, jonka ajan järjestelmä kykenee toimimaan halutulla luotettavuudella, kutsutaan luotettavaksi käyttöiäksi.

Luotettavan käyttöiän t_R kaava on

$$t_R = -\frac{\ln R_{t_R}}{\lambda}, \quad (13)$$

jossa R_{t_R} on haluttu luotettavuus ja λ on vikataajuus.

Esimerkiksi jos jonkin järjestelmän $MTBF$ on 400 h ja halutaan että järjestelmä kykenee suorittamaan tehtävänsä todennäköisesti, eli 75 % varmuudella, luotettava käyttöikä on:

$$t_R = -\frac{\ln R_{t_R}}{\lambda} = -\frac{\ln R_{t_R}}{\left(\frac{1}{MTBF}\right)} = -\frac{\ln 0,75}{\frac{1}{400 \text{ h}}} = 115,072 \dots \text{h} \approx 115,1 \text{ h}$$

2.14 Käyttöaste

Tarkasteltavan tykistöpatteriston järjestelmän vikahistoriaa ei suoraan voi hyödyntää keskimääräisen vikaantumisasteen määrittämiseen, sillä järjestelmän osat eivät ole kokoaikaisessa käytössä. Ottamalla huomioon tarkasteluajalle sijoittuvat varastointi- ja käyttöjaksot, saadaan selville käyttöaste prosentti.

Esimerkiksi jos laite on 5 vuoden tarkastelujaksolla käytössä 200 päivää ja lopun aikaa varastoituna, käyttöasteeksi saadaan:

$$\frac{200 \text{ d}}{5 \cdot 365 \text{ d} - 200 \text{ d}} = 0,12307 \dots \approx 12,3 \%$$

Jos käyttöastetta ei huomioida, suoraan toiminnanohjausjärjestelmästä saatujen vikatietojen mukaan lasketut vikaantumisvälit ovat aivan liian positiivisia.

Jos esimerkiksi vikatietojen perusteella laitteiston vikaantumisväliksi saadaan 250 päivää, 12,3 % käyttöasteella keskimääräinen vikaantumisväli on:

$$MTBF_{korjattu} = MTBF \cdot \text{käyttöaste} = 250 \text{ d} \cdot 0,123 = 30,75 \text{ d}$$

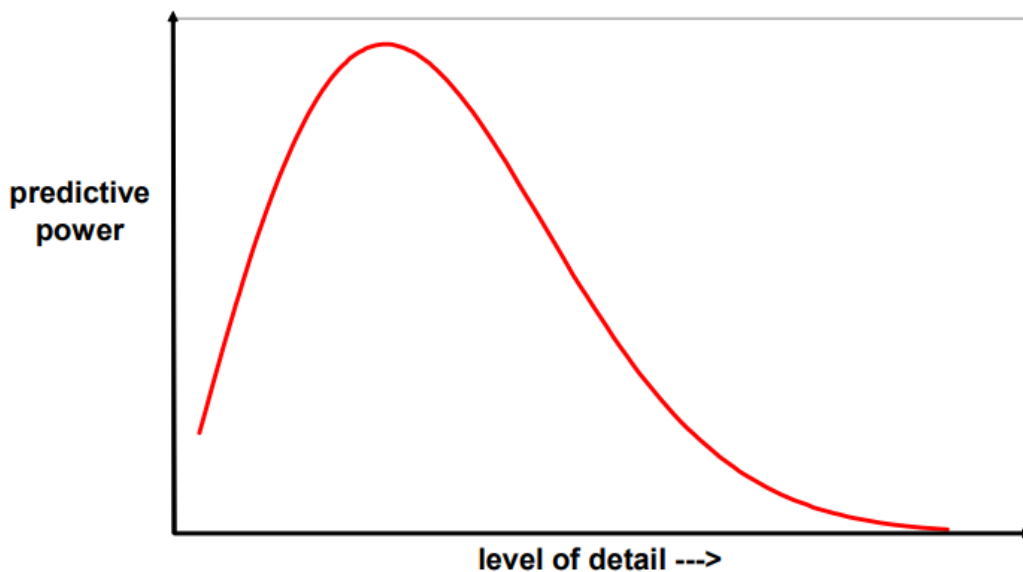
3 PATERISTON JÄRJESTELMIEN LUOTETTAVUUSANALYYSI

3.1 Vikatietojen keräys

Tutkimusta aloittaessa oletuksena oli, että SAP-toiminnanohjausjärjestelmästä olisi saanut kerättyä laitteiden vikatiedot kätevästi. Totuus olikin aivan toista, sillä vikatietojen merkintätavoissa oli niin suurta vaihtelevuutta, että järjestelmä ei kyennyt niiden riittävän kattavaan automaattiseen kokoamiseen.

Käytännössä jokaisen tutkittavan laitteen vikahistoria piti käydä manuaalisesti läpi ja siirtää löydettyt vikatiedot erilliseen taulukkoon. Vikojen kirjaustavat vaihtelevat myös suuresti, yhdessä kirjauksessa voitiin puhua yleisesti voimapakettiviasta, kun taas toisessa kirjauksessa voitiin mennä yksittäisen komponentin osakomponenttitasolle, esimerkiksi ”moottorin polttoainepumpun tiiviste vuotaa”.

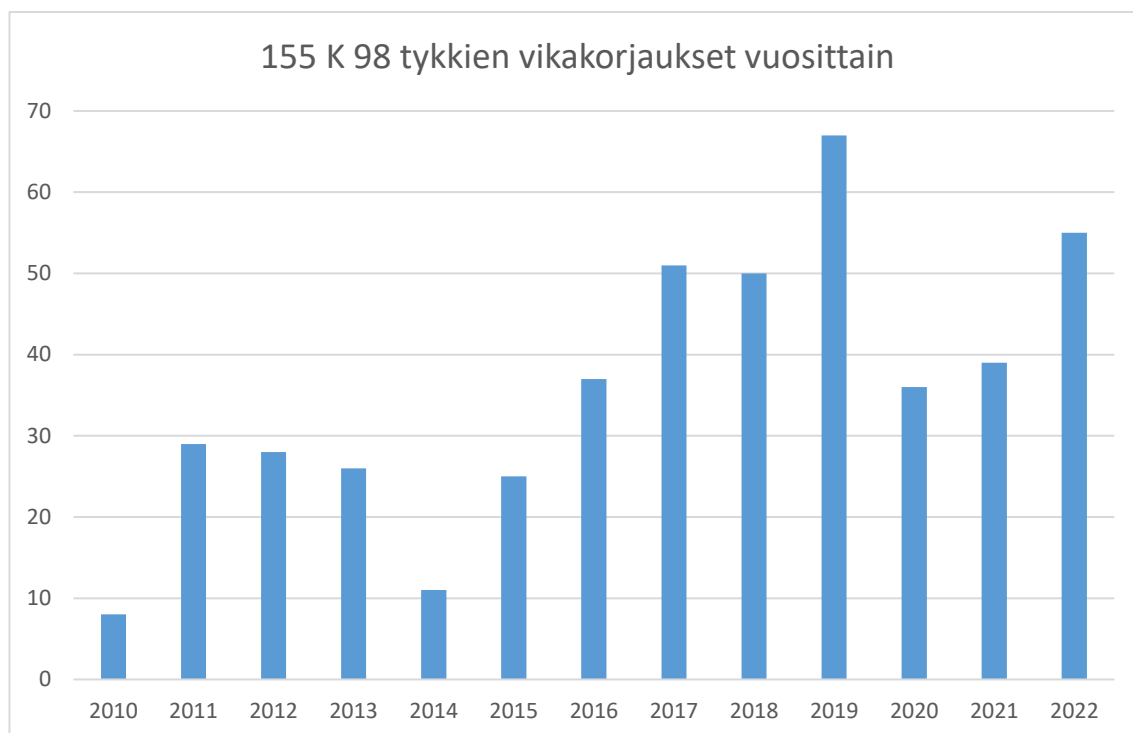
Luotettavuusanalyysin laatimista varten vikatietojen keräämisen pitäisi olla pitkälle automatisoitua ja vikakirjausten tarkkuudessa pitäisi saavuttaa kultainen keskitie, sillä turhan suuripiirteisistä vikakuvauksista ei juuri ole hyötyä ja liian yksityiskohtainen tiedonkeruu vaikeuttaa vikamallin laatimista ja tietojen kirjaamista. Kuviossa 5 on esitetty Luyben (1990, 16) kuvaama ”optimaalisen huolimattomuuden” käsite tiedon tarkkuuden vaikutuksesta ennusteiden laadukkuuteen.



KUVIO 5. Optimaalinen huolimattomuus (Van Rijin 2007, 2)

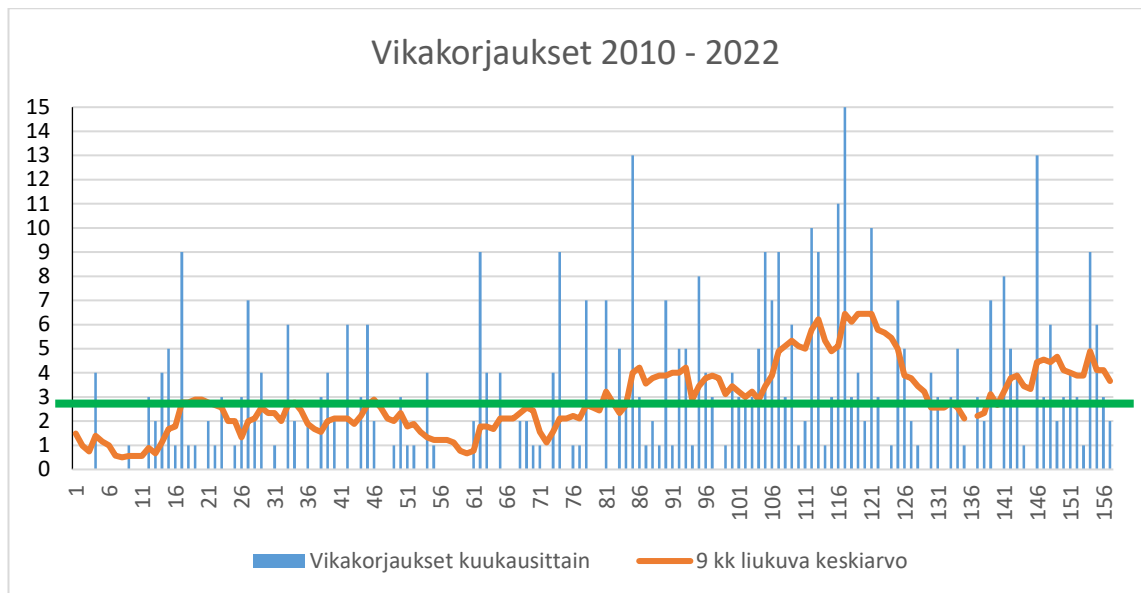
3.1.1 155 K 98

Sen perusteella, että SAP-toiminnanohjausjärjestelmään tehtyjen ensimmäisien merkintöjen päivämäärät 155 K 98 tykkien osalta vaihtelivat tykkiyksilöstä riippuen välillä 1.1.2010 – 29.11.2011 ja tarkastelujakson viimeinen päivä oli 31.12.2022, tarkastelujakson kokonaispituudeksi määräytyi 244 697 päivää. Kuviossa 6 on esitetty 155 K 98 tykkien vikakorjausten määrät vuosittain.



KUVIO 6. 155 K 98 tykkien vikakorjaukset 2010 – 2022

Kuviosta 6 on havaittavissa, että vikakorjauksien määrissä on tapahtunut pientä kasvua. Vielä havainnollisemmin se tulee ilmi kuviosta 7, jossa on esitetty vikakorjaukset kuukausittain ja vikakorjausten määrän 9 kuukauden liukuva keskiarvo. Keskimäärin vikakorjauksia tehtiin kuukaudessa 2,9 kappaletta. Keskimääräisten vikakorjausten taso on piirretty kuvioon vihreällä viivalla.



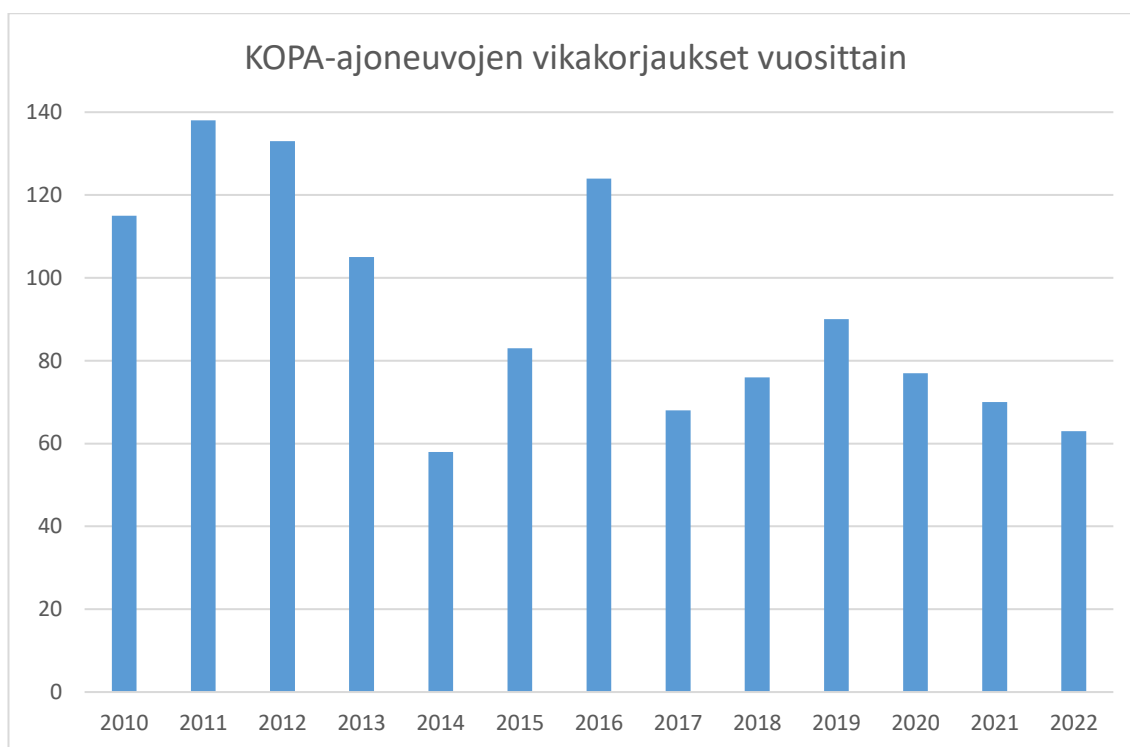
KUVIO 7. 155 K 98 tykkien vikakorjaukset kuukausitasolla

Tutkimukseen saatavilla olleen tiedon perusteella on vaikea päätellä, miksi vikakorjausmäärissä on nouseva trendi. Kyseessä voi olla, että samaa joukko-tyyppiä on koulutettu Puolustusvoimissa viime vuosina aiempaa enemmän, jolloin vikojen määrä kasvaa järjestelmän käytön lisääntyessä. Tai kunnossapidosta vastaava henkilöstö on vaihtunut, jolloin vikojen kirjaamiskäytännöt ovat muuttuneet. Tykit alkavat olla myös jo yli 20-vuotiaita, jolloin järjestelmä voi olla siirtymässä kuvion 1 mukaisesta vakiovikaantumisvaiheesta kohti vanhenemisvikaantumisvaihetta.

3.1.2 Komentopanssariajoneuvo

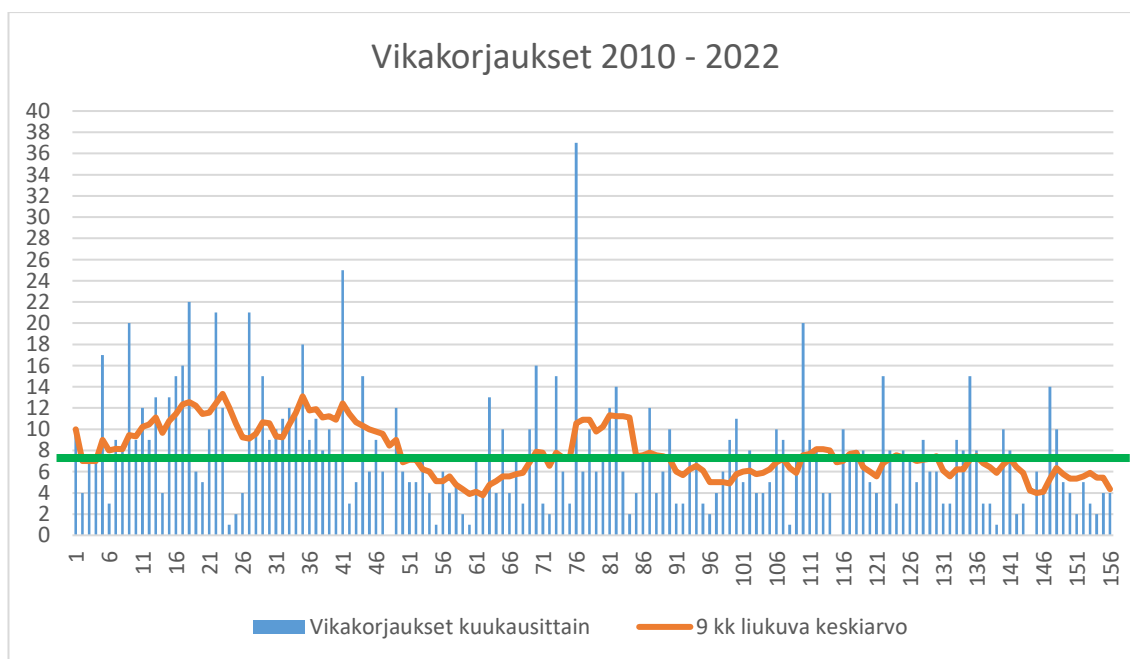
SAP-toiminnanohjausjärjestelmässä varhaisimmat kirjaukset tarkasteltavien komentopanssariajoneuvojen osalta olivat välillä 5.7.2010 – 3.8.2010. Vikatietojen tarkastelujakson viimeinen päivä oli 31.12.2022, jolloin ottamalla huomioon eriävät aloituspäivät, komentopaikkapanssariajoneuvojen vikahistorian tarkastelujakson kokonaispituudeksi saadaan 214 351 päivää.

Kuviossa 8 on esitetty KOPA-ajoneuvojen vikakorjausten määrät vuosittain.



KUVIO 8. KOPA-ajoneuvojen vikakorjaukset 2010 – 2022

Kuviosta 8 nähdään, että vikakorjausten määrässä on tapahtunut pientä laskua, huippuvuosien ollessa 2011 ja 2012. Kuvioon 9 on piirretty tarkastelujaksolla havaitut vikakorjausten määrät kuukausittain ja vikakorjausten määrän 9 kuukauden liukuva keskiarvo. Vikakorjauksia tehtiin kuukausittain keskimäärin 7,7 kappaletta, kyseinen taso on piirretty kuvioon 9 vihreällä viivalla.



KUVIO 9. KOPA-ajoneuvojen vikakorjaukset kuukausitasolla

3.2 155 K 98 vikaantuminen

Tykkien vikakorjausten määrässä on havaittavissa vaihtelua, alhaisimmillaan vikakorjauksia tykillä on historiansa aikana ollut 3 kappaletta ja suurimmillaan 18 kappaletta. Yhteensä niitä oli 463. Vikakorjausten määrät ovat taulukossa 5.

TAULUKKO 5. Vikakorjausten määrät tykeittäin

Tykki rek.numero	Vika-korjaukset	Tykki rek.numero	Vika-korjaukset	Tykki rek.numero	Vika-korjaukset	Tykki rek.numero	Vika-korjaukset
H-2893	14	H-2883	11	H-2919	5	H-2928	5
H-2881	11	H-2887	8	H-2920	6	H-2931	5
H-2882	14	H-2889	11	H-2929	5	H-2932	6
H-2884	18	H-2897	7	H-2930	6	H-2879	4
H-2885	8	H-2924	8	H-2899	3	H-2880	5
H-2886	8	H-2888	9	H-2921	4	H-2901	8
H-2894	10	H-2902	7	H-2922	4	H-2769	8
H-2895	9	H-2911	6	H-2933	3	H-2926	10
H-2896	11	H-2912	12	H-2890	7	H-2913	10
H-2905	7	H-2914	6	H-2898	3	H-2916	7
H-2906	5	H-2915	12	H-2900	5	H-2927	12
H-2907	12	H-2925	10	H-2903	9	H-2891	10
H-2908	10	H-2923	11	H-2904	10	H-2909	10
H-2910	11	H-2918	6	H-2917	4	H-2892	17

Jos katsoo vain vikakorjausten määriä, saa vääristyneen kuvan tykkien vikaantumisten määrästä. Useassa vikakorjauksessa käsiteltävänä oli useita vikoja, eli tykkiä ei viety huoltoon heti yhdestä viasta. Mahdollista on myös, että huollossa havaittiin muitakin vikoja kuin se, minkä takia tykki oli tuotu alun perin korjattavaksi. Kun otetaan huomioon kaikki kirjauksista löytyneet viat, 155 K 98 tykkien kokonaisvikamääräksi tarkastelujaksolla saadaan suurempi luku, joka opinnäytetyön julkisessa versiossa olkoon viitteellinen arvo 585 vikaa.

3.2.1 Vikatyypit

Vikojen tarkka luokittelu oli haastavaa tulkinnanvaraisten vikakorjausmerkintöjen takia. Monissa tapauksissa mainittiin vain karkeasti, että jokin komponentti oli korjattu, mutta ei sitä, mikä siinä tarkalleen oli vikaantunut. 18 vikaa jäi täysin tuntemattomaksi. Eniten vikoja oli tykin aseosassa.

Taulukossa 6 on esitetty vikojen jakaantuminen komponenteittain.

TAULUKKO 6. 155 K 98 tykin vikaantuminen komponenteittain, vikojen määrät poistettu opinnäytetyön julkisesta versiosta

Vikaantunut osa	Vikojen määrä	Osajärjestelmä
Latauslaite	X	Aseosa
Peräkappale	X	
Palautin	X	
Suuntauskoneisto	X	
Sulkukappale	X	
Tuliputki	X	
Painontasain	X	
Korokoneiston iskunvaimennin	X	
Hidastin	X	
Suujarru	X	
Savunpoistin	X	
Hydrauliöljyvuodot	X	Hydrauliikka-järjestelmä
Hydrauliikan ohjaus	X	
Napamoottori	X	
Kannussylinteri	X	
Telisyylinteri	X	
Tykkinoosturi	X	
Rekyylisyylinteri	X	
Hydraulipumppu	X	
Paineakku	X	
Akusto	X	Sähköjärjestelmä
Kytkimet, suojalaitteet, liittimet, anturit	X	
Valot	X	
Verkkovirta akustovaraaja	X	
Laturi	X	
Kaapelointi	X	
Jarrut	X	Lavettihaarat ja muut rungon osat
Ajan istuin	X	
Lavettihaarat	X	
Muut rungon osat	X	
Renkaat	X	
Moottori tarkemmin määrittelemättömät	X	Voimapaketti
Öljynjäähdytin	X	
Polttoainejärjestelmä	X	
Käsikaasu ja kaasuvaijeri	X	
Sammutin ja starttimoottori	X	
Öljyvuoto	X	
Ahdin	X	
Hihnat	X	
Talin-järjestelmä	X	Paikannus ja V ₀ -mittaus
Lähtönopeustutka	X	
Tuntemattomaksi jääneet vikatyypit	18	Tuntematon

3.2.2 Toiminnalliset viat ja kriittiset osajärjestelmät

Jos laite ei kykene toteuttamaan käyttäjän edellyttämiä toimintoja käyttäjän hyväksymällä suorituskyvyllä, se luetaan toiminnallisesti vikaantuneeksi.

Koska tykistö patteriston tehtävänä on operatiivinen tulenkäyttö ja jääkäriprikaatin taistelun tukeminen, sen perusteella käyttäjän edellyttämiksi toiminnoiksi 155 K 98 tykille voidaan tunnistaa seuraavia toimintoja:

- Kyky siirtyä tuettavan jääkäriprikaatin mukana pitkiä matkoja pyöräajoneuvoille tyypillisellä nopeudella
- Kyettävä ampumaan tarkasti vastustajan selustassa olevia tärkeitä maaleja sekä kyettävä tehokkaaseen ja oikea-aikaiseen tulenkäyttöön omien joukkojen kanssa taistelukosketuksessa olevia viholliskohteita vastaan.

Siirtymisen vaatimuksissa ongelmaksi nousee tykille asetettu 50 km/h vetonopeusrajoitus, joka johtuu vetoaisan riittämättömästä lujuudesta. Rajoitus käytännössä estää käyttäjän siirtymiskyvyvaatimukseen vastaamisen.

Jos vetoaisaongelma jätetään huomiotta, siirtymiskykyyn vaikuttavia kriittisiä osakomponentteja tykissä ovat taulukossa 7 esitetyt osat. Tykin ampuma- ja kytkemiskuntoon liittyvät osat on myös laskettu siirtymiskykyyn vaikuttavaksi.

TAULUKKO 7. 155 K 98 tykin siirtymiseen vaikuttavat kriittiset komponentit

Siirtymiseen vaikuttavat kriittiset osat	
Komponentti / osajärjestelmä	Vaikutus
Vetoaisa ja lavettihaarat	Vikaantuminen siirtymän aikana voi aiheuttaa katastrofaalisen vian
Jarrut	Turvallisuustekijä tykkiä vedettäessä ja ampumakuntoon laittaessa
Renkaat	Vika estää tai hidastaa liikkumista
Voimapaketti	Vikaantuminen vaikuttaa tykin hydraulijärjestelmän toimintaan sekä sähkön tuottoon
Akusto ja laturi	Vikaantuminen vaikuttaa mm. voimapaketin toimintaan
Sähköjärjestelmä	Vioittuminen vaikuttaa mm. hydrauliiikan ohjauksen ja voimapaketin toimintaan
Hydraulipumput	Vikaantuminen vaikuttaa hydraulijärjestelmän toimintaan

Hydrauliikkaletkut ja -liittimet	Vikaantuminen vaikuttaa hydraulijärjestelmän toimintaan
Hydrauliikan ohjausjärjestelmä	Vikaantuminen vaikuttaa hydraulijärjestelmän toimintaan
Kannus- teli ja lavettihaarojen käyttösylinterit	Vioittuminen vaikuttaa tykin ampumis- ja kytkemiskuntoon laittoon

Operatiivisen tulenkäytön tehtävissä voidaan joutua ampumaan jopa 30 - 40 kilometrin etäisyydellä olevia pienehköjä maaleja, kuten vastustajan komento- paikkoja, epäsuorantulen aseita ja tutkakalustoa. Pitkän ampumamatkan aiheuttaman hajonnan ja maalien pienen koon takia voidaan joutua ampumaan koval- la tahdilla useita laukauksia per ase, jotta saavutetaan riittävän tehokas vaiku- tus maaliin.

Tulitoimintaan vaikuttavia kriittiset osakokonaisuudet ovat taulukossa 8. Vaikka tykillä pystyy ampumaan manuaalisesti lataamalla ilman latauslaitteen käyttöä, latauslaite on laskettu kuitenkin kriittiseksi komponentiksi, sillä sen käyttö no- peuttaa tulitoimintaa.

TAULUKKO 8. Tulitoimintaan vaikuttavat kriittiset komponentit

Tulitoimintaan vaikuttavat kriittiset osat	
Komponentti / osajärjestelmä	Vaikutus
Tuliputki	Vioittuminen estää ammunnan
Hidastin	Vioittuminen estää ammunnan
Palautin	Vioittuminen estää ammunnan
Ylälavetin runko	Vioittuminen estää ammunnan
Suuntauskoneisto	Vioittuminen estää ammunnan
Sulkukappale	Vioittuminen estää tai merkittävästi hidastaa ammuntaa
Peräkappale	Vioittuminen estää tai merkittävästi hidastaa ammuntaa
Puoliautomaattikoneisto	Vioittuminen estää tai merkittävästi hidastaa ammuntaa
Painontasaimet	Vioittuminen estää tai merkittävästi hidastaa ammuntaa
Talin-järjestelmä	Vioittuminen merkittävästi hidastaa ammuntaa (varasuuntausjärjestelmä ja erillinen paikannus käyttöön)

Latauslaite	Vioittuminen merkittävästi hidastaa ammuntaa (joudutaan lataamaan käsin)
Lähtönopeustutka	Vioittuminen vaikuttaa merkittävästi ballistiseen valmisteluun ja sitä kautta ammunnan tarkkuuteen, varsinkin ampumatkan kasvaessa

3.2.3 MTBF ja käyttöaste

SAP-järjestelmästä oli saatavissa historiatietoa 56 tykin osalta yhteensä 244 697 päivää. Tarkastelujakson viitteellisenä vikamääränä on 585 vikaa, jolloin *MTBF* on:

$$MTBF_{155K98} = \frac{244\,697\text{ d}}{585} = 418,285 \dots \text{d} \approx 418,3\text{ d}$$

Saatu tulos vaikuttaa hyvältä, mutta täytyy huomioida, että tykit eivät ole joka-päiväisessä käytössä, vaan ne viettävät suurimman osan ajastaan varastoituna. Jotta saadaan luotettavampi tulos *MTBF*:lle, pitää selvittää tykkien käyttöaste.

Satakunnan tykistörykmentin 1. patterin viikko-ohjelmien perusteella käyttöpäiviä 155 K 98 tykeille tuli vuonna 2022 yhteensä 44, eli 22 päivää saapumiserää kohden tykkimallin ollessa aktiivisessa koulutuskäytössä. Tykkien kantakirjojen ja 1. patterin arkistoista löytyvien saapumiserien läpivientisuunnitelmien perusteella selvitettiin, että vuosien 2010 ja 2022 välillä 155 K 98 tykit ovat olleet koulutuskäytössä 11 saapumiserän verran. Koska tykkejä on käytetty myös henkilökunnan koulutuksessa sekä erilaisissa paraateissa ja näytöksissä, käyttöpäivien määrän arvioissa otettiin lisäksi huomioon 5 % varmuuskerroin.

Tällöin tykkien käyttöaste aikavälillä 1.1.2010 – 31.12.2022 on:

$$\text{Käyttöaste} = \frac{1,05 \cdot 11 \cdot 22\text{ d}}{13 \cdot 365\text{ d}} = 0,05355 \dots \approx 5,36\%$$

Oletetaan, että saatua käyttöastetta voidaan soveltaa myös loppuihin tarkasteltaviin tykkeihin, sillä tykkien käyttö- ja varastointikierto on oletettavasti samankaltainen tasaisen kulumisen varmistamiseksi.

Kun käyttöaste otetaan huomioon, 155 K98 tykin viitteellinen *MTBF* on:

$$MTBF_{155K98} = 418,285 \dots d \cdot 0,05355 \dots = 22,399 \dots d \approx 22,4 d$$

Kun *MTBF* muutetaan tunneiksi, saadaan tulokseksi noin 530 h. Jos verrataan saatua tulosta Yhdysvaltalaisen M109A7-panssarihaupitsin *MTBSA*-arvoon, joka taulukon 1 mukaan on 45,4 h, on tulos 155 K 98 kannalta varsin hyvä. Tulokset eivät kuitenkaan ole täysin rinnastettavissa toisiinsa, sillä M109A7-mallin *MTBSA*-arvo mitattiin aktiivisen käytön aikana.

M109A7-testissä 6-tykkinen panssarihaupitsipatteri suoritti kaksi 72 tunnin mittaista harjoitusta, jotka sisälsivät kovapanosammuntoja sekä siirtymisiä tiellä ja maastossa. Testauksessa vaatimuksena oli, että panssarihaupitsi kykenee 24 tunnin aikana keskimäärin ampumaan 104 laukausta ja siirtymään 59 mailia.

(Gilmore 2017, 1.)

3.2.4 Apuvoimalaitteen *MTBF*

Tykissä on apuvoimalaitteena Deutzin valmistama dieselkäyttöinen moottori, joka tuottaa sähkö- ja hydraulikkavoimaa tykin laitteiden käyttöön. Keskimääräinen dieselmoottorin käyttöaika päivässä arvioitiin Niinisalossa olleiden tykkien kantakirjoihin merkittyjen vastaanottopäivien, sekä 31.12.2022 käyttötuntimittareihin kertyneiden tuntimäärien perusteella. Tiedot on esitetty taulukossa 9.

TAULUKKO 9. Tykkien dieselmoottorien käyttötunnit

AYS-numero	Tykin vastaanottopäivä	Moottori käyttötunnit		Käyttötunnit vuoden aikana	Käyttötunnit päivässä
		1.1.2022	31.12.2022		
13011	29.4.1999	345,7	398,3	52,6	0,046
13045	14.11.2003	350,1	395,1	45,0	0,057
13019	11.8.2000	481,1	525,8	44,7	0,064
13009	9.12.1998	437,2	491,5	54,3	0,056
13048	20.4.2004	324,2	373,0	48,8	0,055
13034	4.6.2002	391,2	417,0	25,8	0,055
13046	11.11.2003	351,9	399,3	47,4	0,057
13036	20.8.2002	360,7	407,5	46,8	0,055
13010	9.12.1998	408,5	473,5	65,0	0,054
13024	9.1.2001	377,7	425,5	47,8	0,053
13037	26.11.2002	336,7	383,1	46,4	0,052

Ottaen huomioon tykkien iät ja dieselmoottorien käyttötunnit 31.12.2022, saatiin laskettua keskimääräiseksi käyttötuntimääräksi päivässä 0,055 h.

SAP-järjestelmästä saatavilla olevien vikatietojen tarkastelujakso on tykkiä kohden keskimäärin noin 4 369,6 tuntia, jolloin keskimääräinen dieselmoottorin käyttötuntikertymä tarkastelujaksolla on:

$$4\,369,589 \dots d \cdot 0,0549 \dots \frac{h}{d} = 239,910 \dots h \approx 239,9 h$$

Laskettaessa dieselmoottorin *MTBF*-arvoa, siinä huomioitaviksi vioiksi valittiin akkuviat, laturiviat, moottoriviat sekä nestevuodot. Kyseisiä vikoja oli tarkastelujaksolla viitteellisenä arvona yhteensä 71, eli noin 1,26 vikaa per tykki.

Dieselmoottorin viitteellinen *MTBF* on tällöin:

$$MTBF_{apuvoima} = \frac{239,910 \dots h}{1,267 \dots} = 189,224 \dots h \approx 189,2 h$$

On kuitenkin mahdollista, että kohtalaisen suuri akkuvikojen määrä johtuu ei-optimaalisista varasto-olosuhteista, jolloin niiden huomiotta jättäminen vaikuttaa *MTBF*:ään. Kun huomioidaan vain laturiviat, moottoriviat sekä moottorinesteiden vuodot, dieselmoottoriin vaikuttavien vikojen määrä putoaa 34:ään. Yhtä tykkiä kohden moottorivikoja on silloin noin 0,6 kpl tarkastelujaksolla.

Tällöin dieselmoottorin viitteellinen *MTBF* on:

$$MTBF_{apuvoima} = \frac{239,910 \dots h}{0,910 \dots} = 395,145 \dots h \approx 395,1 h$$

Satakunnan tykistörykmentin 1. patterin viikko-ohjelmien perusteella käyttöpäiviä 155 K 98 tykeille tuli vuonna 2022 yhteensä 44 ja dieselmoottorien keskimääräinen käyttötuntimäärä vuonna 2022 oli 47,7 h. Tämän perusteella tykin ollessa aktiivisessa käytössä sen apuvoimalaitteen keskimääräinen käyttötuntimäärä päivässä on:

$$\frac{47,690 \dots h}{44 d} = 1,083 \dots \frac{h}{d} \approx 1,1 \frac{h}{d}$$

3.2.5 MRBF

MRBF-lyhenne (Mean rounds between failures) tarkoittaa keskimääräistä laukaussuoraa vikojen välillä. Suomalaisessa järjestelmässä ampumatarvikkeiden kulutuksen ja riittävyyden arvioimisessa käytettävä mitta on tuliannos, jonka suuruus vastaa pääaseistuksen ampumatarvikkeiden keskimääräistä vuorokausikulutusta. 155 K 98 kalustoa käyttävällä tykistöpatteristolla tuliannoksen suuruus on 1080 laukausta. (Puolustusvoimat 2014b, 89 – 90.)

Koska 18-tykkisen tykistöpatteriston tuliannos on suuruudeltaan 1080 laukausta, jokainen patteriston tykki ampuu keskimäärin 60 laukausta päivässä. Kun tiedetään *MRBF* ja keskimääräinen päiväkulutus, voidaan arvioida, kuinka monta päivää tykki todennäköisesti pysyy taistelukuntoisena.

Tutkimuksessa päästiin tarkastelemaan 12 tykin kantakirjoja, joista saatiin selville, kuinka monta laukausta niillä on keskimäärin päivässä ammuttu. Kantakirjojen laukaussuoratiedot ovat taulukossa 10.

TAULUKKO 10. Tykkien laukausten kantakirjamerkinnot

AYS-numero	Tykin tai uuden tuliputken vastaanottopäivä	Tuliputken viimeisimmät merkityt laukaukset	Tuliputken kokonaislaukaussuora	Laukauksia päivässä
13011	14.12.2012	7.10.2022	226	0,062
13037	9.6.2010	2.10.2022	146	0,032
13048	27.5.2004	7.10.2022	254	0,037
13033	4.6.2002	4.10.2022	364	0,048
13045	1.7.2010	6.10.2022	237	0,052
13036	20.8.2002	7.10.2022	489	0,066
13010	9.12.1998	2.10.2022	468	0,053
13046	11.11.2003	7.10.2022	482	0,069
13034	4.6.2002	14.4.2022	249	0,033
13024	1.10.2009	14.4.2022	227	0,047
13019	11.8.2000	4.10.2022	505	0,062
13009	9.12.1998	6.10.2022	563	0,064

Taulukosta 10 nähdään, että tuliputkien keskimääräiset laukaussuorat vaihtelevat jonkin verran. Keskiarvo asettuu lukuun 0,052 laukausta päivässä, jos tarkastelujaksona pidetään tykin tai uuden tuliputken vastaanottopäivän ja 31.12.2022 välistä aikaa. Koska keskimääräinen SAP-järjestelmästä saatavan vikaistorian tarkastelujakso yhtä tykkiä kohden oli 4 369,6 päivää, saadaan tarkastelujakson aikaiseksi keskimääräiseksi laukaussuoraksi tykkiä kohden:

$$4\,369,6\text{ d} \cdot 0,052 \frac{\text{ls}}{\text{d}} = 227,219 \dots \text{ls} \approx 227,2 \text{ ls}$$

Koska tarkastelujaksolla tykkien viitteellinen vikamäärä oli 585 vikaa, yhtä tykkiä kohden vikoja oli tarkastelujaksolla 10,4 kappaletta. *MRBF* on siis tällöin:

$$MRBF = \frac{227,2 \text{ ls}}{10,4} = 21,846 \dots \text{ls} \approx 21,8 \text{ ls}$$

Saatu tulos keskimääräiselle laukaussäärälle vikaantumisten välillä on heikko, jos sitä vertaa huonoimpaan lähdemateriaalista (DARCOM 1979, 43-6) löydettyyn *MRBF*-arvoon, joka oli yhdysvaltalaisen M110 telahaupitsin 100 laukausta. 155 K 98:lle saatu *MRBF*-tulos on vain noin viidesosa siitä. On kuitenkin mahdollista, että M110 telahaupitsin *MRBF*:n laskennassa ei ole huomioitu kuin aseosan viat, jolloin laskennasta saadaan huomattavasti positiivisempia tuloksia.

Jos 155 K 98 tykin *MRBF*-laskennassa jättää huomiotta sellaiset vikaantumistyytit, jotka eivät suoranaisesti vaikuta tulitoimintaan, kuten napamoottorit, akustovaraaja, voimapaketti yms., viitteelliseksi vikamääräksi saadaan 85 vikaa, jolloin *MRBF* asettuu arvoon 150 laukausta.

Olisi mielenkiintoista tietää, mikä on ollut tavoiteltu *MRBF*, kun 155 K 98 tykin teknisiä vaatimustenmäärittelyjä on tehty. Esimerkiksi vuonna 1997 kun Yhdysvaltojen maavoimat ja merijalkaväki olivat yhteistyössä hankkimassa korvaajaa M198-haupitsille, minimivaatimuksena tulevan M777-haupitsin *MRBSA*:lle (Mean rounds between system abort) oli asetettu 800 laukausta (US Army & US Marine Corps 1997, 10).

M777-haupitsi itseasiassa vaikuttaa ylittävän sille asetetun laukaisumäärävaatimuksen, sillä LW155-hankkeen johtavan projektipäällikön Christopher Hatchin mukaan M777A2-mallin haupitsi kykenee keskimäärin 880 laukaukseen ennen toiminnan keskeytymistä (Defense Media Network, 2011).

Tuntematta tarkemmin miten M777-haupitsin *MRBSA*-arvo lasketaan, se vaikuttaa todella kovalta tulokselta. Jos laskennassa on huomioitu vain tuliputken ja peräkappaleen kriittiset viat, niin silloin yli 800 laukauksen tulos voi olla mahdollinen.

3.2.6 MMBF

MMBF-lyhenne (Mean mileage between failures) tarkoittaa keskimääräistä liikkumismatkaa vikojen välillä. Vaikka 155 K 98 on kykenevä liikkumaan oman apumoottorinsa avulla, selvittäessä *MMBF*-arvoa liikkumismatkana käytetään tykin vetokilometrejä kuorma-auton perään kytkettynä.

Keskimääräiset tykin vetokilometrit tarkastelujakson ajalta selvitettiin tykkien kantakirjoihin merkittyjen vetokilometrien avulla. Tutkimuksessa oli saatavilla tietoa 12 tykin osalta, joita oli kantakirjojen merkintöjen mukaan vedetty yhteensä 30 588 km. Kyseisten tietojen merkintäajat olivat vuosien 1999 – 2022 välillä, merkintöjen perusteella tarkastelujakson kokonaispituudeksi saatiin 81 867 päivää. Keskimääräinen vetokilometrimäärä yhdellä tykillä päivää kohden on:

$$\frac{30\,588\text{ km}}{81\,867\text{ d}} = 0,373 \dots \frac{\text{km}}{\text{d}} \approx 0,37 \frac{\text{km}}{\text{d}}$$

Koska SAP-toiminnanohjausjärjestelmästä saatava vikahistorian pituus 56 tykin osalta oli yhteensä 244 697 päivää ja vikojen viitteellinen määrä tarkastelujaksolla on 585 kappaletta, tykin *MMBF* on tällöin:

$$MMBF_{155K98} = \frac{244\,697\text{ d} \cdot 0,373 \dots \frac{\text{km}}{\text{d}}}{585} = 156,284 \dots \text{ km} \approx 156,3\text{ km}$$

Saatu tulos *MMBF*:lle on aika vaatimaton, mutta sitä selittää se, että laskennassa huomioitiin kaikki viat. Suuri osa vioista ei vaikuta tykin vedettävyyteen. Kun huomioidaan vain tykin kytkemis- ja ampumakuntoon laittoon ja vetämiseen vaikuttavat viat, vikojen viitteellinen määrä on 228 kappaletta. Tällöin *MMBF* on:

$$MMBF_{155K98} = \frac{244\,697\text{ d} \cdot 0,373 \dots \frac{\text{km}}{\text{d}}}{228} = 400,992 \dots \text{ km} \approx 401\text{ km}$$

Ottaen huomioon, että patteristoa on tarkoitus käyttää laajalla alueella, saatu tulos *MMBF*:lle on kohtalaisen hyvä siirtymiskyvyn luotettavuuden kannalta.

3.2.7 MTTR

155 K 98 tykkien 2-tason kunnossapidon vianselvittelyyn, varaosalogistiikkaan ja korjaamiseen käytettiin 15 280 päivää, vikojen viitteellisen määrän ollessa 585 kpl. Keskimääräinen viitteellinen palautumisaika vioittumisesta on tällöin:

$$MTTR_{155K98} = \frac{15\,280\text{ d}}{585} = 26,119 \dots \text{d} \approx 26,1\text{ d}$$

MTTR on melko suuri, pitää kuitenkin ottaa huomioon, että kyseessä on rauhan ajan korjaustoiminnan tunnusluku. Kiireettömien vikojen SAP-järjestelmään kirjatut korjaamisajat venyvät helposti, sillä korjaustyö saatetaan pitää toiminnanohjausjärjestelmässä aktiivisena, vaikka mekaanikot tekisivät sillä aikaa hetkelisesti työtä jonkin muun laitteen parissa, jonka korjaamisen tärkeys on korkeampi.

Verrokiksi M777-haupitsille on asetettu erilaiset *MTTR*-tavoitearvot Unit-tason ja Direct Support-tason huolloille. Unit-taso vastaa Puolustusvoimien 1-tason kunnossapitoa ja Direct Support 2-tason kunnossapitoa. Tavoitearvot *MTTR*:lle olivat Unit-tasolla 30 min ja Direct Support-tasolla 2 h (US Army & US Marine Corps 1997, 12).

On toki huomioitava, että asetetut tavoiteajat tarkoittavat luultavasti vain varsinaista huolto- tai korjaustyötä, sillä *MTTR*-tavoitetasot ovat niin tiukat, että varaosalogistiikan aiheuttamaa viivettä ei todennäköisesti ole huomioitu niissä.

3.2.8 MTBEFF

MTBEFF:ssä otetaan huomioon vain sellaiset tehtävän suorittamisen aikaiset viat, joista aiheutuu tehtävän keskeytys tai lopetus. Laskusta pois jätetyt vika-tyypit saattavat silti viiveellä aiheuttaa kriittisen vian tai vaaratilanteen, esimerkiksi savunpoistimen toimimattomuus voi aiheuttaa syttymisherkkien kaasujen takaisinvirtauksen peräkappaleen suuntaan ja aiheuttaa vaaraa tykkimiehistöille.

Aseosan olennaisiin toimintoihin liittyviä vikoja on viitteellinen määrä 89 kappaletta ja siirtymiskyvyn olennaisiin toimintoihin liittyviä vikoja taas viitteellinen määrä 158 kappaletta. Näin ollen 155 K 98 tykin *MTBEFF* käyttöaste huomioiden on:

$$MTBEFF_{155K98} = \frac{244\,697\text{ d}}{89 + 158} \cdot 0,0535 \dots = 53,001 \dots \text{ d} \approx 53 \text{ d}$$

3.3 Komentopanssariajoneuvon vikaantuminen

Tykistö patteriston käyttämät komentopanssariajoneuvot ovat tyypiltään KOMENTOPAIKKA \ M18 KOPA B/T XA-202. Niitä on kuitenkin käytössä suhteellisen vähän, jolloin tarkasteluun otettiin vikatietomäärän kasvattamiseksi myös muita samalle alustalle rakennettuja komentopaikkapanssariajoneuvoja. Ne eroavat varustelultaan hieman toisistaan, mutta niiden käyttötavat ovat niin lähellä toisiaan, että niissä esiintyvät viat ovat keskenään hyvin verrannollisia.

Tarkasteltavia komentopanssariajoneuvoja on yhteensä 47 kappaletta.

Ne ovat tyypiltään seuraavia:

- KOMENTOPAIKKA \ M18 KOPA B/T XA-202
- KOMENTOPAIKKA \ M18 KOPA B/J XA-202
- KOMENTOPAIKKA \ M18 KOPA B XA-202
- KOMENTOPAIKKA \ M18 KOPA B/M XA-202

Komentopaikkapanssariajoneuvojen vikakorjausten määrä tarkastelujaksolla on 1200 kappaletta. Korjaukset jakautuvat ajoneuvoittain taulukon 11 mukaan:

TAULUKKO 11. Vikakorjausten määrät ajoneuvoittain

KOPA	Vikakorjaukset	KOPA	Vikakorjaukset	KOPA	Vikakorjaukset
PS921-2	16	PS921-19	30	PS921-407	28
PS921-3	20	PS921-20	25	PS921-408	24
PS921-4	19	PS921-21	24	PS921-409	22
PS921-5	15	PS921-22	20	PS921-410	32
PS921-6	10	PS921-23	22	PS921-411	36
PS921-7	12	PS921-24	20	PS921-412	27
PS921-8	21	PS921-25	20	PS921-413	30
PS921-9	27	PS921-26	23	PS921-451	28
PS921-10	51	PS921-31	33	PS921-452	16
PS921-11	29	PS921-32	22	PS921-453	19
PS921-13	28	PS921-33	20	PS921-457	24
PS921-14	50	PS921-34	21	PS921-460	19
PS921-15	32	PS921-35	27	PS921-461	20
PS921-16	38	PS921-402	44	PS921-462	20
PS921-17	42	PS921-404	19	PS921-463	17
PS921-18	41	PS921-405	17		

Taulukosta 11 huomaa, että vikakorjausten määrä vaihtelee melko suuresti, tätä selittää sekä KOPA-ajoneuvojen epätasainen käyttö ja vikaantumisten kirjaimistapojen vaihtelevuus eri aikoina ja eri korjaamoissa. Joissain tapauksissa viat kirjattiin omina erillisinä tapahtumina, kun taas toisissa tapauksissa monta vikakorjausta niputettiin yhden korjaustyön alle. Tämän takia vikakorjausten määrä ei anna luotettavaa tietoa, vaan on huomioitava jokaisen vikakorjauksen sisältämät yksittäiset viat. Vikojen kokonaismääränä opinnäytetyön julkisessa versiossa pidetään viitteellistä arvoa 1 325 kappaletta.

3.3.1 Vikatyypit

KOPA-ajoneuvon vikakorjausten raportoinnissa oli havaittavissa samaa ongelmaa kuin 155 K 98 tykillä, eli huoltoraporttiin on merkitty vikakorjaus, mutta ei tarkenneta, että mitä on korjattu. Täysin tuntemattomaksi jääneitä vikoja KOPA-ajoneuvolla havaittiin tarkastelussa yhteensä 107 kappaletta, sekä huoltoraporteissa oli jopa kymmeniä muita huonosti määritettyjä vikoja, joista pystyi suurin piirtein tunnistamaan mistä osajärjestelmästä puhutaan, mutta tarkka vian määrittäminen puuttui. Eniten vikoja oli sähköjärjestelmän komponenteissa.

Taulukossa 12 on esitetty vikojen jakaantuminen komponenteittain.

TAULUKKO 12. KOPA-ajoneuvon vikaantuminen komponenteittain, vikojen määrät poistettu opinnäytetyön julkisesta versiosta

Vikaantunut osa	Vikojen määrä	Osajärjestelmä
Pistorasiat	X	Sähköjärjestelmä
Alustan ja laitteiden akusto	X	
Laturit ja invertterit	X	
Valaisimet	X	
Anturit ja mittarit	X	
Kytkimet ja releet	X	
Kaapelointi	X	
Sähkökeskukset	X	
Piirikortit ja säätimet	X	
Sähkömoottorit ja pumput	X	
Sähkövoimakone	X	
Ylijännite- ja vikavirtasuojaus	X	
Sähkövika tarkemmin määrittelemätön	X	
Jousitus ja iskunvaimennus	X	
Jarrut	X	
Pyörännavan öljyvuoto	X	
Alusta tarkemmin määrittelemätön	X	
Pyörien suuntaus	X	
Ohjaus tarkemmin määrittelemätön	X	
Etu- keski- ja taka-akseli	X	
Ohjaustehostin	X	
Akselisto öljyvuoto	X	
Pyörän puhkeaminen, venttiili- ja sokkaviat	X	
Vetoakselit	X	
Pyörännapa ja laakerit	X	
Tasauspyörästö	X	
Pyöränripustukset	X	
JOJÄ-vika tarkemmin määrittelemätön	X	Johtamisjärjestelmä
Antennit, mastot ja harukset	X	
Valokuidut, kuituliittimet yms.	X	
Radiot	X	
Näytöt ja näytönjakajat	X	
Reitittimet ja kytkimet	X	
Sisäpuhelinjärjestelmä	X	
Tietokoneet	X	
Ethernet-kaapelit, liittimet yms.	X	
VIRVE	X	
GPS-järjestelmä	X	
Tulostin	X	
Luukut ja ovet	X	Runko ja siihen liittyvät komponentit
Tähystysprismat ja peilit	X	
Lasi- ja prismapesurit + pyyhkijät	X	
Lasit	X	

Kehälavetti	X	
Takatelttä	X	
Otekahvat, ketjukkannattimet ja muut pienosat	X	
Vinssi	X	
Lasien suojat	X	
Kolarivauriot	X	
Lankaleikkuri	X	
Naamiojärjestelmä	X	
Syöttövaijeri, käsisyöttö ja syöttöpoljin	X	Voimapaketti
Vaihteisto	X	
Jäähdytysjärjestelmä	X	
Polttoainejärjestelmä	X	
Ahtojärjestelmä	X	
Voitelujärjestelmä	X	
Vesipumppu	X	
Pakoputki	X	
Moottori tarkemmin määrittelemättömät	X	
Sammutin	X	
Moottorin suojakopat	X	
Hehkutus ja startti	X	
Ilmastointilaite	X	Ilmastointi, sisätilat, lämmittimet ja palontorjunta
Palontorjuntajärjestelmä	X	
Lämmittimet (Eber, Webasto, telttalämmitin)	X	
Penkit ja turvavyöt	X	Hydrauliikkajärjestelmä
Hydrauliikkaöljyvuodot	X	
Hydrauliikan ohjaus	X	
Hydrauliikan jäähdytys	X	
Hydrauliikka tarkemmin määrittelemättömät	X	
Hydrauliikkapumppu	X	
Tuntemattomaksi jääneet viat	107	Tuntematon

3.3.2 Toiminnalliset viat ja kriittiset osajärjestelmät

Koska tykistöpatteriston tehtävänä on operatiivinen tulenkäyttö ja jääkäriprikaatin taistelun tukeminen, komentopanssariajoneuvolle voidaan tunnistaa käyttäjän vaatimusten kannalta kriittisiksi toiminnoiksi seuraavat ominaisuudet:

- Kyky siirtyä tuettavan jääkäriprikaatin mukana pitkiä matkoja pyöräajoneuvoille tyypillisellä nopeudella
- Pystyttävä muodostamaan tulikomentoliikenteen vaatimat viestiyhteydet suhteellisen lähelle kuin myös kymmenien kilometrien etäisyydelle.

Siirtymiskykyyn vaikuttavia kriittisiä osakomponentteja KOPA-ajoneuvossa ovat taulukossa 13 esitetyt osat.

TAULUKKO 13. KOPA-ajoneuvon siirtymiseen vaikuttavat kriittiset komponentit

Siirtymiseen vaikuttavat kriittiset osat	
Komponentti / osajärjestelmä	Vaikutus
Moottori	Vika estää tai hidastaa liikkumista
Vaihteisto	Vika estää tai hidastaa liikkumista
Akselisto ja tasauspyörät	Vika estää tai hidastaa liikkumista
Jarrut	Turvallisuustekijä siirtyessä, vika estää tai hidastaa liikkumista
Renkaat	Vika estää tai hidastaa liikkumista
Jousitus ja iskuvaimennus	Vika estää tai hidastaa liikkumista
Ohjausjärjestelmä	Vika estää tai hidastaa liikkumista
Akusto ja laturi	Vika vaikuttaa mm. voimapakettiin
Sähköjärjestelmä	Vika vaikuttaa mm. voimapakettiin
Hydrauliikkajärjestelmä	Vika vaikuttaa mm. voimapakettiin

Johtamiskykyyn vaikuttavat kriittiset osakokonaisuudet on esitetty taulukossa 14.

TAULUKKO 14. KOPA-ajoneuvon johtamistoimintaan vaikuttavat kriittiset komponentit

Johtamistoimintaan vaikuttavat kriittiset osat	
Komponentti / osajärjestelmä	Vaikutus
Sähkövoimakone	Vika estää johtamistoiminnan tai haittaa sitä merkittävästi
Akusto, laturit ja teholahteet	Vika estää johtamistoiminnan tai haittaa sitä merkittävästi
Sähköjärjestelmä	Vika estää johtamistoiminnan tai haittaa sitä merkittävästi
Radiot	Vika estää johtamistoiminnan tai haittaa sitä merkittävästi
Antennit	Vika estää johtamistoiminnan tai haittaa sitä merkittävästi
Reitittimet ja kytkimet	Vika estää johtamistoiminnan tai haittaa sitä merkittävästi
Tietokoneet	Vika estää johtamistoiminnan tai haittaa sitä merkittävästi
Liittimet, kuidut ja kaapelointi	Vika estää johtamistoiminnan tai haittaa sitä merkittävästi

3.3.3 MTBF ja käyttöaste

SAP-järjestelmästä oli saatavissa historiatietoa 47 KOPA-ajoneuvon osalta yhteensä 214 351 päivää. Tarkastelujaksolla ajoneuvojen viitteellinen vikamäärä on 1 325 vikaa, jolloin *MTBF* on:

$$MTBF_{KOPA} = \frac{214\,351\text{ d}}{1\,325} = 161,774 \dots \text{ d} \approx 161,7\text{ d}$$

Lasketussa *MTBF*:ssä ei ole vielä huomioitu KOPA-ajoneuvojen käyttöastetta, joka pitää huomioida luotettavamman tuloksen saamiseksi.

Käyttöaste saadaan selville ajoneuvojen voimapakettien ja sähkövoimakoneiden keskimääräisten käyttötuntien avulla, jotka on selvitetty huoltoraporteista. Tarkastelujaksolla voimapakettille tuli yhtä ajoneuvoa kohden käyttötunteja keskimäärin 0,12 h / d, ja sähkövoimakoneelle puolestaan 0,66 h / d.

Koska tarkastelujaksolla vikatietoa oli saatavilla 214 351 päivältä, KOPA-ajoneuvojen käyttöaste on:

$$\text{Käyttöaste} = \frac{\left(0,12 \frac{\text{h}}{\text{d}} + 0,66 \frac{\text{h}}{\text{d}}\right) \cdot 214\,351 \text{ d} \cdot \frac{1}{24}}{214\,351 \text{ d}} = 0,03248 \dots \approx 3,25 \%$$

Kun käyttöaste otetaan huomioon, KOPA-ajoneuvon viitteellinen *MTBF* on:

$$MTBF_{KOPA} = 161,774 \dots \text{ d} \cdot 0,03248 \dots = 5,254 \dots \text{ d} \approx 5,3 \text{ d}$$

Ottaen huomioon, että tykistöparistoa on tarkoitus pääosin käyttää hyökkäyksen tukemisessa, noin viiden päivän vikaantumisväli on kohtalaisen hyvä luotettavuuden kannalta. Toki pitää muistaa, että *MTBF*:n laskennassa on huomioitu kaikki viat, joista iso osa on melko vähäpätöisiä tulitoiminnan johtamisen ja viestiyhteyksien ylläpidon kannalta.

3.3.4 Sähkövoimakoneen ja voimapakettin *MTBF*

Komentopanssariajoneuvon johtamistoiminnan kannalta jatkuva sähköntuotanto on äärimmäisen tärkeää, sillä sähköntuotannon lakattua laiteakusto ei kykene kovin kauaa ylläpitämään johtamisjärjestelmän toimintoja. Sähkövoimakoneen *MTBF* saadaan laskettua sähkövoimakoneiden keskimääräisten päiväkohtaisien käyttötuntien, SVK-vikojen määrän ja tarkastelujakson vikaistorian pituuden avulla. SVK-vikojen viitteellinen määrä olkoon 118 kpl.

$$MTBF_{SVK} = \frac{0,66 \frac{\text{h}}{\text{d}} \cdot 214\,351 \text{ d}}{118} = 1198,912 \dots \text{ h} \approx 1198,9 \text{ h}$$

Koska jatkuvan sähköntuotannon toimivuus on kriittistä KOPA-ajoneuvon johtamiskyvyn kannalta, voidaan taulukon 3 mukaisesti määrittää, että SVK:n tulisi toimia erittäin todennäköisesti, jolloin luotettavuusvaatimus on vähintään 90 %. Ratkaisemalla kaavan 1 ajanhetken t suhteen, voidaan selvittää millä ajanhetkellä sähkövoimakoneen luotettavuus R putoaa alle vaaditun 90 % rajan:

$$t = -MTBF_{SVK} \cdot \ln R = -1198,912 \dots \text{h} \cdot \ln 0,9 = 126,318 \dots \text{h} \approx 126,3 \text{ h}$$

Vuorokausiksi muutettuna tulos vastaa noin viiden päivän jatkuvaa käyttöä. Tuloksesta voidaan päätellä, että tykistöpatteristolle tyypillisessä muutaman päivän mittaisessa hyökkäyksen tukemistehtävässä sähkövoimakone kykenee tuottamaan sähköä riittävällä luotettavuudella.

KOPA-ajoneuvon siirtymiskyvyn kannalta olennainen osa on voimapaketti, eli moottorin ja vaihteiston kokonaisuus. Siirtymiskykyyn vaikuttaa toki myös alustan viat, mutta ne ovat kentällä hieman helpommin korjattavissa. Voimapaketin *MTBF* saadaan laskettua voimapaketin keskimääräisten päiväkohtaisten käyttötuntien, vikojen määrän ja tarkastelujakson vikahistorian pituuden avulla. Voimapakettivikojen viitteellinen määrä olkoon 52 kpl.

$$MTBF_{voima} = \frac{0,12 \frac{\text{h}}{\text{d}} \cdot 214\,351 \text{ d}}{52} = 494,656 \dots \text{h} \approx 494,7 \text{ h}$$

Jos voimapaketin luotettavuusvaatimuksena pidetään myös 90 %, selvitetään kaavaa 1 hyödyntäen ajanhetki t , kun luotettavuus putoaa alle halutun rajan.

$$t = -MTBF_{voima} \cdot \ln R = -128,493 \dots \text{h} \cdot \ln 0,9 = 52,117 \dots \text{h} \approx 52,1 \text{ h}$$

Saatu tulos on suhteellisen pieni verrattuna operaation oletettavaan keston, josta voidaan päätellä, että vikaantumisen todennäköisyyden laskemiseksi operaation aikana KOPA-ajoneuvon moottori on syytä pitää sammutettuna aina, kun sen käytölle ei ole todellista tarvetta. Tämä on taktisestikin järkevää, sillä lämmin moottori ja pakokaasut kasvattavat ajoneuvon ympäristöönsä lähettämää infrapunasäteilyä, jonka vastustaja pystyy havaitsemaan esimerkiksi tiedustelulennokin lämpökameran avulla.

3.3.5 Johtamisjärjestelmän MTBF

Johtamisjärjestelmän kokonaiskäyttöajan voidaan olettaa olevan samanlainen sähkövoimakoneiden käyttöajan kanssa, mutta koska johtamisjärjestelmää voidaan käyttää myös akustovirralla tai ulkoisen sähkönsyötön avulla, otetaan laskennassa huomioon 5 % varmuuskerroin. Johtamisjärjestelmän vikojen viitteellisenä määränä tarkastelujaksolla olkoon yhteensä 187 kappaletta.

Johtamisjärjestelmän viitteellinen *MTBF* on siis:

$$MTBF_{JOJÄ} = \frac{1,05 \cdot 0,66 \frac{\text{h}}{\text{d}} \cdot 214\,351 \text{ d}}{187} = 794,359 \dots \text{h} \approx 794,4 \text{ h}$$

Tarkemman arvion saamiseksi laskennassa kannattaa huomioida vain kriittiset JOJÄ-laitteet, joita on vaikea korvata tai korjata. Näitä ovat tietokoneet, kytkimet, reitittimet, radiot ja antennijärjestelmä. Olkoon tällöin johtamisjärjestelmävikojen viitteellinen määrä 74 kappaletta.

Tällöin johtamisjärjestelmän viitteellinen *MTBF* on:

$$MTBF_{JOJÄ} = \frac{1,05 \cdot 0,66 \frac{\text{h}}{\text{d}} \cdot 214\,351 \text{ d}}{74} = 2007,368 \dots \text{h} \approx 2007,4 \text{ h}$$

Jos johtamisjärjestelmän luotettavuusvaatimuksena pidetään 90 %, selvitetään kaavaa 1 hyödyntäen ajanhetki t , kun luotettavuus putoaa alle halutun rajan.

$$t = -MTBF_{JOJÄ} \cdot \ln R = -2007,368 \dots \text{h} \cdot \ln 0,9 = 211,497 \dots \text{h} \approx 211,5 \text{ h}$$

Saatu tulos vastaa noin 8 päivän ja 20 tunnin jatkuvaa käyttöä. Johtamisjärjestelmän luotettavuus on tämän perusteella hyvä, ottaen huomioon, että patteristo on pääosin tarkoitus käyttää muutaman päivän mittaisissa operaatioissa. Käyttäjällä on itsellään myös kyky asentaa korvaavia JOJÄ-laitteita rikkoutuneiden tilalle, jos korvaavia laitteita on vain mahdollista saada.

3.3.6 MMBF

SAP-toiminnanohjausjärjestelmästä ei ollut saatavissa kaikista KOPA-ajoneuvoista ajantasaista ajokilometrimäärää, joten tarkastelujaksolla kertynyttä kokonaiskilometrimäärää jouduttiin arvioimaan määräaikaishuoltojen tietojen ja ajoneuvojen käyttöönottopäivien avulla.

Keskimääräiset ajokilometrit päivää kohden laskettiin kaikkien ajoneuvojen osalta ja niistä otettiin vielä keskiarvo, joksi saatiin 1,98 km / d. Tarkastelujakson vika historian pituus oli 214 351 päivään, jolloin keskimääräiseksi ajokilometrimääräksi tarkastelujaksolla tulee:

$$1,98 \frac{\text{km}}{\text{d}} \cdot 214\,351 \text{ d} = 423\,786,996 \dots \text{ km} \approx 423\,787 \text{ km}$$

Koska vikojen viitteellinen kokonaismäärä on 1 325 kpl, niin *MMBF* on:

$$MMBF_{KOPA} = \frac{423\,786,996 \dots \text{ km}}{1\,325} = 319,839 \dots \text{ km} \approx 319,8 \text{ km}$$

Saatu tulos 319,8 km on suhteellisen alhainen, mutta täytyy huomioida, että sen laskennassa otettiin huomioon kaikki tarkastelujakson aikana havaitut viat, joista iso osa ei vaikuta KOPA-ajoneuvon liikkumiskykyyn paljoa tai käytännössä ollenkaan. Kun *MMBF*-arvon tarkastelussa huomioidaan vain liikkumiskykyyn vaikuttavat viat, tulos on realistisempi. Olkoon liikkumiskykyyn vaikuttavien vikojen viitteellinen määrä 652 kpl. Tällöin *MMBF* on:

$$MMBF_{KOPA} = \frac{423\,786,996 \dots \text{ km}}{652} = 649,980 \dots \text{ km} \approx 650 \text{ km}$$

Puolustusvoimien Logistiikkaoppaan mukaan kuljetuspanssarivaunujen, kuten komentopaikkavaunujen, osalta tavallisen vikaantumisen mittalukuna voidaan pitää 5 % / 500 km (Puolustusvoimat 2014a, 139). Logistiikkaoppaan vikaantumisen mittaluvun perusteella *MMBF*:n suuruus tulisi olla:

$$MMBF_{LOG-OPAS} = \frac{500 \text{ km}}{0,05} = 10\,000 \text{ km}$$

Jos Logistiikkaoppaan mukaisen vikaantumisen mittaluvun perusteella laskettua *MMBF*-arvoa pidetään tavoitearvona, ei KOPA-ajoneuvo pääse lähellekään sitä. Suurta eroa selittää se, että Logistiikkaoppaassa vikana pidetään todennäköisesti katastrofaalista ajoneuvon siirtymiskyvyn tuhoavaa vikaa, joita sattuu harvoin ja jotka vaativat evakuoinnin järjestämistä.

3.3.7 MTTR

KOPA-ajoneuvojen vianselvittelyyn, varaosalogistiikkaan ja korjaamiseen käytettiin tarkastelujaksolla yhteensä 42 196 päivää, vikojen viitteellisen kokonaismäärän ollessa 1 325 kappaletta. Keskimääräinen palautumisaika vioittumisesta on tällöin:

$$MTTR_{KOPA} = \frac{42\,196 \text{ d}}{1\,325} = 31,846 \dots \text{ d} \approx 31,8 \text{ d}$$

KOPA-ajoneuvon viitteellinen *MTTR* on hieman suurempi kuin 155 K 98 tykillä, joka oli 26,1 päivää.

3.3.8 MTBEFF

KOPA-ajoneuvon siirtymiskyvyn keskeyttävien vikojen viitteellinen määrä olkoon 110 kpl ja johtamiskyvyn keskeyttävien vikojen viitteellinen määrä taas 105 kpl. KOPA-ajoneuvon *MTBEFF* käyttöaste huomioiden on:

$$MTBEFF_{KOPA} = \frac{214\,351 \text{ d}}{110 + 105} \cdot 0,03248 \dots = 32,381 \dots \text{ d} \approx 32,4 \text{ d}$$

155 K 98 tykillä viitteellinen *MTBEFF* on 53 päivää, joten KOPA-ajoneuvon pienempi arvo muodostaisi ongelman pitkäkestoisissa operaatioissa. Vaikka tykit kykenisivät toimimaan ilman vakavia toiminnan keskeytyksiä pitkään, se ei auta, jos niiden tulitoimintaa johtava KOPA-ajoneuvo vikaantuu ennen niitä, eikä ole enää välttämättä toimintakykyinen.

3.4 Vikaantumisen yhteenveto

Kun vertaillaan 155 K 98 tykin ja KOPA-ajoneuvon viitteellisestä vikaantumisanalyysistä saatuja arvoja, nousee esille erot *MTBEFF*- ja *MMBF*-arvoissa. Voidaan siis sanoa, että annetuilla arvoilla tykki pystyy toimimaan ajallisesti pidempään ilman toiminnan keskeyttäviä vikoja kuin KOPA-ajoneuvo, kun taas KOPA-ajoneuvo puolestaan pystyy siirtymään jonkin verran pidempiä matkoja kuin 155 K 98 ilman siirtymiskykyyn vaikuttavia vikoja.

Taulukkoon 15 on kerätty vikaantumisen analysoinnin tulokset.

TAULUKKO 15. Viitteellisen vika-analyysin koontitaulukko

	155 K 98	KOPA-ajoneuvo
<i>MTBF</i>	530 h	126 h
<i>MTBEFF</i>	1 272 h	777 h
<i>MMBF</i>	401 km	650 km
<i>MTTR</i>	626 h	764 h
<i>MTBF_{voimapaketti}</i>	395 h	495 h
<i>MRBF</i>	150 ls	-
<i>MTBF_{SVK}</i>	-	1199 h

Vikaantumisen perusteella kehitysehdotuksina voi antaa seuraavia seikkoja:

- Tykin hydraulikkajärjestelmä alkaa ikääntyä, jolloin liitinrikköjen ja letkuvuotojen todennäköisyys kasvaa, joten vähintäänkin on varauduttava yleisimpien liittimien vaihtamiseen ja uusien letkulinjojen valmistamiseen rikkoutuneiden tilalle kenttäolosuhteissa.
- Tykkiryhmiä pitää harjaannuttaa enemmän toimimaan ilman tykin hydraulisia avustimia, kuten lataamaan tykki käsin ilman latauslaitetta sekä käyttämään tykin käsipumppua ja hydraulikan varaohjausjärjestelmää, jos voimapakettiin tai hydraulipumppuihin tulee vika
- Niin tykeissä kuin KOPA-ajoneuvossa pitää varautua akkujen rikkoutumiseen. Tykkien sähköjärjestelmään voidaan hätätilanteessa syöttää virtaa kuorma-autojen akustosta, kunhan mukana on ns. NATO-kaapelit.
- On varauduttava hankkimaan varavoimakone, jos KOPA-ajoneuvon oma kiinteä sähkövoimakone vikaantuu operaation aikana

4 SOTILAALLISEN TOIMINNAN ASETTAMAT VAATIMUKSET

4.1 Tykistöpatteriston käyttöhuolto ja kunnossapito

Luotettavuuden analysoinnin yhtenä osana on tutkia, kuinka hyvin vikaantunut järjestelmä saadaan palautettua takaisin toimintakykyiseksi. Tätä mittaa suure *MTTR*, eli keskimääräinen toipumisaika vikaantumisesta.

Tykistöpatteriston osalta analysoinnin haasteeksi tulee se, että rauhanajan ja poikkeusolojen kunnossapitotoiminta ovat oletettavasti hyvin erilaista. Kirjallisuuskatsauksen avulla saa näkymän siihen, miten poikkeusolojen kunnossapitojärjestelmä on ajateltu toteuttavan Puolustusvoimissa.

Käyttö- ja kenttähuolto on taistelevien joukkojen omilla resursseilla toteuttamaa huoltotoimintaa. Se painottuu sotavarusteiden ennaltaehkäisevään huoltoon ja nopeisiin vikakorjauksiin, jonka tavoitteena on varmistaa ja ylläpitää materiaalin käytettävyyttä joukon omilla välineillä ja osaamisella mahdollisimman lähellä käyttäjää. (Puolustusvoimat 2015a, 34.)

Kunnossapitojärjestelmä on kaksitasoinen. Kunnossapitotaso 1 painottuu sotavarusteiden ennaltaehkäisevään huoltoon ja nopeisiin vikakorjauksiin. Sotavarusteet pyritään säilyttämään käyttökunnossa omilla välineillä ja osaamisella mahdollisimman lähellä käyttäjää. Tyypillisesti taso 1:n toimenpiteet, korjaukset, tarkastukset ja huollot kestävät alle kuusi tuntia ja ovat tarkastuksia, huoltoja ja varaosien vaihtoja. KUPI-taso 1:n tärkein tehtävä on vianmääritys ja korjaukset välineen palauttamiseksi käyttökuntoisena operatiiviselle käyttäjälle. Kunnossapitotaso 2 on teollisuustason vian tunnistamis- ja korjauskykyä sekä perushuoltoja. Kunnossapitotaso 2:n toimija tuottaa kunnossapitovastuulleen kuuluvista järjestelmistä ja laitteista kunnossapidon tilannekuvan. Kunnossapitotaso 2:n toimija tuottaa kunnossapitotaso 1:n tarvitsemat varaosat, vaihtolaitteet ja komponenttien materiaali- ja palvelut. KUPI-tasolla 2 tuetaan tason 1 kunnossapitoa antamalla asiantuntijaneuvontaa, dokumentaatiota, työkaluja, koulutusta sekä osoittamalla korjauspartioita ja varaosia. (Puolustusvoimat 2014b, 92.)

Raskaat aseet on mahdollisuuksien mukaan korjattava tuliasemissa oman huoltopatterin tai kunnossapitokompanian liikkuvien korjausryhmien toimesta. Jos korjaus tuliasemissa ei ole mahdollista, raskaat aseet evakuoidaan logistiikka-rykmenttiin tai niiden kautta teollisuuteen. (Puolustusvoimat 2014b, 93.)

Tykistöpatteriston henkilöstön kyky korjata vaurioituneita järjestelmän osia on rajallinen. Asehuoltohenkilöstö pystyy tekemään korjauksia lähinnä varaosia vaihtamalla (Puolustusvoimat 2000, 34).

Tykistöpatteriston esikunta- ja huoltopatterissa on yhdeksän sotilaan vahvuinen kunnossapitoryhmä, jonka tehtäviin kuuluu ase-, mittausväline-, elektroniikka-, kuljetusväline- ja viestilaitteiden korjaus sekä kunnossapito. Lisäksi tulipattereissa on viisihenkiset omat täydennys- ja kunnossapitoryhmät, joiden tehtäväkenttä on vastaavanlainen. (Puolustusvoimat 2019, 71 – 72, 81.)

Puolustusvoimien eri oppaissa korostuu, että joukon tulisi omin toimenpitein pystyä ehkäisemään vikoja ja suorittamaan yksinkertaisia vikakorjauksia maasto-olosuhteissa. Tyypillinen korjaustoimenpide on esimerkiksi varaosien vaihtorikkoontuneiden komponenttien tilalle. Patteriston järjestelmien korjaustarpeeseen vaikuttaa niiden oma luontainen vikaantuminen, kuin myös taistelujen aiheuttamien vaurioiden vaikutus. Tässä työssä taisteluvaurioiden vaikutus patteriston järjestelmien luotettavuuteen jätetään huomiotta, sillä niiden vaikutus riippuu paljon sattumasta ja siitä millaisissa taisteluolosuhteissa toimitaan.

Taulukossa 16 on esitetty nelikenttäanalyysi patteriston kunnossapidosta.

TAULUKKO 16. Tykistöpatteriston kunnossapidon nelikenttäanalyysi

	Positiiviset	Negatiiviset
Sisäiset asiat	Onnistuneilla henkilöstövalinnoilla KUPI-ryhmä kykenee ylläpitämään patteriston suorituskykyä	Epäonnistuneilla henkilöstövalinnoilla KUPI-ryhmä ei juurikaan tuo lisäarvoa patteriston suorituskyvylle
	Patteriston muihin tehtäviin sijoitetuista henkilöistä voi löytyä lisää kunnossapidon ammattilaisia	Kunnossapitoryhmä on suhteellisen pieni, tappionsietokyky heikko
	Välineet ja koulutus mahdollistavat tykkien yleisimpien vikojen korjauksen	Ei kykyä eikä välineitä vaativiin korjauksiin
Ulkoiset asiat	Strategiset kumppaniyhteydet tukevat vaativassa korjaustoiminnassa	Erikoisvaraosien ja kunnossapitotuen saatavuusongelmat poikkeusoloissa
	Vaikeasti korjattavat tykit voidaan evakuoida strategisen kumppanin korjattavaksi	Korjaukseen menevien tykkien evakuointivaikkeudet poikkeusoloissa
	Strategisen kumppaniyhteyden korkea kunnossapidon osaamistaso	Strategisen kumppanin tykkeihin erikoistuneen kunnossapitohenkilöstön riittävyys

Jos luotettavuusanalyysin tulokset ovat hankalia soveltaa operaatiosuunnittelussa tai kunnossapidon suunnittelun halutaan olevan yksinkertaista ja nopeaa, voidaan käyttää taulukon 17 mukaisia tappioprosentteja määrittäessä patteriston evakuointi- ja korjaustarvetta:

Taulukko 17. Asetappiot joukkoyksikön aseiden kokonaismäärästä vuorokaudessa (Puolustusvoimat 2014a, 138).

TAISTELUN LUONNE	TAPPIOPROSENTTI/ KÄSIASEET	TAPPIOPROSENTTI/ RASKAAT ASEET
Irti taisteluista	alle 1,0	alle 1,0
Selustassa	alle 1,0	alle 1,0
Marssi	alle 1,0	alle 1,0
Kevyt taistelu (vastustajan kuluttamis- ja hidastamistehtävä sivusuunnassa tai reservitehtävä)	alle 1,0	alle 1,0
Keskimääräinen taistelu (vastustajan kuluttamis- ja hidastamistehtävä tai torjuminen ja alueen pitämistehtävä sivusuunnassa)	1,0–2,0	1,0–3,0
Kiivas taistelu (vastustajan torjuminen ja alueen pitämistehtävä, hyökkäys)	2,0–3,0	3,0–5,0

On hankala määritellä, mikä on vähäinen, keskimääräinen tai kiivas taistelu, sillä se riippuu niin paljon perspektiivistä. Jos esimerkiksi pataljoonan yhden komppanian yksi joukkue suorittaa vastustajan kuluttamistehtävää, taistelu voi olla kyseisen joukkueen näkökulmasta kiivas. Pataljoonan näkökulmasta, joka sisältää useita joukkueita eri komppanioista, taistelu on voinut olla kevyt.

Tykistöpatteriston yhtenä tärkeimmistä tehtävistä on tukea prikaatin hyökkäystä. Jos hyökkäys kestää esimerkiksi neljä päivää, taulukon 17 mukaan patteriston raskaiden aseiden, eli tykkien, tappioprosentti on silloin 12,0 – 20,0 %. Neljän päivän taisteluiden aikana voi siis tuhoutua tai vaurioitua pahasti 2 – 4 tykkiä. Jos taas patteristo on irti taistelusta tai suorittamassa esimerkiksi marssia, tappioprosentti on alle 1 %. Jos tappioprosentti selustassa on esimerkiksi 0,8 % ja patteristo valmistelelee selustassa toimintaansa 7 päivän ajan, sinä aikana voi yksi patteriston tykki vaurioitua pahasti jostain syystä.

4.2 Tulen vaikutus ja pienin sallittu tulenantokyky

Eräs tapa määritellä patteriston suorituskyvyn raja-arvoja, on selvittää tulen vaikutuksen laskennalla, mikä on pienin määrä ampuvia tykkejä, joilla tulitehtävä saadaan vielä toteutettua. Minimitykkimäärään vaikuttaa niin haluttu vaikutus maalissa, vastustajan suojautumistaso, ampumaetäisyys, käytettävä ampumatarvike, maalin pinta-ala ja muut ballistisen ja topografisen valmistelun seikat.

Laskennan helpottamiseksi on laadittu tulen vaikutuksen laskennan kaava 14, joilla voidaan muutaman muuttujan avulla arvioida vastustajan tappioprosenttia. Jos taas tiedetään haluttu kohteen tappioprosentti, voidaan kaavan 14 avulla määrittää myös monellako ampuvalla aseella ja monellako laukauksella tulitehtävä saadaan vielä tyydyttävästi suoritettua.

Tykistön ampumaopin käsikirjan (Puolustusvoimat 2014c, 104) mukaan tulen vaikutus pehmeisiin ja puolikoviin maaleihin voidaan laskea kaavan 14 avulla seuraavasti:

$$P = 1 - e^{-\frac{a}{A} \cdot n \cdot p}, \quad (14)$$

Jossa P on tappioprosentti, a on yhden ammuksen vaikutusala neliömetreinä, A on maalin pinta-ala neliömetreinä, n on ammusten määrä ja p on osumatodennäköisyys alueelle A .

Jos tiedetään haluttu vaikutus, esimerkiksi vastustajan lamauttaminen tai tuhoaminen, sanallinen kuvaus pitää laskentaa varten muuttaa numeeriseksi arvoksi. Taulukossa 18 on esitetty sanallisia kuvauksia vastaavat tappioprosentit mukaillen Maanpuolustuskorkeakoulun Sotatekniikan laitoksen (2007) laatiman Tulen vaikutus ja teho- opetusmonisteen ja Mika Hyytiäisen (1999) kirjoittaman Passiivisen suojan konsepti- artikkelin sisältämiä sanallisia kuvauksia.

TAULUKKO 18: Tappioprosenttien sanalliset kuvaukset (Maanpuolustuskorkeakoulu 2007, 4 & Hyytiäinen 1999, 60, muokattu)

Haluttu vaikutus	Tappioprosentti	Sanallinen kuvaus
Hävittää	> 90 %	Yksittäismaalin totaalinen tuhoaminen.
Tuhota	> 50 %	Maali menettää taistelukykyä. Kohteen elävä voima sekä sen taisteluvälineet, kalusto ja linnoitteet tuhoutuvat.
Lamauttaa	20 - 50 %	Maali menettää tilapäisesti toimintakykyä. Lamauttava vaikutus estää tai tuntuvasti vaikeuttaa vastustajan elävän voiman toimintaa.
Häiritä	1 - 20 %	Häiritsevä vaikutus vaikeuttaa vihollisen tulitoimintaa, liikkumista, lepoa ja johtamista.

Epäsuorantulen ammunnoissa pitää huomioida ammusten pituus- ja sivuhajonta maalialueella. Tykistöaseiden iskemien hajontaan maalialueella vaikuttavat monet tekijät, kuten ase- ja ammusyhdistelmien lähtönopeuserot, topografisen valmistelun ja aseiden suuntauksen tarkkuus, ammusten ulkoballististen ominaisuuksien pieni vaihtelu sekä ilmastolliset tekijät kuten ilmanpaine ja tuulen suunta sekä voimakkuus. Tykistöammunnoissa hajonnan mittana käytetään todennäköistä poikkeamaa, joka on suuruudeltaan sellainen, että 50 % tapauksista poikkeaa sitä vähemmän. Siinä missä keskihajonta kuvaa jakaumaan kuuluvan havainnon keskimääräistä poikkeamaa keskiarvosta, todennäköinen poikkeama ilmaisee havainnon arvon todennäköisyyttä. (Puolustusvoimat 2014c, 26.) Kaavan 15 avulla saadaan laskettua todennäköinen poikkeama:

$$r = 0,675 \cdot s, \quad (15)$$

jossa r on todennäköinen poikkeama ja s on otoksen keskihajonta.

Vaikutusta ampuessa pyritään mahdollisimman suureen tulinopeuteen, mutta on huomioitava, että liian pitkään suurella tulinopeudella ampuminen kuluttaa tykin tuliputken pilalle. 155 K 98-tykin käyttöohjeen (Patria 2008, 9) teknisten tietojen osuudessa on mainittu seuraavat tulinopeudet:

- Suurin: 10 ls / min
- Jatkuva: 2 ls / min
- Jatkuva 5 min: 6 ls / min
- Ryöppy: 3 ls / 12 s

Tykki periaatteessa kykenisi siis osaavalla miehistöllä ampumaan koko 60 laukauksen tuliannoksensa noin 6 minuutissa. Tuliputken kulumisen minimoimiseksi eri aseille on määritelty suurimmat sallitut tulinopeudet. Tulenjohtotoiminnan käsikirjassa (Puolustusvoimat. 2015c, 22) on esitetty taulukon 19 mukaiset suurimmat sallitut tulinopeudet 155 K 83-97 ja 155 K 98 tykkikalustolle.

TAULUKKO 19. Suurin sallittu tulinopeus 155 K – tykkikalustolle (Puolustusvoimat. 2015c, 22, muokattu)

AMMUNNAN KESTO	155 K
0–1 MIN	is (6 ls)
1–2 MIN	is
2–3 MIN	is
3–4 MIN	T A U K O
4–5 MIN	is
5–7 MIN	T A U K O
7–8 MIN	is
8–9 MIN	T A U K O
9–10 MIN	is

Putken liiallisen kulumisen välttämiseksi ammuntaa ei saa jatkaa maksiminopeudella 10 minuutin yhtäjaksoisen ammunnan jälkeen. Mikäli yhtäjaksoinen ammunta kestää yli 10 minuuttia, ammunta on rytmittävä siten, että ampumatarvikkeiden kulutus on tämän jälkeen korkeintaan 0,1 tuliannosta 5 minuutissa (Puolustusvoimat. 2015c, 22).

Kun taulukon 19 tietojen perusteella lasketaan 155 K 98 tykin suurin sallittu tulinopeus tauot mukaan lukien, saadaan laukauksia minuuttia kohden:

$$R_f = \frac{6 \cdot 6 \text{ ls}}{10 \text{ min}} = 3,6 \frac{\text{ls}}{\text{min}}$$

Liitteessä 3 on esimerkki pienimmän sallitun tulenantokyvyn laskennasta, kun tavoitteena on lamauttaa vastustajan komentopaikka 20 000 metrin ampumaetäisyydellä.

4.3 Toiminnallisen vikaantumisen perusteella laskettu toiminta-aika

Jotta voidaan arvioida jonkin järjestelmän luotettavuutta, pitää määrittää kuinka pitkään sen on säilyttävä toimintakykyisenä toteuttaakseen tehtävänsä hyväksyttävästi. Koska tykistöpatteriston järjestelmäkokonaisuus ei ole automaattinen, vaan taisteluissa sitä käyttävät sotilaat, järjestelmän maksimimaalinen toiminta-aika on sidoksissa sen käyttäjien toimintakykyyn.

Sotilaan käsikirja määrittää varusmiesten osaamisen ja toimintakyvyn kehittämisen tavoitteen olevan, että he kykenevät joukkonsa mukana täyttämään taistelutehtävänsä vähintään kahden viikon ajan jatkuvassa taistelukosketuksessa sekä käyttämään kaikki voimavaransa yhtämittaisesti 3 – 4 vuorokautta kestäväen vaatimaan ratkaisutaisteluun. (Puolustusvoimat 2022b, 11)

Näin ollen taisteluolosuhteissa tykistöpatteriston ase- ja johtamisjärjestelmän tulee kyetä toimimaan luotettavasti ja suorittamaan taistelutehtävänsä minimissään 3 vuorokautta ja maksimissaan 14 vuorokautta ennen mahdollisuutta huoltoon ja toimintakyvyn palautukseen.

Jos tykistöpatteriston luotettavuutta arvioidaan pelkästään toiminta-ajan perusteella, kannattaa arvioinnissa käyttää *MTBEFF*-suuretta, sillä siinä on huomioitu keskeyttömän toiminnan kannalta kriittiset viat.

Taulukon 18 mukaan 50 % tappioilla joukko on kyvytön jatkamaa taistelutoimia. Kyseinen tappioprosentti tarkoittaa henkilöstötappioita, mutta sovelletaan sitä tässä myös kalustotappioihin. Näin ollen, jos puolet tykistöpatteriston aseista on toiminnallisesti vikaantuneita, patteristo on menettänyt taistelukykynsä.

Hyödyntäen 155 K 98 tykin *MTBEFF*-arvoa ja kaavoja 6 sekä 12, voidaan selvittää, kuinka paljon kuluu aikaa siihen, että 50 % tykeistä on toiminnallisesti vikaantuneita. Kaavaan sijoitettavat arvot: *MTBEFF*:n viitteellinen arvo 53 d, N on 18 tykkiä ja N_f vastaa 50 % vikaantumista, eli 9 tykkiä.

$$t = -MTBEFF_{155K98} \cdot \ln \frac{N - N_f}{N} = -53 \text{ d} \cdot \ln \frac{18 - 9}{18}$$

$$t = 36,736 \dots \text{ d} \approx 36,7 \text{ d}$$

Saatu tulos noin 37 päivää vastaa todella hyvin Sotilaan käsikirjassa esitettyyn vaatimukseen, jonka mukaan joukon on kyettävä täyttämään tehtävänsä 14 päivän jatkuvassa taistelussa. Tykkien toiminnallinen vikaantuminen, siis ilman vihollisen aiheuttamaa tuho vaikutusta, ei tässä tarkastelussa aiheuta 14 päivän aikana patteriston suorituskyvyn heikkenemistä sille tasolle, että se luettaisiin kyvyttömäksi jatkamaan taistelutoimiaan.

Kenttätykistön käsikirjan mukaan tarvittaessa tulipatteri voi johtaa patteriston toimintaa ja johtaa samalla omaa tulipatteriaan (Puolustusvoimat 2019, 98). Jos tarvittavat viestiyhteydet vain pystytään muodostamaan, patteriston toiminnan kannalta vähimmäismäärä toimivia KOPA-ajoneuvoja on siis yksi kappale. Selvitetään viitteellisen $MTBEFF_{KOPA}$ -arvon perusteella, kuinka paljon aikaa kuluu siihen, että vikojen takia jäljellä on enää yksi toimiva KOPA-ajoneuvo:

$$t = -MTBEFF_{KOPA} \cdot \ln \frac{N - N_f}{N} = -32,4 \text{ d} \cdot \ln \frac{4 - 3}{4} = 44,915 \dots \text{ d} \approx 44,9 \text{ d}$$

Toiminnallisen vikaantumisen perusteella suurimman riskin patteristolle muodostaa 155 K 98 tykkien vikaantuminen. Tykkien vikaantuminen mahdollistaisi riittävän toimintakyvyn noin 37 päiväksi, kun taas KOPA-ajoneuvojen toimintakyky putoaa riittämättömäksi vasta noin 45 päivässä.

4.4 Esimerkki patteriston luotettavuusanalyysistä

Patteriston ensimmäisen tehtävän vaatimuksia kartoitettiin seuraavasti:

- Mikä on toiminta-alueelle siirtymiseksi suoritettavan moottorimarssin arvioitu pituus kilometreinä ja kuinka paljon siihen on varattu aikaa?
- Mikä on arvioitu valmisteluajan pituus ennen ensimmäistä taistelua?
- Mikä on arvioitu asemienvaihtojen tiheys ja ammuskulutus päivässä?
- Kuinka monta päivää patteriston on arvioitu olevan taistelussa, ennen kuin on ryhdyttävä toimintakyvyn palauttamiseen?

Vastaukset kysymyksiin ja niiden avulla laadittu luotettavuusanalyysi on liitteessä 4, joka löytyy vain opinnäytetyön Puolustusvoimille luovutettavasta versiosta.

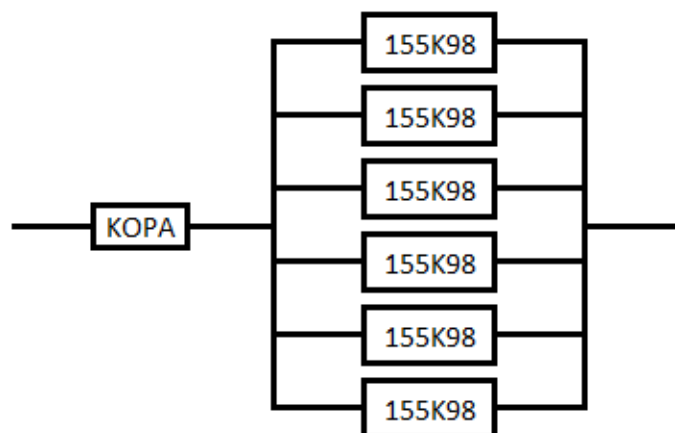
Luotettavuuslaskennan esimerkki viitteellisellä tehtäväprofiililla ja viitteellisillä vikaantumisarvoilla sisältää seuraavat lähtöarvot:

- Moottorimarssi operaatioalueelle 150 km, suoritetaan 1 päivän aikana
- Valmistelu-aika 5 päivää ennen taisteluiden alkua
- Ensimmäisenä taistelupäivänä patteristo ampuu 0,5 tuliannosta ja tekee yhden 10 km pituisen asemanvaihdon
- Taistelupäivinä 2 – 4 ammutaan joka päivä 1,0 tuliannosta ja tehdään 4 asemanvaihtoa, kukin pituudeltaan 8 km
- KOPA-ajoneuvon viitteelliset vikaantumistiedot: *MMBF* on 650 km, sähkövoimakoneen *MTBF* on 1200 h, voimapakettin *MTBF* on 500 h ja johtamisjärjestelmän *MTBF* on 2000 h.
- 155 K 98 tykin viitteelliset vikaantumistiedot: *MMBF* on 400 km, *MRBF* on 150 ls ja apuvoimalaitteen *MTBF* on 400 h.

Otetaan esimerkissä tarkasteluun yksi tulipatteri, sillä se on pienin osa patteristosta, jota voidaan käyttää erillisessä tehtävässä. Laskentaa varten oletetaan, että KOPA-ajoneuvon sähkövoimakone, johtamisjärjestelmä, voimapaketti sekä muut siirtymiskykyyn vaikuttavat osat ovat luotettavuusteknisesti sarjaan kytkettyjä toisiinsa nähden. Myös tykin aseosan, apuvoimalaitteen ja siirtymiskykyyn vaikuttavat osat ovat sarjaan kytkettyjä.

Kun yhtä tulipatteria käsitellään luotettavuusteknisenä järjestelmänä, tykit ovat toisiinsa nähden rinnan kytkettyjä ja KOPA-ajoneuvo tykkeihin nähden sarjaan kytketty. Tämä siksi, että tykit voivat ampua toisistaan riippumatta, mutta jos KOPA-ajoneuvo vikaantuu kriittisesti, eivät tulikomennot välity tykeille.

Luotettavuustekninen kytkentä on esitetty kuviossa 10.



KUVIO 10. Tulipatterin luotettavuustekninen kytkentä

Tulipatterin luotettavuus marssin aikana lasketaan käyttäen hyväksi KOPA-ajoneuvon ja 155 K 98 tykin $MMBF$ -arvoja, sekä hyödyntäen sähkövoimakoneen, voimapaketin, johtamisjärjestelmän sekä apuvoimalaitteen $MTBF$ -arvoja. Marssin luotettavuudessa huomioidaan varsinainen siirtymämatka, kuin myös marssipäivän aikainen johtamistoiminta ja marssin jälkeen tapahtuva akkujen lataus dieselmootoreiden avulla. Esimerkiksi KOPA-ajoneuvon luotettavuus marssipäivän aikana lasketaan seuraavasti hyödyntäen kaavoja 1 ja 6:

$$R_{KOPA\ marssi} = e^{-\frac{l}{MMBF}} \cdot e^{-\frac{t}{MTBF_{SVK}}} \cdot e^{-\frac{t}{MTBF_{voima}}} \cdot e^{-\frac{t}{MTBF_{JOJÄ}}}$$

$$R_{KOPA\ marssi} = e^{-\frac{150\ km}{650\ km}} \cdot e^{-\frac{6\ h}{1200\ h}} \cdot e^{-\frac{2\ h}{500\ h}} \cdot e^{-\frac{24\ h}{2000\ h}} = 0,7774 \dots \approx 77,7\ %$$

Valmistelupäivien luotettavuus lasketaan sillä perusteella, että tykin apuvoimalaitteella ladataan akkuja 3 h päivässä, KOPA-ajoneuvon alusta-akkuja ladataan voimapaketin avulla 2 h ja laiteakkuja sähkövoimakoneen avulla 6 h päivässä. Lisäksi johtamisjärjestelmä pidetään toiminnassa kellon ympäri. Esimerkiksi KOPA-ajoneuvon luotettavuus viiden päivän mittaisena valmisteluajana on:

$$R_{KOPA\ valmistelu} = e^{-\frac{t}{MTBF_{SVK}}} \cdot e^{-\frac{t}{MTBF_{voima}}} \cdot e^{-\frac{t}{MTBF_{JOJÄ}}}$$

$$R_{KOPA\ valmistelu} = e^{-\frac{5 \cdot 6\ h}{1200\ h}} \cdot e^{-\frac{5 \cdot 2\ h}{500\ h}} \cdot e^{-\frac{5 \cdot 24\ h}{2000\ h}} = 0,9003 \dots \approx 90,0\ %$$

Ensimmäisenä taistelupäivänä patteristo ajaa aseisiin 10 km etäisyydelle valmiusasemasta. KOPA-ajoneuvo pitää sähkövoimakoneensa käynnissä koko päivän, kuin myös johtamisjärjestelmänsä, sekä voimapakettia käytetään 2 h laiteakkujen lataamiseen. 155 K 98 tykki käyttää apuvoimalaitettansa 2 h akkujen lataamiseen sekä ampuu ensimmäisenä taistelupäivänä 30 laukausta. Esimerkiksi yhden 155 K 98 tykin luotettavuus lasketaan seuraavasti:

$$R_{155K98\ tst} = e^{-\frac{l}{MMBF}} \cdot e^{-\frac{rd}{MRBF}} \cdot e^{-\frac{t}{MTBF_{apuvoima}}}$$

$$R_{155K98\ tst} = e^{-\frac{10\ km}{400\ km}} \cdot e^{-\frac{30\ ls}{150\ ls}} \cdot e^{-\frac{2\ h}{400\ h}} = 0,7945 \dots \approx 79,5\ %$$

Taistelupäivien 2 – 4 luotettavuudet lasketaan vastaavalla tavalla, laskukaavoissa muutetaan vain ammuttavien laukausten ja asemanvaihtoihin käytettävien siirtymien pituus.

Kun on saatu selville päiväkohtaiset luotettavuusarvot, voidaan selvittää vikaantuneiden laitteiden määrä päivää kohden. Yhdistämällä kaavat 1 ja 12, saadaan laskettua vikaantuneiden laitteiden määrä kaavan 16 avulla:

$$N_f = N - N \cdot R, \quad (16)$$

jossa N_f on tehtävän aikana vikaantuneiden laitteiden määrä, N on laitteiden kokonaismäärä ja R on toimintavarmuus.

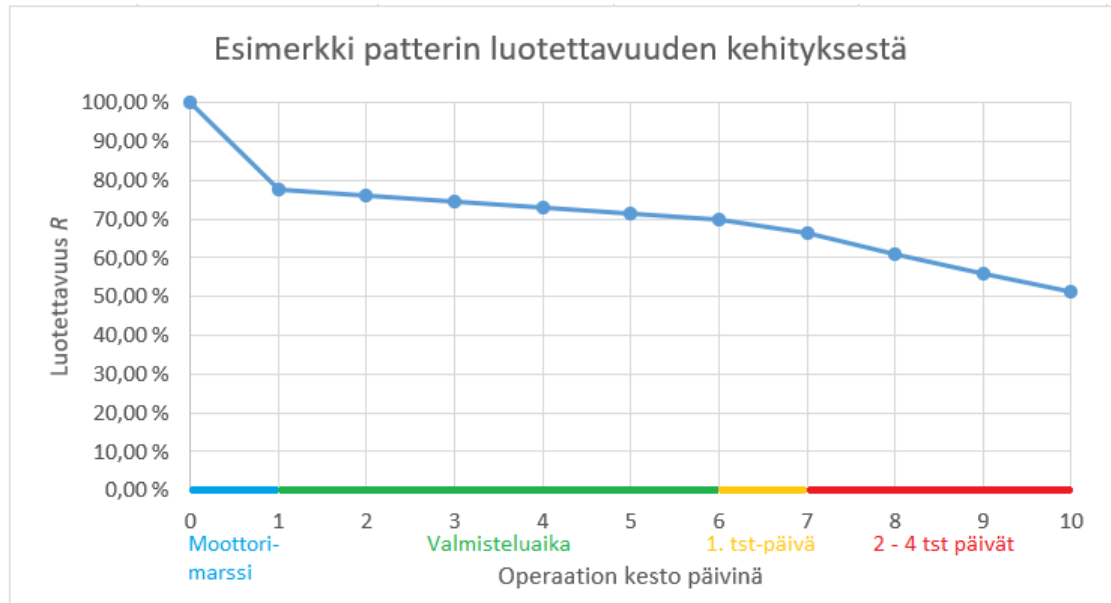
Esimerkin lähtöarvojen perusteella yhden tykin marssin jälkeiseksi toimintavarmuudeksi R saadaan kaavan 1 avulla 68,21 %. Koska tulipatterissa on 6 tykkiä, N on silloin 6. Sijoitetaan arvot kaavaan, jolloin saadaan moottorimarssilla toiminnallisesti vikaantuneiksi tykkien N_f määräksi:

$$N_f = 6 - 6 \cdot 0,6821 = 1,907 \dots \rightarrow 1 \text{ vikaantunut tykki}$$

Kun päiväkohtaiset vikaantuneiden laitteiden määrät summataan kumulatiivisesti, saadaan arvio sille, kuinka moni laite vikaantuu mihinkin päivään mennessä. Kun patterin luotettavuus ja vikaantuneiden laitteiden määrät lasketaan huomioiden lähtöarvot sekä patterin luotettavuustekniset kytkennät, saadaan taulukon 20 mukaiset tulokset. Graafisesti luotettavuus on esitetty kuviossa 11.

TAULUKKO 20. Esimerkki patterin luotettavuuden kehityksestä

Esimerkkilaskun mukainen tulipatterin luotettavuus ja vikaantuneiden laitteiden määrä					
		KOPA vikaprocentti	KOPA vikaantuneet kpl	155 K 98 vikaprocentti	155 K 98 vikaantuneet kpl
R_{alku}	100,00 %	0,00 %	0	0,00 %	0
R_{marssi}	77,67 %	22,26 %	0	31,8 %	1
$R_{1 \text{ valmistelu}}$	76,06 %	23,87 %	0	32,3 %	1
$R_{2 \text{ valmistelu}}$	74,48 %	25,46 %	0	32,8 %	1
$R_{3 \text{ valmistelu}}$	72,93 %	27,00 %	0	33,3 %	2
$R_{4 \text{ valmistelu}}$	71,41 %	28,52 %	0	33,8 %	2
$R_{5 \text{ valmistelu}}$	69,93 %	30,01 %	0	34,3 %	2
$R_{1 \text{ tst}}$	66,42 %	33,51 %	0	47,8 %	2
$R_{2 \text{ tst}}$	60,92 %	38,94 %	0	68,0 %	4
$R_{3 \text{ tst}}$	55,87 %	43,93 %	0	80,4 %	4
$R_{4 \text{ tst}}$	51,24 %	48,51 %	0	88,0 %	5



KUVIO 11. Esimerkki patterin luotettavuuden kehityksestä graafisesti

Esimerkissä oletuksena oli, että patterin kalusto on alussa hyvässä kunnossa, jolloin luotettavuus on 100 %. Kuviosta 11 nähdään, että marssi kuluttaa patterin luotettavuutta jyrkästi ja taulukosta 20 selviää, että marssilla vikaantuu ainakin 1 tykki. Valmisteluaikana kaluston käyttö on vähäistä, jolloin luotettavuus laskee hitaasti, mutta sinäkin aikana vikaantuu yksi tykki lisää. Ensimmäinen taistelupäivä ei vielä aiheuta uusia vikaantumisia, vaikka luotettavuus laskeekin. Taistelupäivät 2 – 4 laskevat luotettavuutta jyrkemmin, jolloin 4. päivänä tulipatterin luotettavuus on vain 51,24 %. Taulukon 3 mukaan tulipatteri pystyisi vain mahdollisesti suoriutumaan tehtävistään. Päätelmää tukee myös vikaantuneiden tykkien määrä, jolloin 4. päivänä jäljellä on vain yksi vikaantumaton tykki.

Koska vikaantuminen on merkittävilta osin satunnaisilmiö, ei voida suurella varmuudella sanoa, mitä tykeissä tarkkaan vikaantuu tai kuinka vakavia viat ovat. Tykkien ikääntymisen perusteella voidaan arvioida, että todennäköisimpiä vikoja ovat sähköjärjestelmän viat sekä hydraulikkajärjestelmän vuodot. KOPA-ajoneuvo taas näyttää pysyvän esimerkin tarkastelujaksolla toimintakykyisenä, vaikka sen vikaantumisprosentti läheneekin lopussa jo 50 prosenttia.

Edellä esitetty analyysi perustuu siis viitteelliseen tehtäväprofiliin ja viitteellisiin vikaantumisen lähtöarvoihin toimien laskuesimerkkinä, erillisessä liitteessä on Puolustusvoimille luovutettava varsinainen luotettavuusanalyysi todellisilla arvoilla.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tykistö patteriston 155 K 98 tykeistä ja komentopanssariajoneuvoista tunnistettiin toiminnan kannalta kriittisiksi laitekokonaisuuksiksi seuraavat:

- Tykin latauslaite
- Tykin hydraulikkajärjestelmän letkut, liittimet, sylinterien tiivisteet sekä hydraulikan ohjausjärjestelmä
- Tykin akusto
- KOPA-ajoneuvon sähkövoimakone, akusto, laturit ja invertterit
- KOPA-ajoneuvon jousitus, jarrut ja pyörännapojen tiivisteet
- KOPA-ajoneuvon antennit
- KOPA-ajoneuvon moottori
- KOPA-ajoneuvon vaihteisto

155 K 98 tykkien toimintakykyyn vaikuttaa eniten hydraulikkajärjestelmän ja akuston vikaantuminen, sillä niiden viat vaikuttavat suoraan tykin käsittelyyn ja tärkeiden laitteiden, kuten paikannus- ja suuntausjärjestelmän, toimintaan.

Komentopanssariajoneuvon toimintakykyä voivat heikentää erityisesti sähkövoimakoneen, akuston sekä laturien viat.

Tykkien hydraulikan kenttäkorjausta varten patteriston varusteisiin tulisi hankkia varaletkuja ja kierrettäviä liittimiä, jolla voidaan maasto-olosuhteissa ilman erikoistyökaluja korvata vuotavia letkuyhteyksiä ja yksittäisiä letkuliittimiä. Muualta kuin letkun päästä vioittuneiden letkujen hätäkorjaukseen sopii vikakohtaan puristettavat jatkopalat, kuten kuvassa 2 oleva Hose Patchin valmistama tuote.



KUVA 2. Hosepatch-letkukorjaussarja (Rokris International 2021, muokattu)

Koska komentopanssariajoneuvon sähkönsaanti on johtamiskyvyn kannalta olennaista, sähköntuotannon varmistamiseksi patteristolla pitäisi olla mukanaan kaksi kappaletta perävaunuasenteisia varavoimakoneita. Kahdella varavoimakoneella saavutetaan 90 % varmuus johtamisjärjestelmän sähkönsyötölle 10 päivän jatkuvan käytön ajaksi, jos sähkövoimakoneisiin tulisi sinä aikana vakavia vikoja.

Tällä hetkellä patteriston kyky korjata kriittisten laitteiden vikoja on rajallinen, sillä tykkien hydraulikkajärjestelmän varaosia on varusteissa melko vähän, vara-akkuja ei kuulu varustekokoonpanoon ja KOPA-ajoneuvon sähköjärjestelmän korjaamisessa ei kyetä kuin hätäkorjauksiin.

Tykkiryhmiä tulee harjoittaa aseiden manuaaliseen lataamiseen, sillä kiivaan tulitoiminnan aikana latauslaite voi vikaantua. Tykin muusta vikaantumisesta voidaan päätellä, että varsinkin hydraulijärjestelmä on alkanut vanhentua, jolloin öljyvuodot ovat lisääntyneet. Kun tykeille ollaan tekemässä suurempia huoltoja, tulisi ainakin tärkeimmät hydraulikkakomponentit uusia.

Lisäksi melko monet letkurikot ja sähkökomponenttien viat viittaavat siihen, että tykkiryhmät eivät ole riittävän harjaantuneita tykin käsittelyssä. Koulutuksessa tulisi pyrkiä siihen, että varusmiehet harjoittelisivat pääosin heidän sodanajan kalustollaan, jotta osaaminen saadaan nostettua riittävän korkealle tasolle.

Viime vuosina koulutusajan loppuvaiheen vaativimmissa sotaharjoituksissa kalustona on ollut helpommin käsiteltäviä 122 millisiä haupitseja, joiden käyttö toki helpottaa harjoituksiin siirtymistä ja sopivien tuliasemien löytämistä sekä alentaa välillisesti harjoituskustannuksia, mutta niiden käyttö ei harjaannuta tykkiryhmiä teknisesti vaativan 155 K 98 kanuunan käsittelyssä. Myös monet patteriston suorituskykyä lisäävät asiat mitä 155 K 98:n apulaitteet mahdollistavat, jäävät vähäiselle harjoittelulle käytettäessä 122 H 63 kalustoa harjoituksissa.

Vanha viisaus osaa sanoa; "Train as you fight."

6 POHDINTA

Tutkimuksessa kului odotettua enemmän aikaa vikaantumistiedon keräämiseen, sillä nykyinen toiminnanohjausjärjestelmä ei mahdollista riittävän laadukasta automaattista tiedonkeräystä kunnossapito- ja korjaustöistä. Tutkimuksen vikaantumismalleihin on jäänyt jonkin verran epätarkkuutta, sillä kaikkia Puolustusvoimien käyttöhuoltohenkilöstön tekemiä vikakorjauksia ei ole kirjattu toiminnanohjausjärjestelmään, vaan pelkästään tykkien kantakirjoihin, eikä tutkimuksessa saatu tarkasteluun kaikkien 155 K 98 tykkien kantakirjoja.

Komentopanssariajoneuvon vikaantumisen mallintamisessa epätarkkuutta aiheuttaa monet epämääräiset vikakuvaukset sekä kohtalaisen suuri määrä tuntemattomaksi jääneitä vikoja.

Vikaantumisten dokumentaation vaihteleva laatu ja analyysissä tarvittavan muun aineiston hajanaisuus aiheuttaa kunnossapidosta ja elinjaksonhallinnasta vastaavalle henkilöstölle haasteita, sillä järjestelmän ylläpitämisen ja kehittämisen vaatima tieto on vaikeasti saatavilla ja hyödynnettävissä.

Jotta ase- ja johtamisjärjestelmien käytettävyydestä vastaavat järjestelmäinsinöörit ja muut asiantuntijat voisivat saada laadukasta tietoa työnsä tueksi, vikaantumistietojen ja järjestelmien käytönseurannan raportoinnin on oltava jatkuvaa ja täsmällistä. Siihen vaikuttaa suuresti käytettävän raportointiohjelmiston käytettävyys. Jos ohjelmiston käytettävyys on jotenkin huono, kuten aikaa vievä tai hankala, paljon arvokasta kunnossapitotietoa jää ilmoittamatta sen takia.

Kun tutkimuksen vikaantumistietoja käytettiin luotettavuuden analysoinnissa, pelkästään toiminta-aikaan perustuvat mallit antoivat luotettavuudesta huomattavasti positiivisempia tuloksia kuin mallit, jotka perustuivat esimerkiksi ajokilometrien, laukausmäärien ja eri laitteiden käyttömäärien muodostamiin tehtäväprofiileihin. Aikaan perustuvat mallit yksinkertaistavat tilannetta liikaa, eivätkä sovi kunnolla patteriston luotettavuuden kuvaamiseen. Tehtäväprofiilimallissa haasteena taas on riittävän laadukkaan mallin laatiminen, jolloin vaaditaan hyvinkin yksityiskohtaisia tietoja siitä, kuinka patteristoa on ajateltu käytettävän taistelussa.

155 K 98 tykkien luotettavuus on melko hyvällä tasolla, kun sitä vertaa yhdysvaltalaiseen tykkikalustoon. Esimerkiksi keskimääräinen vikaantumisväli käyttötunteina on moninkertainen verrattuna M109A7-panssarihaupitsiin. Komento-panssariajoneuvon luotettavuutta on vaikeampi verrata vastaavaan ulkomaiseen kalustoon, sillä julkisista lähteistä vastaaville järjestelmille ei löytynyt luotettavuusteknistä tietoa.

Tykistöpatteriston luotettavuuden tutkimisen myötä nousi esille useita mahdollisia jatkotutkimusaiheita, joiden avulla saataisiin lisättyä tietoa kenttätykistön eri järjestelmien suorituskyvystä:

- Millainen on kenttätykistön luotettavuuskeskeinen kunnossapitojärjestelmä ja mitä kehitettävää siinä on?
- 155 PSH K9 Moukari tai 122 RAKH 89 M1 luotettavuusanalyysin laatiminen
- Millainen 155 K 98 tykin hydraulikkajärjestelmän kenttäkorjaussarjan tulisi olla?
- Miten SAP-toiminnanohjausjärjestelmään syötettävien kunnossapitotietojen laatua ja käytettävyyttä voisi parantaa?
- Miten uusien ohjelmistoradioiden luotettavuus vaikuttaa niitä käyttävien patteristojen viestijärjestelmän toimintaan?

LÄHTEET

Anderson, R. T. & Neri, L. 1990. Reliability-Centered Maintenance: Management and Engineering Methods. Essex: Elsevier Science Publishers Ltd.

Bearden, S. & Bell, J. 2013. Reliability Growth Planning Based on Essential Function Failures. Institute for Defense Analyses. Luettu 21.1.2023
https://www.ida.org/~media/Corporate/Files/Publications/IDA_Documents/OED/ida-document-ns-d-4963.pdf

Chandler, R. F. 1976. The effect of weapon reliability and maintainability on artillery force availability. U.S. Army materiel systems analysis activity.

Collins, D. H. & Warr, R. L. 2019. Failure time distributions for complex equipment. Los Alamos National Laboratory. Luettu 9.2.2022.
<https://www.osti.gov/pages/servlets/purl/1479952>

DARCOM. 1979. Engineering design handbook, Army weapon systems analysis, Part 2. U.S. Army materiel development and readiness command. Luettu 27.9.2022.
<https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA086388.pdf>

Davis, R. 1992. Army's M109 Howitzer, Report to the Secretary of Defense. United States General Accounting Office. Luettu 22.1.2023.
<https://www.gao.gov/assets/nsiad-92-44.pdf>

Defense Media Network. 2011. Lightweight 155mm Howitzer. USMC PEO Land Systems Programs 2011-2012. Luettu 2.2.2023
<https://www.defensemmedianetwork.com/stories/lightweight-155-mm-howitzer-2/>

Defense Update. 2016. Russian MLRS strike footage from a drone. Youtube-video. Julkaistu 12.3.2016. Viitattu 26.1.2023.

Gilmore, M. 2017. M109 Family of Vehicles, Paladin Integrated Management (PIM), Operational Assessment of the Initial Operational Test and Evaluation. Director, Operational Test and Evaluation. Luettu 22.1.2023.
<https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1026142.pdf>

Heap, H. F. & Nowlan, F. S. 1978. Reliability-Centered Maintenance. United Airlines & U.S. Department of Defense.

Hyytiäinen, M. 1999. Passiivisen suojan konsepti. Tiede ja ase 57/1999. Suomen Sotatieteellinen Seura Ry.

IEC 60050-192. 2015. Luotettavuus. Kansainvälinen sähkötekniikan komissio.

Kececioglu, D. 2002a. Reliability Engineering Handbook, Volume 1. Lancaster: DESTech Publications Inc.

Kececioglu, D. 2002b. Reliability Engineering Handbook, Volume 2. Lancaster: DESTech Publications Inc.

- Korhonen, J. 2011. Satunnaisvikaantumisten hallinta ja laskenta. ÅF-Consult Oy. Luettu 8.1.2023.
https://www.automatioseura.fi/site/assets/files/1431/asaf_teema_2_sas_turvallisuus_-_teemap_juha_korhonen_-consult.pdf
- Laitinen, J. 2020. Reliability centered maintenance. Luentoaineisto. Teknisen elinjakson hallinta – peruskurssi, koulutus Puolustusvoimien asiantuntijoille 27.2.2020. Tampereen yliopisto. Tampere.
- Luyben, W. L. 1990. Process modelling, simulation, and control for chemical engineers. 2. painos. New York: McGraw-Hill.
- Maanpuolustuskorkeakoulu. 2007. Tulen vaikutus ja teho. Sotatekniikan laitoksen opetusmoniste.
- Moubray, J. 1997. Reliability Centered Maintenance. 2. painos. New York: Industrial Press.
- Norcross, M. F. Jr. 2002. The requirement for acquisition and logistics integration: An examination of reliability management within the marine corps acquisition process. Naval postgraduate school. Luettu 28.9.2022.
<https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA411182.pdf>
- Patria. 2008. 155K98 Käyttöohje. Versio 7.61. Patria Oyj.
- Puolustusvoimat. 2000. Taisteluvälinehuolto-opas. Helsinki: Oy Edita Ab,
- Puolustusvoimat. 2014a. Logistiikkaopas. Tampere: Juvenes Print Oy.
- Puolustusvoimat. 2014b. Tykistöopas. Tampere: Juvenes Print Oy.
- Puolustusvoimat. 2014c. Tykistön ampumaopin käsikirja. Tampere: Juvenes Print Oy.
- Puolustusvoimat. 2015a. Kenttäohjesääntö 4 Logistiikka.
- Puolustusvoimat. 2015b. Kenttäohjesääntö 2 Sotilastiedustelu.
- Puolustusvoimat. 2015c. Tulenjohtotoiminnan käsikirja. Tampere: Juvenes Print Oy.
- Puolustusvoimat. 2016. Kenttäohjesääntö 3.1 Maaoperaatiot.
- Puolustusvoimat. 2019. Kenttätykistön käsikirja. Joensuu: Punamusta Oy.
- Puolustusvoimat. 2022a. MS2449 MAAVESUUNNOS Päätös tutkimuslupa-asiaan (Uusi-Rasi). Julkaistu 23.2.2022.
- Puolustusvoimat. 2022b. Sotilaan käsikirja 2022. Tampere: Juvenes Print Oy.

Rokris International. 2021. Hosepatch. Luettu 12.3.2023.
<https://rokris.com/products/hosepatch/>

Salomäki, R. 2003. Suorituskykyiset prosessit: Hyödynnä SPC. Tampere: Metalliteollisuuden kustannus Oy.

Sievälä, A. 2020. Valvontalentokoneen elinjaksonhallinta. Sotatekniikan laitos. Maanpuolustuskorkeakoulu. Pro gradu -tutkielma.

Takala, K. 2022. Raskaan raketinheittimen varaosakomponentit. Tekniikan ja liikenteen ala. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. YAMK-opinnäytetyö.

Teeriaho, J. 2015. Luotettavuusanalyysi, Reliability analysis. Lapin ammattikorkeakoulu. Rovaniemi. Luettu 8.1.2023.
<https://docplayer.fi/105635760-Luotettavuusanalyysi-reliability-analysis.html>

US Army & US Marine Corps. 1997. Lightweight 155mm (LW155) system performance specification. Luettu 14.1.2023
<https://man.fas.org/dod-101/sys/land/docs/lw155-spec.pdf>

Van Rijin, C. F. H. 2007. Maintenance Modelling and Applications; lessons learned¹. 32nd ESReDA Seminar. Luettu 4.10.2022.
<http://www.securityofsupply.com/publications/Maintenance%20modelling%20and%20applications.pdf>

LIITTEET

Liite 1. Normaalijakaumataulukko

z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
0.7	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
1.0	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
1.1	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
1.2	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.9015
1.3	0.9032	0.9049	0.9066	0.9082	0.9099	0.9115	0.9131	0.9147	0.9162	0.9177
1.4	0.9192	0.9207	0.9222	0.9236	0.9251	0.9265	0.9279	0.9292	0.9306	0.9319
1.5	0.9332	0.9345	0.9357	0.9370	0.9382	0.9394	0.9406	0.9418	0.9429	0.9441
1.6	0.9452	0.9463	0.9474	0.9484	0.9495	0.9505	0.9515	0.9525	0.9535	0.9545
1.7	0.9554	0.9564	0.9573	0.9582	0.9591	0.9599	0.9608	0.9616	0.9625	0.9633
1.8	0.9641	0.9649	0.9656	0.9664	0.9671	0.9678	0.9686	0.9693	0.9699	0.9706
1.9	0.9713	0.9719	0.9726	0.9732	0.9738	0.9744	0.9750	0.9756	0.9761	0.9767
2.0	0.9772	0.9778	0.9783	0.9788	0.9793	0.9798	0.9803	0.9808	0.9812	0.9817
2.1	0.9821	0.9826	0.9830	0.9834	0.9838	0.9842	0.9846	0.9850	0.9854	0.9857
2.2	0.9861	0.9864	0.9868	0.9871	0.9875	0.9878	0.9881	0.9884	0.9887	0.9890
2.3	0.9893	0.9896	0.9898	0.9901	0.9904	0.9906	0.9909	0.9911	0.9913	0.9916
2.4	0.9918	0.9920	0.9922	0.9925	0.9927	0.9929	0.9931	0.9932	0.9934	0.9936
2.5	0.9938	0.9940	0.9941	0.9943	0.9945	0.9946	0.9948	0.9949	0.9951	0.9952
2.6	0.9953	0.9955	0.9956	0.9957	0.9959	0.9960	0.9961	0.9962	0.9963	0.9964
2.7	0.9965	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.9970	0.9971	0.9972	0.9973	0.9974
2.8	0.9974	0.9975	0.9976	0.9977	0.9977	0.9978	0.9979	0.9979	0.9980	0.9981
2.9	0.9981	0.9982	0.9982	0.9983	0.9984	0.9984	0.9985	0.9985	0.9986	0.9986

(Puolustusvoimat 2014c, 126)

Liite 2. Laskuesimerkki normaalijakauman käytöstä

Jos tarkkuuskiväärin kohdistusammunnoissa on laskettu 100 metrin ampumamatkalla iskemien keskimääräisen etäisyyden olevan iskemäkeskeispisteestä 13 millia, niin mikä on osumatodennäköisyys 300 metrin päässä olevaan pyöreään maaliin, jonka halkaisija on 10 cm?

Jakamalla millimetreinä mitatun iskemien keskimääräisen etäisyyden iskemäkeskeispisteestä (Mean radius, MR) metreissä mitatulla ampumaetäisyydellä, saadaan laskettua keskihajonta milliradiaaneina.

$$\sigma = \frac{MR}{AMET} = \frac{13 \text{ mm}}{100 \text{ m}} = 0,13 \text{ mrad}$$

Odotusarvohajonta μ on 0 mrad, eli oletetaan että ase on kohdistaminen on onnistunut, lentorata on tiedossa, ampuja ei tee virheitä ja muutkin ammuntaan vaikuttavat muuttujat on otettu huomioon täydellisesti, jolloin iskemäkeskeispiste yhtyy maalin keskipisteeseen.

Muutetaan maalin koko milliradiaaneiksi ja jaetaan se kahdella, jolloin saadaan x , eli suurin sallittu hajonta maalin keskipisteen ja reunimmaisten osumien väliltä mitattuna, jotta vielä osutaan maaliin.

$$x = \frac{100 \text{ mm}}{300 \text{ m}} \cdot 0,5 = 0,166 \dots \text{ mrad}$$

Suoritetaan normitus kaavan 10 avulla:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} = \frac{0,166 \dots \text{ mrad} - 0 \text{ mrad}}{0,13 \text{ mrad}} = 1,282 \dots$$

Liitteen 1 mukaisen normaalijakaumataulukon mukaan $z = 1,282$ vastaava todennäköisyys on 0,8997. Koska hajonta voi yhtä suurella todennäköisyydellä vaikuttaa myös vastakkaiseen suuntaan, osumatodennäköisyys 10 cm maaliin 300 m etäisyydellä on silloin:

$$P = 0,8997 - (1 - 0,8997) = 0,799 \dots \approx 80 \%$$

Liite 3. Tulen vaikutus ja pienimmän sallitun tulenantokyvyn laskeminen

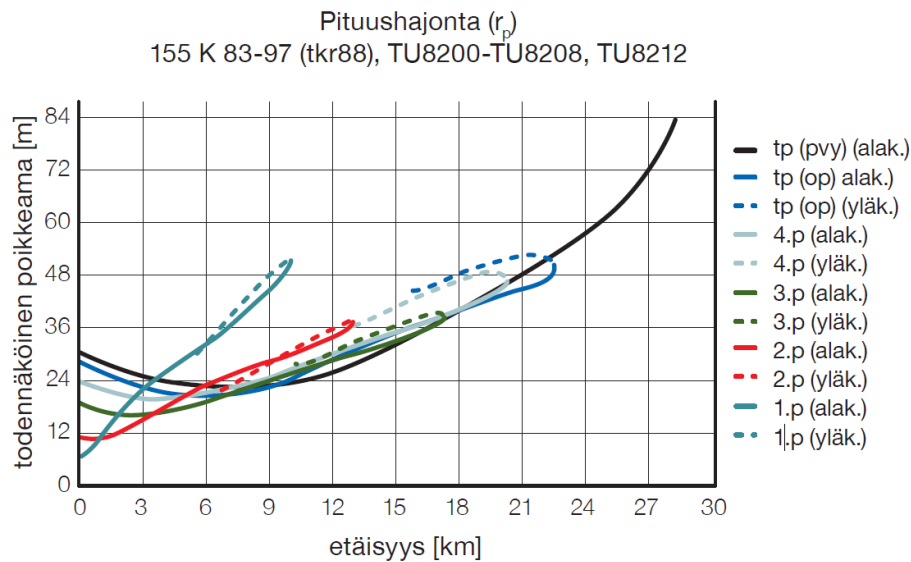
Laskuesimerkin maalina on vastustajan komentopaikka 20 000 metrin etäisyydellä, jossa on puolikovia ja pehmeitä maaleja 100 m x 100 m alueella. Vastustajan komentopaikan alueelle on ehditty kaivaa kattamattomia suojapoteroita kaluston ja henkilöstön suojaksi. Haluttu vaikutus on, että komentopaikan kyky johtaa vastustajan taistelutoimia estyy, eli kohde lamautetaan.

Yhden ammuksen vaikutusala pehmeään maaliin 155 mm sirpalekranfaatilla tasaisessa avomaastossa on 395 m², epätasaisessa avomaastossa 220 m² ja avopoteroon suojautuneita maaleja vastaan on 34 m² (Puolustusvoimat 2014c, 104). Esimerkin perusteissa komentopaikan ympäristöön on kaivettu kattamattomia suojapoteroita, jolloin ammuksen vaikutusala *a* on 34 m².

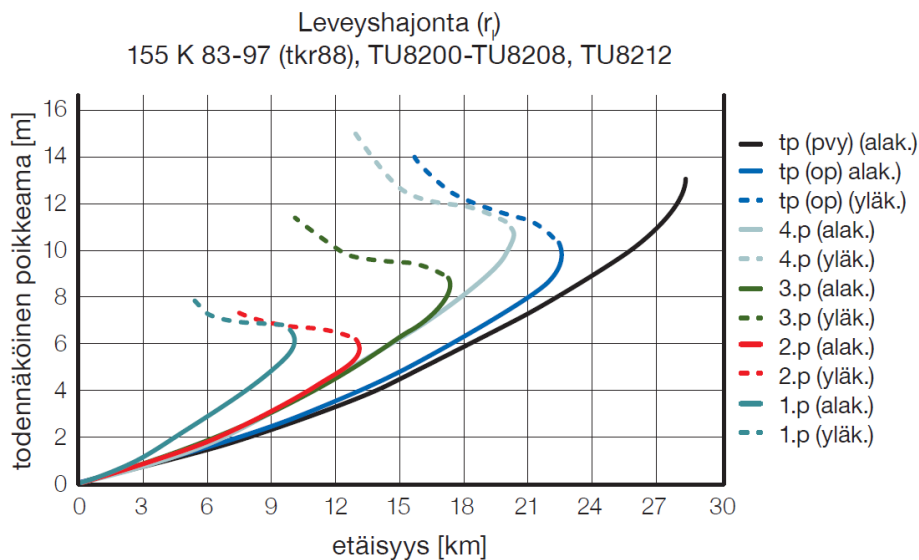
Taulukon 18 perusteella halutuksi tappioprosentiksi vastustajan lamautusta varten valitaan 30 %. Laskennan yksinkertaistamiseksi oletuksena on, että tuli jakautuu tasaisesti maalialueelle, iskemäkeskeispiste yhtyy maalin keskipisteeseen ja että pattereiden ampumaetäisyydet maaliin ovat likimain samoja.

Koska maalin pinta-ala ja ammuksen vaikutusala tunnetaan, sekä haluttu tappioprosentti on 30 %, ammuskulutuksen laskemiseksi pitää ensin selvittää osumatodennäköisyys *p*. Osumatodennäköisyyteen maalialueelle vaikuttaa maalin pinta-ala sekä käytössä olevan ase-laukausyhdistelmän pituus- ja sivuhajonta kulloisellekin ampumamatkalle.

Esimerkkilaskussa osumatodennäköisyyden määrittämisessä käytetään Tykistön ampumaopin käsikirjasta 2014 saatavia iskemähajonnan todennäköisen pituuspoikkeaman kuvaajia. Käsikirjasta ei ollut saatavilla erikseen 155 K 98 kalustolle määritettyjä hajontakuvaajia, joten laskennassa käytetään 155 K 83 kaluston kuvaajia. Kuviossa 12 on esitetty pituushajontakuvio ja kuviossa 13 leveyshajontakuvio.



KUVIO 12. 155 K 83-97:n iskemähajonnan todennäköinen pituuspoikkeama



KUVIO 13. 155 K 83-97:n iskemähajonnan todennäköinen leveyspoikkeama

Kuvioiden 12 ja 13 perusteella 20 000 metrin ampumaetäisyydellä täyspanoksella ampussa perävirtausyksiköllistä TKR88-ammusta, iskemähajonnan todennäköinen pituuspoikkeama on 46 m ja iskemähajonnan todennäköinen leveyspoikkeama on 7 m.

Lasketaan kaavan 15 avulla keskihajonnat:

$$s_{pituus} = \frac{46 \text{ m}}{0,675} = 68,148 \dots \text{ m} \approx 68,1 \text{ m}$$

$$s_{leveys} = \frac{7 \text{ m}}{0,675} = 10,370 \dots \text{ m} \approx 10,4 \text{ m}$$

Koska maalialueen koko on 100 m x 100 m ja oletetaan iskemäkeskipisteen yhtyvän maalialueen keskipisteeseen, iskemäkeskipisteen ja maalialueen etureunan välinen ero on 50 metriä. Lasketaan, kuinka monen keskihajonnan päässä se on keskiarvosta, eli suoritetaan normitus käyttäen kaavaa 10:

$$z_1 = \frac{50 \text{ m} - 0 \text{ m}}{68,148 \dots \text{ m}} = 0,733 \dots$$

Liitteessä 1 olevan normaalijakaumataulukon perusteella tätä vastaava todennäköisyys p_1 on 0,7673. Iskemäkeskipisteen ja maalialueen takareunan välinen etäisyys on 50 m, jolloin normitukseksi saadaan:

$$z_2 = \frac{-50 \text{ m} - 0 \text{ m}}{68,148 \dots \text{ m}} = -0,733 \dots$$

Koska z_2 on negatiivinen, sitä vastaava todennäköisyys p_2 on:

$$p_2 = 1 - 0,7673 = 0,2327$$

Osumatodennäköisyys pituussuunnassa p_{pituus} saadaan p_1 ja p_2 erotuksena:

$$p_{pituus} = p_1 - p_2 = 0,7673 - 0,2327 = 0,5346$$

Iskemäkeskipisteen ja maalialueen oikean reunan välinen etäisyys on 50 m, jolloin normitus on:

$$z_3 = \frac{50 \text{ m} - 0 \text{ m}}{10,370 \dots \text{ m}} = 4,821 \dots$$

Normaalijakaumataulukon mukaan tätä vastaava todennäköisyys p_3 on 1.

Iskemäkeskipisteen ja maalialueen vasemman reunan välinen ero on 50 m.

Normitus on:

$$z_4 = \frac{-50 \text{ m} - 0 \text{ m}}{10,370 \dots \text{ m}} = -4,821 \dots$$

Koska z_4 on negatiivinen, sitä vastaava todennäköisyys p_4 on:

$$p_4 = 1 - 1 = 0$$

Osumatodennäköisyys leveyssuunnassa p_{leveys} saadaan p_3 ja p_4 välisenä erotuksena:

$$p_{leveys} = p_3 - p_4 = 1 - 0 = 1$$

Osumatodennäköisyys maalialueelle saadaan laskettua hyödyntäen kaavaa 8.

$$p = p_{pituus} \cdot p_{leveys} = 0,5346 \cdot 1 = 0,5346$$

Kun osumaprocentin kaava 14 ratkaistaan ammusten määrän n mukaan, saadaan:

$$n = \frac{-A \cdot \ln(1-P)}{a \cdot p},$$

Jossa P on tappioprosentti, a on yhden ammuksen vaikutusala neliömetreinä, A on maalin pinta-ala neliömetreinä ja p on osumatodennäköisyys alueelle A .

Sijoitetaan lähtöarvot kaavaan, jolloin tarvittavaksi ammusten määräksi tulee:

$$n = \frac{-(100 \text{ m} \cdot 100 \text{ m}) \cdot \ln(1 - 0,3)}{34 \text{ m}^2 \cdot 0,5346} = 190,623 \dots \text{ ls} \approx 191 \text{ ls}$$

Komentopaikan lamauttamiseen 30 % tappioilla tarvitaan siis 191 ammusta, joka tekee 18 tykkisessä patteristossa keskimäärin 10,6 laukausta per ase.

Tulentoiminnan käsikirjassa on määritetty taulukon 19 mukaiset suurimmat sallitut tulinopeudet 155 K 98 tykkikalustolle. Taulukon 19 tietojen mukaan 155 K 98 tykin suurin sallittu tulinopeus tauot mukaan lukien on:

$$R_f = \frac{6 \cdot 6 \text{ ls}}{10 \text{ min}} = 3,6 \frac{\text{ls}}{\text{min}}$$

Vaikutusta ampuessa pyritään ampumaan suurimmalla mahdollisella sallitulla tulinopeudella ja putken liiallisen kulumisen estämiseksi yhtäjaksoisen ammunnan kesto ei saa olla yli 10 min, jolloin voidaan laskea minimimäärä tykkeitä, jotka pystyvät toteuttamaan tulitehtävän ylittämättä 10 minuutin rajaa.

Esimerkiksi jos käytössä on 12 tykkiä, 191 laukauksen tulitehtävään kuluu suurimmalla sallitulla tulinopeudella:

$$t_{12 \text{ tykkiä}} = \frac{191 \text{ ls}}{12 \cdot 3,6 \frac{\text{ls}}{\text{min}}} = 4,4212 \dots \text{ min} \approx 4 \text{ min } 25 \text{ s}$$

Taulukossa 21 on laskettu 191 laukauksen tulitehtävän suoritusajat 1 – 18 tykilä 3,6 ls / min tulinopeudella, josta nähdään, että minimimäärä tykkeitä tulitehtävän suorittamiseen annetuilla raja-arvoilla on 6 tykkiä.

TAULUKKO 21. Tulitehtävän suorittamisen minimitykkimäärä 3,6 ls / min

Tykkien määrä (kpl)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
191 laukauksen tulitehtävän suoritus aika (min)	53,1	26,5	17,7	13,3	10,6	8,8	7,6	6,6	5,9	5,3	4,8	4,4	4,1	3,8	3,5	3,3	3,1	2,9

Jos verrokki minimitulenantokykynä pidetään M777-haupitsin vaatimustenmäärittelyissä mainittua MEF-arvoa, jonka mukaan vaikutusta ampuessa tykin tulinopeus ei saa laskea alle 2 ls / min (US Army & US Marine Corps 1997, 11), niin tällöin 191 laukauksen tulitehtävän suorittamiseksi alle 10 minuutissa minimimäärä on 10 tykkiä. Laskennan tulokset on esitetty taulukossa 22.

TAULUKKO 22. Tulitehtävän suorittamisen minimitykkimäärä 2 ls / min

Tykkien määrä (kpl)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
191 laukauksen tulitehtävän suoritus aika (min)	95,5	47,8	31,8	23,9	19,1	15,9	13,6	11,9	10,6	9,6	8,7	8,0	7,3	6,8	6,4	6,0	5,6	5,3

Voidaan siis sanoa, että jos tulitoimintaan kykenemättömiä tykkeitä on paljon, ehjät tykit joutuvat ampumaan suurella tulinopeudella suuria määriä ammuksia halutun vaikutuksen saavuttamiseksi. Se taas altistaa ampuvat tykit suuremmalle kulumiselle, jolloin niiden vikaantumisen todennäköisyys kasvaa.