

Tietoliikenneverkkojen ja tietoteknisten palveluiden tarjoaman sotilaallisen suorituskyvyn matemaattinen mallintaminen (vertaisarvioitu)

Vesa Kuikka ja Sami Peltotalo

Abstract

In the Finnish Defence Forces, the concept of capability is defined as the ability to achieve a desired effect or an objective in particular circumstances, for example, winning a war or a battle, or destroying a target. However, partakers in the defence field have their own perceptions and differing opinions about the meaning of the concept. In the planning phase of defence capabilities, it is important to understand the concept in a similar fashion or, at least, recognise the differences and relations between different views. Traditionally, capability has been defined by quantities of armament and troops, but the definition does not comply with the definition cited above. In this article, we propose a quantitative definition based on probabilities which are consistent with the capability concept in use in the Finnish Defence Forces. In addition to probabilistic modelling of capabilities, we propose an approach to modelling requirement levels, which are set to services needed in building the capabilities. We show how these requirement levels are related to the concept of capability. Along these lines we illustrate the modelling methods with a system consisting of information technology services and computer networks in an artillery use case. As the aim of this article is to demonstrate the methodology and mathematical models, a simplified example is devised as the use case. In theory, while the use of technological systems is related to winning a war or a battle, we don't discuss it in this article and instead refer to other studies related to this topic. The modelling principles are generic and they can be applied to other functions and operations as well.

Johdanto

Suorituskyvyn käsite on Puolustusvoimissa määritelty kykynä saavuttaa haluttu vaikuttavuus määritetyissä olosuhteissa (Kosola 2013, 103). Käsitteen määrittel-

mä on hyvin samankaltainen NATO:n laatiman käsitelmäritelmän kanssa¹. Yleisen suorituskäyvyn käsitteen pohjalta on Puolustusvoimissa määritelty suorituskäyvyn kyvykkäysalueet (Kosola 2013, 105–111). Suorituskäyvien suunnittelussa on tärkeää, että keskustelussa ymmärretään käsitteet samalla tavalla tai ainakin tiedostetaan erilaisten näkemysten väliset suhteet ja merkityserot. Perinteisesti suorituskäykyä on mitattu aseistuksen ja joukkojen lukumäärillä (Dupuy 1979), mutta se ei ole suoraan Puolustusvoimien käsitelmäritelmän mukaista. Tässä artikkelissa esitetään todennäköisyyksiin perustuva määrällinen eli kvantitatiivinen suorituskäyvyn määritelmä, joka on yhteensopiva Puolustusvoimien käsitelmäritelmän kanssa. Suorituskäyvien mallintamisen lisäksi esitetään, kuinka tietotekniset palvelutarpeet voidaan mallintaa ja mikä on niiden yhteys suorituskäykyihin. Tämän määritelmän mukaista mallintamista havainnollistetaan tietoliikenneverkkojen ja tietoteknisten palveluiden tarjoamilla suorituskäyvillä, jotka tuottavat osan sotilaallisesta suorituskäyvystä kuuluen verkostotoiminnan kyvykkäysalueeseen. Esimerkkinä on kenttätykistön käyttötapaus, mutta samat mallintamisen periaatteet soveltuvat muihinkin käyttötapauksiin. Tämän artikkelin tarkoituksena on esitellä menetelmää ja matemaattista mallia, joten käytännön esimerkki on yksinkertaistettu ja se on tarkoitettu vain idean havainnollistamiseksi.

Suorituskäyvien määrittelyä

Suorituskäyky on siis Puolustusvoimien yleisessä käsitelmäritelyssä ”käyky saavuttaa haluttu vaikuttavuus määritetyissä olosuhteissa”. Tässä artikkelissa suorituskäyky määritellään todennäköisyytenä tehtävän tai operaation onnistuneelle toteuttamiselle. Uutta määritelmää voidaan pitää yleisemmän Puolustusvoimien käsitelmäritelmän tarkennuksena, jolloin vältetään suurelta osin uuden ja erilaisen käsitteen käyttöönoton tuomia ongelmia. Puolustusvoimien oppaat ja muu aineisto pätevät edelleen lähes sellaisenaan, vaikka käsitettä rajataan todennäköisyydestulkinnalla. Suorituskäyvien mallintaminen vaatii tehtävän tai operaation sisällöllisen ja käsitteellisen määrittelyn sekä kuvauksen mitä onnistumisella tarkoitetaan kyseisen tehtävän tai operaation olosuhteissa. Teknisten järjestelmien vaikutusta ylimmän tason suorituskäykyihin, kuten taistelun tai sodan voittamiseen, on käsitelty lähteissä (Kuikka & Suojanen 2014; Kuikka 2016). Näitä tasoja ei käsitellä tässä artikkelissa, vaan pitäydytään suorituskäyvien kyvykkäysalueiden ja kyvyt muodostavien järjestelmien tasoilla.

Todennäköisyyteen perustuva suorituskäyvien määritelmä tuo lisäksi kvantitatiivisen mitattavuuden, joka mahdollistaa suorituskäyvien vertailut. Omia suorituskäykyjä voidaan vertailla myös vastustajan suorituskäykyihin, jolloin

saadaan perusteita puolustusjärjestelmän kehittämiseen ja tuleviin puolustus-
tarvikehankintoihin. Vertailuja voidaan tehdä suorituskyvyn kyvykkyyalueilla
(Kosola 2013, 105–111) ja järjestelmien tai osajärjestelmien tasolla. Järjestel-
mien ja osajärjestelmien vertailu on mahdollista sekä erillisinä järjestelminä
että järjestelmien yhdistelminä. Voidaan tarkastella tilanteita, joissa osa järjes-
telmistä ei ole käytössä teknisen vikaantumisen tai vastustajan toimenpiteiden
vaikutuksesta. Toisaalta joskus ei haluta suunnitellusti omien resurssien kan-
nalta käyttää kaikkia mahdollisia rinnakkaisia järjestelmiä, jotka ehkä antavat
vain vähän suorituskykyä operaatiossa. Puolustusvoimien käsitelmäärityksessä
järjestelmä on ”toiminnaltaan yhteen kuuluvien osien kokonaisuus” (Kosola
2013, 101). Tässä artikkelissa järjestelmä koostuu useasta tietoteknisestä palve-
lusta, joita voidaan pitää järjestelmän osajärjestelminä.

Tässä artikkelissa tarkastellaan tekijänä loppukäyttäjän arvioimaa palvelu-
tarvetta ja sen yhteyttä suorituskykyyn. Tarpeella tarkoitetaan tässä yhteydessä
loppukäyttäjän asettamaa vaatimusta liittyen järjestelmän tai palvelun ominai-
suuksiin. Vaatimus on määritelty Puolustusvoimien käsitelmäärityksessä yhteen-
sopivasti tämän kanssa. (Kosola 2013, 104.) Suorituskyvyllä ja tarpeen toteu-
tumisella on funktionaalinen yhteys siten, että tarpeen ylittyessä saadaan
suorituskykyvaatimusta korkeampaa suorituskykyä ja tarpeen alittuessa
suorituskykyvaatimusta alemmaa suorituskykyä. Käsitteiden välinen yhteys on
mahdollista esittää tässä muodossa, koska ne on määritelty todennäköisyyksinä.

Mallin rakenne ja käsitteet

Mallintamisen kohteena on tietoliikenneverkkoja ja tietoteknisiä palveluita hyö-
dyntävä loppukäyttäjälle tuotettu suorituskyky. Tietoliikenneverkko koostuu
verkon solmuista ja solmujen välisistä linkeistä. Verkon solmujen ja solmujen
välisten linkkien olemassaolo ja toimivuus mallinnetaan todennäköisyyksinä.
Verkon topologian ja edellä mainittujen todennäköisyyksien avulla voidaan
laskea kaikkien verkon solmuparien yhteydessä todennäköisyys. Myö-
hemmin artikkelissa verkon toimivuudella tarkoitetaan solmuparien yhteydel-
lisyys todennäköisyyttä, eli toisin sanoen todennäköisyyttä millä verkosta
löytyy jokin reitti, jonka kautta yhteys solmujen välille muodostuu.

Loppukäyttäjille tuotettava tietotekninen palvelu hyödyntää tietoliikenne-
verkkoa. Palvelua tuotetaan ja käytetään verkon solmuista. Palvelun toimivuus
mallinnetaan myös todennäköisyytenä. Palvelun saatavuus riippuu sekä verkon
että itse palvelun toimivuudesta. Palvelun saatavuus mallinnetaan kahden edel-
lä mainitun todennäköisyyden yhdistelmänä.

Loppukäyttäjällä on toiminnallinen tarve käyttää palvelua tehtävänsä onnistuneeseen tekemiseen. Tarvekin mallinnetaan todennäköisyytenä. Käyttäjällä on yleensä toiminnallinen tarve yhtä aikaa useammalle palvelulle. Mallinnuksessa nämä palvelut voidaan niputtaa kokonaisuudeksi, jolloin voidaan tutkia palvelukokonaisuuden vaikuttavuutta tehtävän onnistumiselle.

Palvelun saatavuudelle voidaan tarvittaessa asettaa loppukäyttäjän vaatimus eli tarve, minkä ylittyessä palvelu voidaan katsoa riittävän suorituskykyiseksi. Toinen vaihtoehto on asettaa suorituskykyvaatimuksia jollekin laajemmalle kokonaisuudelle kuin yksittäisille palveluille. Teknisesti vaatimus voidaan asettaa järjestelmälle, joka muodostuu useasta palvelusta. On myös mahdollista määrittellä esimerkiksi tietyn kenttätykistöä sisältävän joukkotyypin suorituskykyä. Tämä vaikuttaa myös tarpeen arviointiin. Tällöin voitaisiin verrata erilaisten joukkotyyppien ja kokoonpanojen suorituskykyä.

Sotilaallisen toiminnan kannalta suorituskykyvaatimus on mielekästä asettaa laajemman operaation tai tietyn tehtävän onnistumiselle. Ylimmällä tasolla vaatimus asetetaan sodan tai taistelun voittamiselle (Kuikka 2015; Kuikka 2016). Kyvykkyysalueiden tasolla (Kosola 2013, 105–111) voidaan tarkastella kaikkia kyvykkyysalueita tai niiden osajoukkoa.

Loppukäyttäjän tarpeen tai suorituskykyvaatimuksen rinnalla on tarkasteltava arvioitua toteutuvaa suorituskykyä, joka voi alittaa tai ylittää tarpeen. Toteutuva suorituskyky voi olla helpompi arvioida suorituskyvyn kyvykkyysalueen tasolla kuin yksittäisen järjestelmän tai palvelun tasolla. Järjestelmän teknisen toimivuuden arvioiminen on helpompaa, mutta järjestelmän tarjoaman suorituskyvyn arvioiminen vaatii välttämättä muiden järjestelmien ja skenaarion huomioon ottamisen (Kuikka 2016). Esimerkiksi arvio voidaan tehdä suorituskyvyn kyvykkyysalueittain, kun käytössä on yksittäisiä järjestelmiä tai niiden yhdistelmiä. Kuikka ja Suojanen (Kuikka & Suojanen 2014) ovat käsitelleet esimerkkiä, jossa tilannetietoisuuden, suojan ja vaikuttamisen kyvykkyysalueita on arvioitu, kun käytössä on joko miehittämättömiä ilma-aluksia tai satelliitteja tai molempia. Suorituskykyjen arvioiminen operaatioiden onnistumisen todennäköisyytenä on edellyttänyt skenaarioiden määrittelyn ja vastustajan suorituskykyjen arvioimisen.

Jos asetetaan suorituskykyvaatimus suorituskyvyn kyvykkyysalueiden tasolla tai palveluiden yhdistelmille, matemaattisesta mallista on mahdollista laskea kääntäen yksittäisille palveluille johdetut vaatimukset. Samalla periaatteella voidaan laskea vaatimukset myös kaikille välitasojen järjestelmien ja suorituskykyjen yhdistelmille. Näistäkin välituloksista on hyötyä, koska erilaisissa operaatioissa käytetään järjestelmiä ja suorituskykyjä toimintojen, tilanteen ja skenaarion mukaan.

Mallin variaatiot

Edellä mainittujen parametrien avulla kyetään mallintamaan järjestelmätasolla palveluista saatava suorituskkyky tai suorituskyyvyn lisäys olemassa olevaan tasoon. Yksinkertaisessa mallissa useasta palvelusta saatava kokonaissuorituskkyky on yksittäisten palveluiden suorituskkykyjen summa (Kuikka & Syrjänen 2019). Yksityiskohtaisemmassa menetelmässä palvelut mallinnetaan keskenään vaihtoehtoisina tai välttämättöminä palveluina (Kuikka & Suojanen 2014; Kuikka 2019a; Suojanen ym. 2014; Kuikka 2016).

Yksinkertainen summamenetelmä (Kuikka & Syrjänen 2019) on helppo ymmärtää ja se soveltuu tilanteisiin, joissa tarkastellaan aputoimintoja tai järjestelmiä, joilla saadaan lisäarvoa varsinaisille sotilaallisille suorituskyyvyille. Esimerkiksi useat eri tietojärjestelmät tukevat vaikuttamisen suorituskkykyä, mutta kaikki eivät ole välttämättömiä varsinaiselle toiminnalle. Lisäksi eri tietojärjestelmien yhteisvaikutuksena syntyy hyötyä. Yksityiskohtaisemmassa menetelmässä (Kuikka 2019a) otetaan tarkemmin huomioon palveluiden keskinäinen riippuvuus rinnakkaisina tai peräkkäisinä rakenteina. Esimerkiksi tietojärjestelmien varajärjestelminä toimivat manuaalitoiminnot mallinnetaan rinnakkaisina rakenteina. Summamenetelmä on joissakin tilanteissa tämän menetelmän rajatapaus, kun rinnakkaisten palveluiden päällekkäisyyden vaikutusta ei vähennetä mallin matemaattisissa kaavoissa. Peräkkäisten eli pakollisten palveluiden tilanteessa yksinkertainen summamenetelmä ei yleensä ole toimiva. Suositeltavaa on käyttää tarkempaa menetelmää, jos sen tarvitsemat lähtötiedot ovat saatavilla ja summamenetelmän soveltuvuus ei ole perusteltavissa.

Kolmantena teoreettisena vaihtoehtona voidaan mainita sumea suorituskkykymalli, jossa ei ole tarkasti tunnistettu eri järjestelmien tai palveluiden päällekkäisyyksiä. Tätä kautta erilaisilla mallintamisen lähestymistavoilla on myönteys yhteys käytännön suunnittelutyössä eteen tuleviin käsitelmien soveltamisen ongelmiin, jotka edelleen heijastuvat suorituskkykyjen mallintamiseen.

Rajaukset

Tässä artikkelissa rajataan ulkopuolelle sotilaallisten suorituskkykyjen käsitelmien vertailu ja tutkiminen. Matemaattinen menetelmä soveltuu mille tahansa olemassa olevalle sotilaallisten suorituskkykyjen käsitelmille, joka toteuttaa käsitteiden erillisyyksivaatimuksen (Kosola 2013, 105–111; JETCD 2009). Hyvältä suorituskkykyjen käsitelmiltä voidaan vaatia, että suorituskkykyalueet ja niiden hierarkiassa alapuolella olevat suorituskkykyjen osa-alueet ovat erillisiä

eli niillä ei ole päällekkäisyyksiä. Jos päällekkäisyyksiä kuitenkin olisi, ne tulisi ottaa huomioon matemaattisen mallin kaavoissa. Suorituskykyjen matemaattinen mallintaminen siis rakentuu suorituskykyjen käsittemallin varaan, joten niillä on selvä yhteys keskenään. Jos matemaattinen mallintaminen tehdään suorituskyvyn hierarkian alatasoilla, esimerkiksi yksittäisten järjestelmien ja palveluiden suorituskyvyille, ylemmän tason käsittemallia ei tarvita.

Tämän artikkelin toisena rajauksena on matemaattiseen mallintamiseen keskittyminen, jolloin pyrkimyksenä ei ole oikeiden parametrien arvojen arviointi jossakin tietyssä operaatiossa. Tavoitteena on kuitenkin esitellä matemaattinen menetelmä siten, että laskelmat on mahdollista tehdä realistisilla lähtötiedoilla, kun ne ovat saatavilla.

Matemaattisen mallin käytännön sovelluksena esitetään kenttätykistön käyttötapaus. Aiheen käsittely rajataan järjestelmätasolle tarkasteltavassa tehtävässä tai operaatiossa. Esimerkkinä käytetty kenttätykistön käyttötapaus on mahdollisimman yksinkertainen ja sitä käytetään vain idean havainnollistamiseksi. Lisäksi esimerkissä on jätetty tarkastelun ulkopuolelle materiaalin siirtymistä kuvaavat toiminnot. Näistä tärkeimmät ovat tilausten perusteella tehtävät ampu-
matarvikkeiden toimitukset kuorma-autolla varastolta tuliasemiin ja ammunnat tulenjohtajan tulikomennossa ilmoitettuun maaliin. Monia muitakin liittyviä toimintoja, esimerkiksi tilannekuvan muodostamisessa, ei ole otettu yksinkertaistettuun malliin mukaan. Mallia on mahdollista laajentaa sisällyttämällä tärkeimpiä manuaalitoimintoja ja uusia tietojärjestelmiä. Rinnakkaiset manuaalitoiminnot ja järjestelmät mallinnetaan edellä mainitulla menetelmällä (Kuikka 2019a). Tässä artikkelissa esitetään periaatteet ja menetelmät laajemman mallin kehittämiseksi. Laajentaminen vaatii kuitenkin mallin lähtötietojen ja kaikkien uusien ominaisuuksien laskennassa tarvittavien lukuarvojen tarkempaa arviointia.

Suorituskykyjen matemaattisesta mallintamisesta

Todennäköisyyksien käsitteet

On olemassa kaksi tapaa todennäköisyyksien määrittelyyn. On tärkeää varmistaa, että järjestelmän omistajat ja mallintajat käyttävät samaa lähestymistapaa. Todennäköisyyksiä arvioitaessa valitaan tapa, joka on helpompi arvioida ja ymmärtää käsitteellisesti oikein. (Florescu 2015; Parnell 2017.)

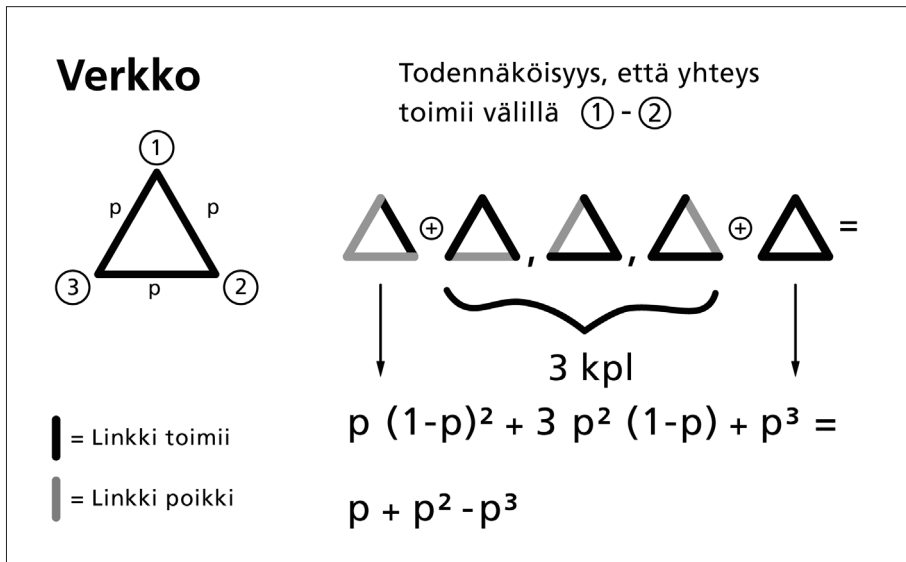
Todennäköisyydet voidaan mallintaa joko varsinaisina todennäköisyyksinä P_v , P_p , P_s tai ehdollisina todennäköisyyksinä P_v , $P_p(p_p | P_v)$, $P_s(p_s | P_p P_v)$. Ala-indeksit v , p ja s viittaavat verkon toimivuuteen, palvelun saatavuuteen ja

suorituskykyyn. Ehdolliset todennäköisyydet arvioidaan oletuksella, että edeltävät tapahtumat onnistuvat, esimerkiksi palvelun saatavuuden ehdollinen todennäköisyys arvioidaan olettaen, että verkko toimii. Todennäköisyyksien välinen suhde on seuraava: P_v on verkon toimivuuden todennäköisyys, $P_p = P_p(p_p | P_v)P_v$ on palvelun saatavuuden todennäköisyys ja $P_s = P_s(p_s | P_p)P_p = P_s(p_s | P_p P_v)P_p(p_p | P_v)P_v$ on suorituskyky. Jäljempänä tässä artikkelissa käytetään matemaattisten kaavojen sijasta kuvaavampia merkintöjä: $V = P_v$, $P = P_s$ ja $S = P_s$. Merkinnät ilmaisevat mallinnuksessa määrittelyn konvention mukaisesti joko varsinaisia todennäköisyyksiä tai ehdollisia todennäköisyyksiä.

Verkon yhteyksien mallintaminen

Kuvassa 1 on esitetty matemaattinen malli yksinkertaisen esimerkkiverkon kahden solmun väliselle yhteydellisyydelle. Huomataan, että verkossa on kaksi vaihtoehtoista reittiä solmujen 1 ja 2 välille. Matemaattinen malli huomioi kaikki verkosta löytyvät reitit solmujen välillä. Oletetaan, että kaikkien verkon solmujen välisten linkkien toimivuudella on sama todennäköisyys p . Tässä symmetrisessä tapauksessa yksittäisen toimivan linkin todennäköisyydet ovat samoja väleillä 1-2, 2-3 ja 3-1. Kun yhteydellisyyttä solmujen s ja t välillä merkitään Y_{s-t} , kuvan esimerkissä $Y_{1-2} = Y_{2-3} = Y_{3-1}$.

Kuvassa 1 on esitetty kaikki mahdollisuudet, joissa on yhteys solmujen 1 ja 2 välillä. Viisi toisensa pois sulkevaa vaihtoehtoa voidaan merkitä 1-2,



Kuva 1: Matemaattinen malli verkon solmujen 1 ja 2 väliselle yhteydellisyydelle.

3–1–2, 1–2–3, 1–3–2 ja 1–2–3–1. Linkin toimivuuden todennäköisyys oletetaan suunnasta riippumattomaksi eli merkintä 1–2 on sama kuin 2–1 ja niin edelleen. Tiedonsiirtoverkoissa voi olla mahdollista, että linkin toimivuuden todennäköisyys riippuu myös suunnasta. Tällöin mallia sovelletaan vastaavalla tavalla, mutta yhteyden suunta huomioon ottamalla. (Colbourn 1987; Ball ym. 1995; Kuikka 2019b.)

Kuvassa 1 viisi vaihtoehtoa on ryhmitelty siten, että verkon solmujen välillä on yhteensä yksi toimiva linkki, kaksi toimivaa linkkiä ja kolme toimivaa linkkiä. Vaihtoehtoja, joissa on kaksi toimivaa linkkiä (ja yksi ei-toimiva linkki) on kolme kappaletta. Kuvassa on esitetty matemaattisen kaavan johtaminen. Esimerkiksi yhden toimivan linkin ja kahden ei-toimivan linkin todennäköisyys on $p(1-p)(1-p) = p^1(1-p)^2$, missä potensseissa esiintyvät linkkien lukumäärät 1 ja 2 vastaavat todennäköisyydellä p toimivaa yhtä linkkiä 1–2 ja todennäköisyydellä $(1-p)$ ei-toimivia kahta linkkiä 1–3 ja 3–2. Yhteydellisyydelle Y_{1-2} eli solmuparin 1–2 yhteyden toimivuuden todennäköisyydelle saadaan seuraava matemaattinen kaava

$$Y_{1-2} = p + p^2 - p^3.$$

Edellisestä tarkastelusta huomataan, että vastaavalla tavalla voidaan laskea tilanteita, joissa solmujen välisten linkkien toimivuuden todennäköisyydet ovat keskenään eri suuria ja yhteyden suunnasta riippuvaisia. Nämäkin tilanteet ovat käytännön tiedonsiirtoverkoissa yleisiä.

Jos linkkien toimivuudet ovat suunnasta riippuvia, saadaan seuraava kaava yhteydellisyydelle Y_{1-2} . Jos linkkien toimivuudet ovat yhtä suuria, sijoittamalla $p = p_{12} = p_{13} = p_{32}$ saadaan kuvan 1 ja edellisen kaavan yksinkertainen muoto.

$$Y_{1-2} = p_{12}(1-p_{13})(1-p_{32}) + p_{12}p_{13}(1-p_{32}) + p_{12}p_{32}(1-p_{13}) + p_{13}p_{32}(1-p_{12}) + p_{12}p_{13}p_{32}$$

Kun tätä yhteyttä tarkastellaan suuntaan 1–2, todetaan etteivät linkkien suunnatut toimivuudet p_{31} , p_{23} ja p_{21} vaikuta tulokseen. Ne kuitenkin vaikuttavat yhteydellisyyteen Y_{2-1} ja muiden solmujen välisiin yhteydellisyyksiin.

Dataviljely-menetelmä

Matemaattinen malli tarvitsee aina lähtöarvot mallissa käytetyille parametreille. Tarvittavien lähtöarvojen arvioiminen voi kuitenkin olla käytännössä vaikeaa, jolloin yhtenä ratkaisuna voidaan käyttää dataviljely-menetelmää (Horne & Schwierz 2008). Dataviljely-menetelmässä lasketaan matemaattisen mallin

avulla tuloksia muuttamalla parametrien arvoja sopivalla vaihteluvälillä ja esitetään tulokset graafisesti tai taulukkomuodossa parametrin arvon funktiona. Tämä antaa mahdollisuuden käyttää mallin tuloksia jälkeen päin eri tilanteissa ja lisäksi on mahdollista tehdä ”Mitä jos” -tarkasteluita (Suojaanen ym. 2014).

Kenttätykistön käyttötapauksen mallintaminen

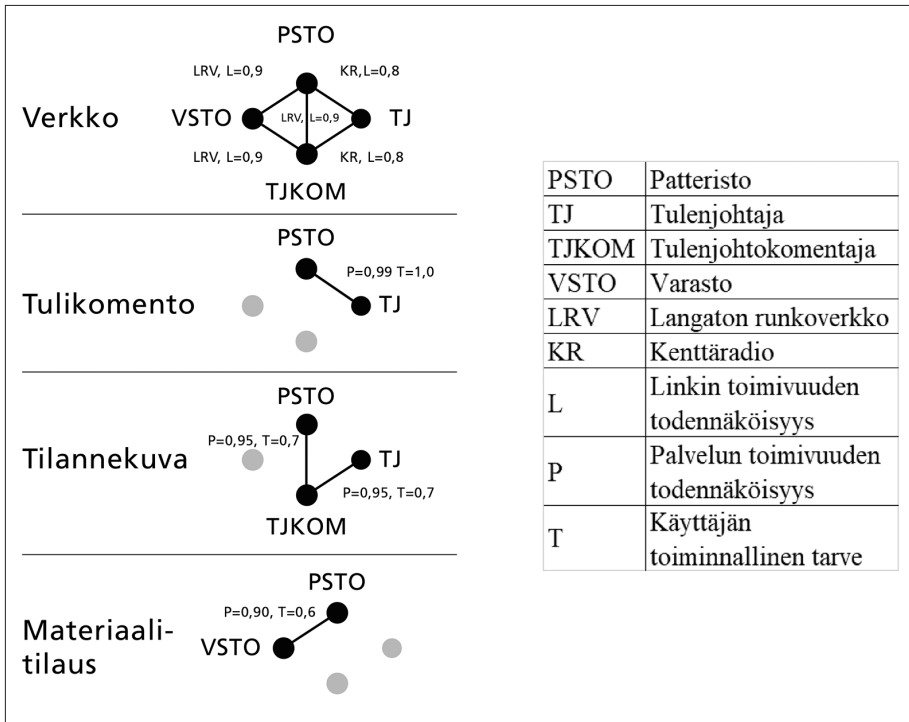
Mallinnettava järjestelmä

Kenttätykistön käyttötapaus mallinnettiin karkealla tasolla, siten että malliin sisällytettiin keskeiset toimijat, sekä heidän tehtävässään käyttämänsä ja tarvitsemansa palvelut tiedonsiirtoyhteydet mukaan lukien. Käytetty malli on esitetty kuvassa 2. Huomattakoon, että kuvassa esitetyn kenttätykistön esimerkkitapauksen lähtöarvot ovat kuvitteellisia.

Langattoman runkoverkon linkkien toimivuudelle on annettu suurempi todennäköisyys kuin kenttäradioverkon linkkien toimivuudelle. Lisäksi on oletettu, että langaton runkoverkko ja kenttäradioverkko integroituvat yhdeksi kokonaisuudeksi, jossa kaikkia mahdollisia yhteyksiä eri solmujen väleillä voidaan hyödyntää.

Kenttätykistön käyttötapauksessa on oletettu, että käytetyt palvelut ovat sanomapohjaisia ja hyödyntävät sanomanvälitysjärjestelmää. Sanomapohjaisten palveluiden toimivuus riippuu käytännössä sanomien oikea-aikaisesta toimituksesta sanomien vastaanottajille. Sanomanvälitysjärjestelmässä sanomat voidaan priorisoida ennalta asetetuilla palvelunlaatuluokilla, joita voi olla esimerkiksi kriittinen, tärkeä ja perus. Sanomanvälitysjärjestelmän ruuhka- tai vikatilanteessa korkeamman prioriteetin sanoma menee todennäköisemmin perille vastaanottajalle ja pienellä viiveellä, kun taas alhaisemman prioriteetin sanoma voi jäädä kokonaan toimittamatta, tai saapuu perille isommalla viiveellä.

Palveluiden käyttämät sanomat luokitellaan kuuluviksi eri palvelunlaatuluokoihin, joilla on eri prioriteetit keskenään. Tällöin sanomanvälitysjärjestelmä tarjoaa palveluille toisiinsa verrattuna erilaisen palvelutason, mikä vaikuttaa suoraan palvelun toimivuuteen (todennäköisyyteen). Mallinnuksessa palvelut luokiteltiin seuraavasti: Tulikomento (kriittinen), Tilannekuva (tärkeä), Materiaalitilaus (perus). Korkeamman palvelunlaatuluokan palvelun toimivuudella on suurempi todennäköisyys kuin sitä matalamman palvelunlaatuluokan palvelulla. Materiaalitilauspalvelun merkittävin toiminnallisuus on amputarvikkeiden tilaaminen varastosta tuliasemiin.



PSTO	Patteristo
TJ	Tulenjohtaja
TJKOM	Tulenjohtokomentaja
VSTO	Varasto
LRV	Langaton runkoverkko
KR	Kenttäradio
L	Linkin toimivuuden todennäköisyys
P	Palvelun toimivuuden todennäköisyys
T	Käyttäjän toiminnallinen tarve

Kuva 2: Kenttätyökistön käyttötapauksen toimijat, verkko ja palvelut mallinnettu karkealla tasolla.

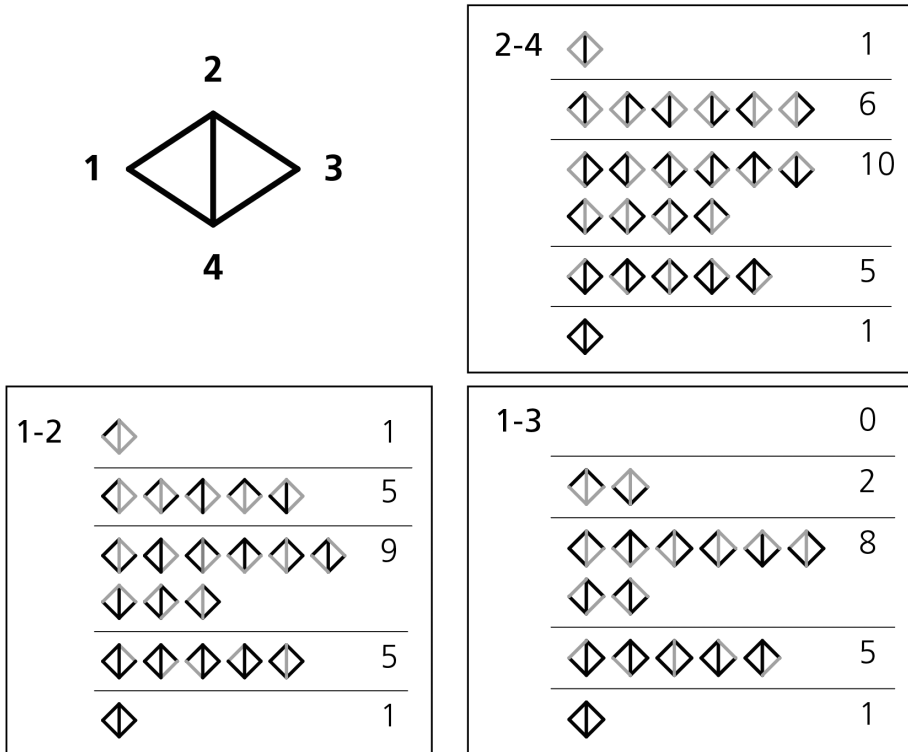
Verkon yhteydet

Kuvassa 3 esitetään verkon solmujen välisen yhteydessä laskennan perusta. Kuvassa käytetään samaa mallia, mikä esiteltiin kuvan 1 yhteydessä. Kuvassa on esitetty vain kolmen solmuparin (1–2, 2–4 ja 1–3) yhteydessä, koska muiden solmuparien yhteydessä ovat samoja kuin jokin näistä kolmesta. Kuvia 1 ja 3 vertaamalla huomataan, että vain yhden solmun lisäys verkon solmujen määrässä kasvattaa huomattavasti erilaisten vaihtoehtojen määrää. Solmuparien välinen toimiva yhteys yhden, kahden, kolmen, neljän ja viiden verkossa samalla hetkellä toimivan yksittäisen linkin eri vaihtoehtojilla on kuvattu riveittäin.

Huomataan, että yksinkertaiselta vaikuttava esimerkiverkko ei matemaattisesti tarkasteluna olekaan niin yksinkertainen. Kyseisen esimerkiverkon solmuparien yhteydessä laskentaan oli järkevintä käyttää tähän tarkoitukseen kehitettyä tietokoneohjelmaa (Kuikka & Syrjänen 2019) vaikkakin yhteydessä voitaisiin vielä laskea manuaalisesti, kuten yksinkertaistettuna on

seuraavaksi havainnollistettu. Tietokoneohjelmalla lasketut todennäköisyydet solmuparien välisille yhteydellisyyksille, eli verkon toimivuudelle (V), on esitetty taulukossa 1.

Kuvan 3 avulla lasketaan yhteydellisyyden arvot solmuparien välillä. Oletetaan, että kaikkien verkon solmujen välisten linkkien toimivuudella on sama todennäköisyys p , mikä on vastoin kenttätykistön käyttötapausta, mutta



Kuva 3: Verkon solmujen välisen yhteydellisyyden laskennan perusta.

Taulukko 1: Verkon toimivuuden (V) todennäköisyydet solmuparien välillä.

solmu 1 \ solmu 2	VSTO	PSTO	TJ	TJKOM
VSTO	100 %	99 %	95 %	99 %
PSTO	99 %	100 %	96 %	99 %
TJ	95 %	96 %	100 %	96 %
TJKOM	99 %	99 %	96 %	100 %

yksinkertaistamisen avulla matemaattiset kaavat ovat lukijalle helpommin ymmärrettävissä. Käyttämällä mahdollisten yhteydellisten vaihtoehtojen lukumääriä 1, 5, 9, 5 ja 1, solmujen 1 ja 2 väliseksi yhteydellisyydeksi saadaan

$$Y_{1-2} = p(1-p)^4 + 5p^2(1-p)^3 + 9p^3(1-p)^2 + 5p^4(1-p)^1 + p^5.$$

Lausekkeesta voidaan laskea yhteyden toimivuudelle polynomi vierekkäisten solmujen välisen linkin toimivuuden todennäköisyyden p funktiona

$$Y_{1-2} = p^2 + 2p^3 - 3p^4 + p^5.$$

Vastaavasti saadaan solmuparien 2–4 ja 1–3 yhteydellisyyksille kaavat

$$Y_{2-4} = 4p^3 - 4p^4 + p^5$$

$$Y_{1-3} = 2p^2 + 2p^3 - 5p^4 + 2p^5.$$

Yhteydellisyyden kaavat ovat polynomeja, joiden asteluku on korkeintaan linkkien lukumäärä verkossa. Edellä oletettiin, että verkon solmujen välisten linkkien toimivuus on p . Yleisemmässä tapauksessa linkkien toimivuudet voivat olla eri suuria ja suunnasta riippuvia. Tällöin kaavoista tulee monimutkaisempia, sillä termejä ei voida niin paljoa yhdistellä.

Palvelutason riittävyys

Palveluiden toimivuus P (taulukko 2) määriteltiin perustuen aiemmin mainittuun palvelunlaatuokitteluun. Sanomapohjaisen palvelun tuottaja on sanomien lähettäjä ja palvelun käyttäjä on sanomien vastaanottaja.

Kunkin palvelun saatavuus on mallinnettu verkon toimivuuden (V) ja kunkin palvelun toimivuuden (P) tulona. Palvelun palvelutason riittävyys on mallinnettu palvelun saatavuuden ja loppukäyttäjien palvelutarpeen (T) erotuksena. Nämä on esitetty palveluittain taulukossa 3, josta huomataan, että

Taulukko 2: Palveluiden toimivuuden (P) todennäköisyydet.

Tilannekuva	95 %
Tulikomento	99 %
Materiaalitilaus	90 %

Tilannekuva- ja Materiaalitilauspalvelun palvelutaso on riittävä. Taulukosta nähdään myös Tulikomentopalvelun osalta se, että palvelu ei täytä täysin loppukäyttäjän asettamaa vaatimusta. Mikäli palvelun tulee olla kaikkina ajanhetkinä 100 % varmasti loppukäyttäjän käytettävissä on siihen luotava vaihtoehtoisia ja varmentavia järjestelyjä.

Järjestelmän kaikkien palveluiden palvelutason ylittäessä tarpeen voidaan järjestelmän arvioida olevan riittävän suorituskykyinen myös käyttäjien näkökulmasta. Yhdenkin palvelun palvelutason alittaessa tarpeen on riski, että käyttäjän tekemä tehtävä epäonnistuu.

Suorituskyky

Tässä artikkelissa olemme hahmotelleet todennäköisyyksiin perustuvaa määrällistä suorituskyvyn määritelmää, joka on yhteensopiva Puolustusvoimien nykyisen käsitelmäärittelyn kanssa.

Suorituskyky määritellään tässä artikkelissa todennäköisyytenä, että sotilallinen operaatio tai tehtävä saadaan onnistuneesti toteutettua. Edellä käsiteltiin palvelutasoa ja sen riittävyttä. Taulukon 3 laskennan tuloksena saatiin, että palvelutaso oli riittävä tilannekuva- ja materiaalitilauspalvelun osalta, mutta tulikomentopalvelun palvelutaso ei ollut riittävä, vaan se jäi 5 % vajaaksi. Loppukäyttäjän tarve oli asetettu erittäin korkeaksi (100 %), joka ei aivan toteutunut. Tilannekuva- ja materiaalitilauspalveluiden loppukäyttäjän tarve oli alhaisempi (60 % – 70 %), joka mallin tulosten mukaan pystyttiin saavuttamaan tietoliikenneverkkojen ja tietoteknisten palveluiden palvelutasoilla.

Palvelutarpeen toteutumisella eli tarpeen ylittymisellä tai alittumisella on yhteys suorituskykyyn. Tarkastellaan seuraavaksi jotain valittua taulukon 3 elementtiä, esimerkiksi tulikomentopalvelua tuottajalta Tulenjohtaja (TJ) käyttäjälle Patteristo (PSTO). Merkitään palvelun saatavuutta $V \cdot P = e + T$, missä T on palvelutarve ja e on palvelun saatavuuden ja palvelutarpeen erotus. Oletetaan aluksi yksinkertainen malli suorituskykyä kuvaavalle funktiolle $S(V \cdot P) = V \cdot P \cdot S = S \cdot (e + T)$, missä on käytetty aikaisemmin määriteltyjä merkintöjä (kappale: Todennäköisyyksien käsitteet). Kun $e = 0$, tarve T ja palvelun saatavuus $V \cdot P$ ovat samansuuruisia. Esimerkissä tulikomentopalvelun tuottajalta TJ käyttäjälle PSTO on todennäköisyysarvot $V = 0.96$, $P = 0.99$, $V \cdot P = 0.95$, $T = 1.0$ ja $e = -0.05$.

Voidaan ajatella, että palvelun saatavuutta ja suorituskykyä on mahdollista nostaa joko verkon toimivuutta tai palvelun toimivuutta kasvattamalla. Näin saavutettaisiin parhaimmillaan palvelutarpeen vajeus $e = -0.01$ tai $e = -0.04$. Vastaavalla tavalla voidaan laskea erilaisia verkon ja palvelun toimivuuden yhteisvaikutuksia palvelutarpeen toteutumiselle.

Taulukko 3: Tilannekuva-, tulikomento- ja materiaalitilauspalvelun saatavuus, tarve ja palvelutason riittävyys.

Tilannekuva				
Palvelun saatavuus (V-P)				
tuottaja\käyttäjä	VSTO	PSTO	TJ	TJKOM
VSTO	95 %	94 %	90 %	94 %
PSTO	94 %	95 %	91 %	94 %
TJ	90 %	91 %	95 %	91 %
TJKOM	94 %	94 %	91 %	95 %
Palvelun tarve (T)				
tuottaja\käyttäjä	VSTO	PSTO	TJ	TJKOM
VSTO	0 %	0 %	0 %	0 %
PSTO	0 %	0 %	0 %	70 %
TJ	0 %	0 %	0 %	70 %
TJKOM	0 %	0 %	70 %	0 %
Palvelutason riittävyys (ylitys/alitus)				
tuottaja\käyttäjä	VSTO	PSTO	TJ	TJKOM
VSTO	0 %	0 %	0 %	0 %
PSTO	0 %	0 %	0 %	24 %
TJ	0 %	0 %	0 %	21 %
TJKOM	0 %	0 %	21 %	0 %

Materiaalitilaus				
Palvelun saatavuus (V-P)				
tuottaja\käyttäjä	VSTO	PSTO	TJ	TJKOM
VSTO	90 %	89 %	85 %	89 %
PSTO	89 %	90 %	86 %	89 %
TJ	85 %	86 %	90 %	86 %
TJKOM	89 %	90 %	86 %	90 %
Palvelun tarve (T)				
tuottaja\käyttäjä	VSTO	PSTO	TJ	TJKOM
VSTO	0 %	0 %	0 %	0 %
PSTO	60 %	0 %	0 %	0 %
TJ	0 %	0 %	0 %	0 %
TJKOM	0 %	0 %	0 %	0 %
Palvelutason riittävyys (ylitys/alitus)				
tuottaja\käyttäjä	VSTO	PSTO	TJ	TJKOM
VSTO	0 %	0 %	0 %	0 %
PSTO	29 %	0 %	0 %	0 %
TJ	0 %	0 %	0 %	0 %
TJKOM	0 %	0 %	0 %	0 %

Tulikomento				
Palvelun saatavuus (V-P)				
tuottaja\käyttäjä	VSTO	PSTO	TJ	TJKOM
VSTO	99 %	98 %	94 %	98 %
PSTO	98 %	99 %	95 %	98 %
TJ	94 %	95 %	99 %	95 %
TJKOM	98 %	98 %	95 %	99 %
Palvelun tarve (T)				
tuottaja\käyttäjä	VSTO	PSTO	TJ	TJKOM
VSTO	0 %	0 %	0 %	0 %
PSTO	0 %	0 %	0 %	0 %
TJ	0 %	100 %	0 %	0 %
TJKOM	0 %	0 %	0 %	0 %
Palvelutason riittävyys (ylitys/alitus)				
tuottaja\käyttäjä	VSTO	PSTO	TJ	TJKOM
VSTO	0 %	0 %	0 %	0 %
PSTO	0 %	0 %	0 %	0 %
TJ	0 %	-5 %	0 %	0 %
TJKOM	0 %	0 %	0 %	0 %

Taulukosta 3 voidaan laskea myös toinen hyödyllinen esimerkki. Tilannekuvapalvelu on riittävä sekä tuottajalta PSTO käyttäjälle Tulenjohtokomentaja (TJKOM) ($e = +0.24$), tuottajalta TJ käyttäjälle TJKOM ($e = +0.21$) että tuottajalta TJKOM käyttäjälle TJ ($e = +0.21$). Riittävä tilannekuvapalvelun taso saavutetaan, vaikka tilannekuvapalvelun toimivuus P alenisi nykyisestä arvosta 0.95 arvoon 0.73. Analyysi voidaan tehdä niin sanotun ”heikoimman lenkin” periaatteella, jolloin alentuneellakin palvelun toimivuudella osa käyttäjistä saa edelleen tarpeen ylittävää palvelua. Toinen vaihtoehto on tarkastella ovatko joidenkin palveluiden tarpeet arvioitu liian korkeiksi, jolloin tarkempi tarpeiden säätäminen voi johtaa optimaalisempaan suorituskykyyn.

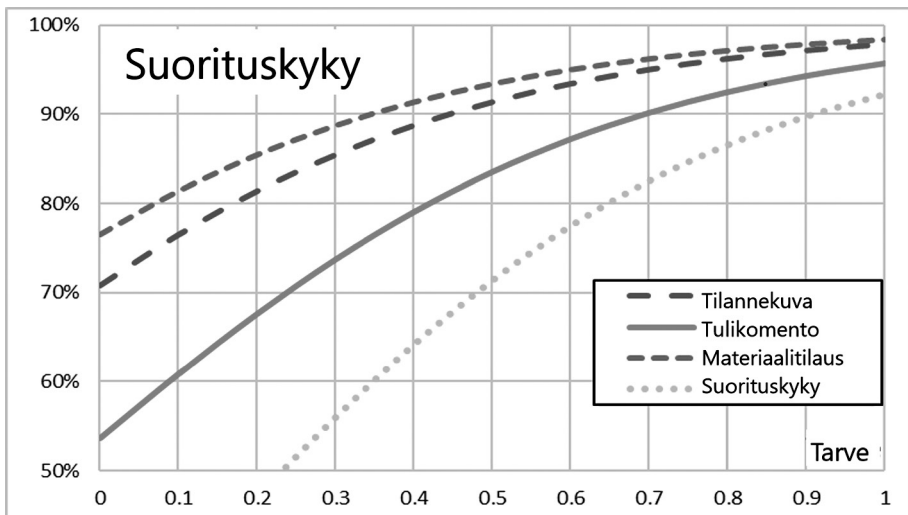
Tässä esitetyt esimerkit ovat hyvin yksinkertaisia, mutta monimutkaisemmassa verkkorakenteessa tai suunnasta riippuvien yhteyksien ja palveluiden tilanteessa, voidaan tutkia mitä verkon tai palveluiden elementtien toimivuutta parantamalla ja varmistamalla voidaan optimaalisesti kasvattaa palveluiden saatavuutta ja suorituskykyä. Tarkastelu voidaan viedä yksittäisten järjestelmien ja palveluiden tasolta koko operaation tasolle, kuten artikkeleissa (Kuikka & Suojanen 2014; Kuikka 2019a; Suojanen ym. 2014; Kuikka 2016) on tehty. Kenttätyökistön esimerkissä yksinkertainen maksimoitava kokonaissuorituskyky muodostetaan tilannekuva-, tulikomento- ja materiaalitilaspalveluiden suorituskyvyistä.

Jotta saisimme esimerkin matemaattisesta mallista suorituskyvyille, tehdään kaksi oletusta. Oletetaan ensiksi, että taistelun voiton todennäköisyydeltä on vaadittu arvoa a^3 , kun palvelutarpeita on arvioitu kolmelle palvelulle. Toiseksi oletetaan, että tilannekuva-, tulikomento- ja materiaalitilaspalvelut ovat statistisesti riippumattomia niiden toimivuuden todennäköisyyden kannalta. Yksinkertainen lineaarinen malli kokonaissuorituskyvyille, joka ottaa huomioon kyseiset kolme osasuorituskykyä on $a_1 \cdot 0.7 \cdot a_2 \cdot 0.95 \cdot a_3 \cdot 0.6 = a^3$. Koska tarpeet palveluille on arvioitu tasapainoisesti tavoitteena sama kokonaissuorituskyky, voidaan päätellä, että $a_1/a_2 = 0.95/0.70$ ja $a_2/a_3 = 0.60/0.95$. Kiinnitetään a :lle esimerkiksi arvo $a^3 = 0.95^3$ saadaan tuntemattomille kertomille arvot $a_1 = 1.35$, $a_2 = 1.00$ ja $a_3 = 1.59$.

Realistisempi malli kokonaissuorituskyvyille olisi esimerkiksi logistiseen funktioon perustuva malli, joka huomioi paremmin suorituskyvyn hitaamman muuttumisen pienillä kuin suurilla muuttujan arvoilla. Logistisessa funktiossa muuttujana on tässä yhteydessä tarve (kuva 4). Logistinen funktio (Kuikka 2019a) on muotoa

$$f_p(x) = \frac{L}{1 + e^{-k(x-x_p)}} .$$

Yhtälössä L on käyrän maksimiarvo, x_p on käyrän keskipiste ja k on logistinen kasvukerroin. Kaavan e on Neperin luku. Kullakin palvelulla $p = 1, 2, 3$ on oma suorituskykyfunktio. Funktioiden parametrit määritetään siten, että $f_1(0.7) = f_2(1.0) = f_3(0.6)$. Kuvassa 4 on esimerkki, joka toteuttaa ehdon parametrien arvoilla $x_1 = -0.3$, $x_2 = -0.05$ ja $x_3 = -0.4$, kun logistinen kasvukerroin $k = 2.95$ on oletettu kaikille kolmelle käyrälle.



Kuva 4. Esimerkki logistisen funktion käytöstä suorituskykyjen mallintamisessa. Alin käyrä (Suorituskyky) on osasuorituskykyjen tulo (kolme ylintä käyrää).

Yhteenveto

Tässä artikkelissa esitellään suorituskykyjen matemaattista mallintamista kenttätyökistön käyttötapauksen avulla. Tarkasteltavan järjestelmän palvelut ovat tilannekuva, tulenkäytön johtaminen ja materiaalitilaukset. Palveluiden tuottajia ja käyttäjiä ovat patteristo, tulenjohtaja, tulenjohtokomentaja ja varasto. Palveluita käytetään tiedonsiirtoverkon kautta verkon solmuissa sijaitsevista tietoteknisistä palvelimista.

Matemaattinen mallintaminen perustuu kerrokselliseen lähestymistapaan. Tiedonsiirtoverkko on fyysisenä rakenteena alimmaisena. Konkreettisten esimerkkien avulla esitetään, miten solmujen välinen yhteydessisyys voidaan laskea missä tahansa verkossa. Kuitenkin laajempien kompleksisten verkkorakenteiden laskentaan tarvitaan tietokoneohjelmia. Verkon solmuissa mallinnetaan

verkon palveluiden saatavuutta ja edelleen kolmantena tasona voidaan mallintaa suorituskykyjä. Suorituskyky on tässä artikkelissa määritelty todennäköisyytenä samoin kuin verkon toimivuuden ja palveluiden saatavuuden todennäköisyydet. Suorituskykyjen laskennan vaatimien lähtöarvojen arviointi voi olla vaikeaa, jolloin mallintaminen ja laskenta voidaan jättää palvelutarpeiden ja tarpeiden täyttymisen arvioinnin tasolle. Useissa tapauksissa tämä on käytännön kannalta riittävää. Uutena tutkimustuloksena käsitellään palvelutarpeiden mallintamista ja niiden yhteyttä suorituskykyihin. Dataviljely-menetelmän avulla suorituskykyjen laskentaa voidaan kuitenkin tehdä, vaikka tarkkoja lähtöarvoja ei olisikaan käytettävissä.

Suorituskyvyt muodostuvat useiden tekijöiden yhteisvaikutuksena. Kenttätykistön käyttötapauksen mallintaminen on esimerkki, jota voi laajentaa muilla siihen liittyvillä aputoiminnoilla ja järjestelmillä. Samat suorituskykyjen mallintamisen menetelmät toimivat myös muissa Puolustusvoimien toimintaympäristöissä. Mallintaminen voidaan tehdä erilaisilla tasoilla alkaen sotilaallisen suorituskyvyn kyvykkyysalueista ja päätyen yksittäisten järjestelmien ja palveluiden tarkasteluun. Mallintamisen kohde voidaan valita sen mukaan, mitä vaihtoehtoisia suorituskykyjä, skenaarioita, järjestelmiä tai joukkoja halutaan tutkia ja vertailla. Suorituskykyjen mallintaminen on menetelmä ilmiöiden paremmaksi ymmärtämiseksi ja työkalu sekä suorituskykyjen suunnitteluun, että niiden analysointiin operatiivisissa käyttötilanteissa.

Viitteet

- 1 NATO:n laatiman määritelmän mukaan käsite “capability” tarkoittaa seuraavaa: “The ability to create an effect through employment of an integrated set of aspects categorized as doctrine, organization, training, materiel, leadership development, personnel, facilities, and interoperability.” (NATO 2019, 23)

Lähteet

- Ball, Michael O., Charles J. Colbourn & J. Scott Provan (1995). Network Reliability. Teoksessa Michael O. Ball, T.L. Magnanti, C.L. Monma & G.L. Nemhauser (toim.), *Handbooks in Operations Research and Management Science, Network Models, Volume 7*, Netherlands: Elsevier B.V., 673–762.
- Colbourn, C. J. (1987). *The Combinatorics of Network Reliability*. New York: Oxford University Press.
- Dupuy, T. N. (1979). *Numbers, prediction, and war: Using history to evaluate combat factors and predict the outcome of battles*. Indianapolis: Bobbs-Merrill.
- Florescu, Ionut (2015). *Probability and Stochastic Processes*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.

- Horne, Gary & Klaus-Peter Schwierz (2008). Data Farming Around the World Overview. Teoksessa S. J. Mason, R. R. Hill, L. Mönch, O. Rose, T. Jefferson & J. W. Fowler (toim.), *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*. IEEE: Miami, Florida, 1442–1447.
- JETCD, Joint Experimentation, Transformation, and Concepts Division (2009). *Joint Capability Areas (JCA)*. U.S. Department of Defense, Joint Staff J7.
- Kosola, Jyri (2013). *Vaatimustenhallinnan opas*. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos, Julkaisusarja 5, 12. Tampere: Maanpuolustuskorkeakoulu.
- Kuikka, Vesa & Marko Suojanen (2014). Modelling the Impact of Technologies and Systems on Military Capabilities. *Journal of Battlefield Technology*, 17(2), 9–16.
- Kuikka, Vesa (2015). A Combat Equation Derived from Stochastic Modeling of Attrition Data. *Military Operations Research*, 20(3), 49–69.
- Kuikka, Vesa (2016). Number of System Units Optimizing the Capability Requirements through Multiple System Capabilities. *Journal of Applied Operational Research*, 8(1), 26–41.
- Kuikka, Vesa (2017). Decision Boundaries Used to Model Probability of Victory and Duration of Combats. *Journal of Applied Operational Research*, 9(1), 67–81.
- Kuikka, Vesa & Matti Syrjänen (2019). *Modelling Utility of Networked Services in Military Environments*. International Conference on Military Communications and Information Systems, ICMCIS 2019.
- Kuikka, Vesa (2019a). *Methods for Modeling Military Capabilities*. IEEE Systems Conference, Syscon 2019.
- Kuikka, Vesa (2019b). *Modeling Network Resilience and Utility of Services*. IEEE Systems Conference, Syscon 2019.
- NATO (2019). *AAP-06 Edition 2019, NATO GLOSSARY OF TERMS AND DEFINITIONS (ENGLISH AND FRENCH)*.
- Parnell, G. S. (2017). *Trade-off Analytics, Creating and Exploring the System Tradespace*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Suojanen, Marko, Vesa Kuikka, Pasi Siivonen, Juha-Pekka Nikkarila, Juhani Hämäläinen, Tommi Laari, Mika Mattila, Tuomo Rusila, Konsta Teittinen & Timo Vestama (2014). Hierarchic Technology Forecasting Model – What Can Be Data Farmed? *Scythe: Proceedings and Bulletin of the International Data Farming Community*, Issue 15, Workshop 27, 30–33.