

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

**ENERGIA-ASEIDEN KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET JALKAVÄEN TAISTELUSSA
2030-LUVULLA**

Pro Gradu

Yliluutnantti
Emil Ekblad

Sotatieteiden maisterikurssi 11
Maasotalinja

Maaliskuu 2023

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi Sotatieteiden maisterikurssi 11	Linja Maasotalinja
Tekijä Yliluutnantti Emil Ekblad	
Tutkielman nimi ENERGIA-ASEIDEN KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET JALKAVÄEN TAISTELUSSA 2030-LUVULLA	
Oppiaine johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka Maanpuolustuskorkeakoulun kirjasto
Aika Maaliskuu 2023	Tekstisivuja 69 Liitesivuja 2
<p>TIIVISTELMÄ</p> <p>Suunnatun energian aseita (directed energy weapons, DEW) on kehitetty maailmalla jo pitkään, mutta niitä ei ole saatu otettua vielä laajamittaisesti operatiiviseen käyttöön. Viime vuosien aikana kuitenkin uudenlaisten uhkien, kuten miehittämättömien lennokkien yleistymisen on lisännyt kiinnostusta energia-aseiden kehitystä kohtaan ja tuonut energia-aseet lähemmäs operatiivista käyttöönottoa.</p> <p>Tässä tutkimuksessa selvitettiin suunnatun energian aseiden käyttömahdollisuuksia jalkaväen taistelussa 2030-luvulla. Tutkimusmenetelmänä käytettiin laadullista kirjallisuusselvitystä sekä skenaarioanalyysiä. Näkökulmana tutkimuksessa oli energia-aseiden käyttämisen mahdollisuudet jalkaväkijoukkueen ja -komppanian näkökulmasta.</p> <p>Tutkimuksen päätutkimuskysymyksenä oli ”Millaisia käyttömahdollisuuksia energia-aseilla on jalkaväen taistelussa 2030-luvulla?” Tutkimuksen pääkysymykseen vastattiin alakysymyksillä, jotka olivat ”Millaista on jalkaväen taistelu 2030-luvulla?”, ”Millaisia energia-asejärjestelmiä on kehitteillä ja mikä on arvio niiden kehityksen vaiheesta 2030-luvulla?” sekä ”Mitä vaatimuksia ja rajoitteita energia-aseiden käytöllä on jalkaväen taistelun näkökulmasta?”</p> <p>Tutkimuksessa keskityttiin laser- ja mikroaaltoaseisiin, sillä nämä teknologiat ovat suunnatun energian aseista kehitetty pisimmälle. Laser- ja mikroaaltoaseiden osalta tutkittiin niiden toimintaperiaatteita, vuorovaikutusta ympäristön ja kohteiden kanssa sekä järjestelmien suorituskykyvaatimuksia.</p> <p>Jalkaväen taistelun kannalta selvitettiin jalkaväen taisteluun ja sen kehitykseen vaikuttavia trendejä 2030-luvulle mentäessä. Yhdistämällä arviot energia-aseiden suorituskyvyistä ja jalkaväen taistelun asettamista vaatimuksista muodostettiin mahdollisia tulevaisuuden kehityskulkuja kuvaavia skenaarioita.</p> <p>Tutkimuksen mukaan energia-aseiden käyttö jalkaväen taistelussa 2030-luvulla on mahdollista, mutta hyvin rajoittunutta. Pääasialliset käyttökohteet liittyvät joukkojen suojaamiseen UAV-uhkia vastaan. Arvion mukaan jalkaväen käytössä olevat energia-aseet ovat suhteellisen matalatehoisia ajoneuvoihin asennettuja asejärjestelmiä, ja tehokkaammat energia-aseet vaativat alustakseen edelleen raskaan ajoneuvon. Laseraseet ovat arvion mukaan kehityksessä huomattavasti mikroaaltoaseita edellä.</p>	
<p>AVAINSANAT</p> <p>Energia-ase, jalkaväki, laser, DEW, HEL, HPM</p>	

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO.....	1
1.1.	TUTKIMUSTILANNE.....	2
1.2.	KÄSITTEET, MÄÄRITELMÄT JA LYHENTEET.....	4
1.3.	TUTKIMUSTEHTÄVÄ.....	5
1.4.	NÄKÖKULMAT JA RAJAUKSET.....	5
1.5.	TUTKIMUKSEN MENETELMÄT JA RAKENNE.....	7
1.6.	LÄHDEMATERIAALI.....	10
2.	JALKAVÄEN TAISTELU.....	12
2.1.	TOIMINTAYMPÄRISTÖ.....	12
2.2.	TEKNOLOGISEN KEHITYKSEN ARVIOINTI.....	14
2.3.	ROBOTTIIKKA JA AUTONOMISET JÄRJESTELMÄT.....	18
2.4.	VIRRANHALLINTA.....	22
2.5.	YHTEENVETO – KEHITYKSEN VAIKUTUS JOUKKOJEN TOIMINTAAN.....	23
3.	ENERGIA-ASEET.....	25
3.1.	YLEISTÄ.....	25
3.2.	LASERASEET.....	29
3.3.	HPM-ASEET.....	32
3.4.	ENERGIA-ASEIDEN NYKYTILANNE JA TRL-TASO.....	35
3.5.	HUOMIOON OTETTAVIA ASIOITA.....	40
3.6.	YHTEENVETO.....	43
4.	ENERGIA-ASEET JALKAVÄEN TAISTELUSSA.....	44
4.1.	LAINSÄÄDÄNTÖ JA ASIAKIRJAT.....	44
4.2.	JÄRJESTELMIEN SUORITUSKYKYVAATIMUKSET.....	47
4.3.	ENERGIA-ASEIDEN MAHDOLLISIA KÄYTTÖKOHTEITA.....	50
4.4.	ALUSTAT JA LAVETIT.....	53
4.5.	HUOMIOON OTETTAVAA.....	56
5.	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	60
5.1.	TULEVAISUUSTAULUKKO JA SKENAARIOANALYYSI.....	60
5.2.	YHTEENVETO.....	64
5.3.	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	65
5.4.	LUOTETTAVUUS.....	67
5.5.	TUTKIMUKSEN RAJAUKSET JA JATKOTUTKIMUKSEN MAHDOLLISUUS.....	68

LÄHTEET
LIITTEET

ENERGIA-ASEIDEN KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET JALKAVÄEN TAISTELUSSA 2030-LUVULLA

1. JOHDANTO

”Not as clumsy or random as a blaster; an elegant weapon for a more civilized age.”

– Obi-Wan Kenobi elokuvassa Tähtien Sota [1].

Energia-aseita on ollut kehitteillä useiden vuosikymmenten ajan eri puolilla maailmaa, mutta teknologiset rajoitteet ovat estäneet niiden ottamisen laajamittaisesti operatiiviseen käyttöön. Viime vuosina teknologia on kuitenkin edennyt siihen pisteeseen, että joitakin energia-aseita on jo otettu maailmalla rajallisesti käyttöön, ja erilaisten energia-asejärjestelmien kehitys jatkuu maailmalla aktiivisesti.

Suunnatun energian aseet (*directed energy weapons*, DEW) ovat houkutteleva vaihtoehto nykyään käytössä oleville asejärjestelmille niiden operatiivisen käytön edullisuuden vuoksi [2]. Tällä hetkellä niillä visioidaan täydennettävän ja jopa korvattavan nykyisin käytössä olevia ilmatorjuntajärjestelmiä, joiden yksittäinen ohjus saattaa maksaa kymmeniä tai satoja tuhansia dollareita. Energia-aseiden käyttövoimana toimii sähkö, ja yksittäinen laukaus maksaa siihen vaadittavan sähkön verran. [3, s. 1066; 4] Energia-aseiden tehoa voidaan mahdollisesti myös säädellä käyttötärpeesta riippuen, mikä voi tehdä niistä houkuttelevan vaihtoehdon myös muille turvallisuusviranomaisille.

Maailmalla on tämän tutkimuksen julkaisuun mennessä nähty jo useita eri tasoisia suunnatun energian asejärjestelmiä tai niiden prototyyppjä aina yksittäisen sotilaan käyttöön tarkoitetuista sokaisu- ja häikäisylaseraseista [5; 6] joukkojenhallinnassa käytettäviin millimetrialueella toimiviin aaltoaseisiin [7] ja lennokkeja sekä epäsuorantulen ammuksia torjuviin suuritehoisiin lasereihin [3, s.1095; 4]. Osa järjestelmistä on ollut jo operatiivisessa käytössä, mutta ainakaan toistaiseksi mitään asejärjestelmistä ei ole otettu laajamittaisesti käyttöön.

Energia-aseet tarjoavat mahdollisuuden vaikuttaa monenlaisiin kohteisiin tarkasti ja joustavasti. Energia-aseiden tehoa voidaan säädellä käyttötärpeesta riippuen, joten potentiaalisesti samalla asejärjestelmällä voidaan tavoitteesta riippuen häiritä, lamauttaa tai tuhota viholliskohteita.

Haasteena energia-aseiden laajamittaiselle käyttöönotolle, etenkin jalkaväen näkökulmasta, on edelleen niiden vaatiman energian tuottaminen ja varastoiminen käyttökelpoiseen muotoon sekä järjestelmien itsensä koko. Jalkaväen on kyettävä liikkumaan paikoissa, joissa ajoneuvojen käyttö on rajallista tai niitä ei välttämättä kyetä lainkaan käyttämään. Tämä asettaa rajoitteita käytettävien asejärjestelmien koolle ja painolle ja siten olennaisesti vaikuttaa myös asejärjestelmien käytössä olevaan tehoon.

Taistelukentän sähköistyessä ja digitalisoituessa nousee myös tarve yhä alemmilla tasoilla kyetä vaikuttamaan vihollisen elektronisiin järjestelmiin muutoinkin kuin kineettisellä vaikuttamisella. Energia-aseet saattavat tarjota mahdollisuuden myös tämänkaltaiseen vaikuttamiseen.

1.1. Tutkimustilanne

Suunnatun energian aseita on tutkittu ja kehitetty maailmalla jo hyvinkin pitkään. Laserin kehittämisen jälkeen jo 1960-luvulla alettiin tutkia sen käyttöä sotilaallisiin tarkoituksiin. Aikaisimmat tutkimukset aiheesta ovat keskittyneet pitkälti asejärjestelmien teknisiin ratkaisuihin ja teknologioiden fyysisiin peruseräisiin. Etenkin erityyppisten lasereiden tutkimus ja kehitys on ollut huomattavaa, johtuen lasereiden monipuolisista käyttökohteista useilla teollisuuden ja tieteen aloilla.

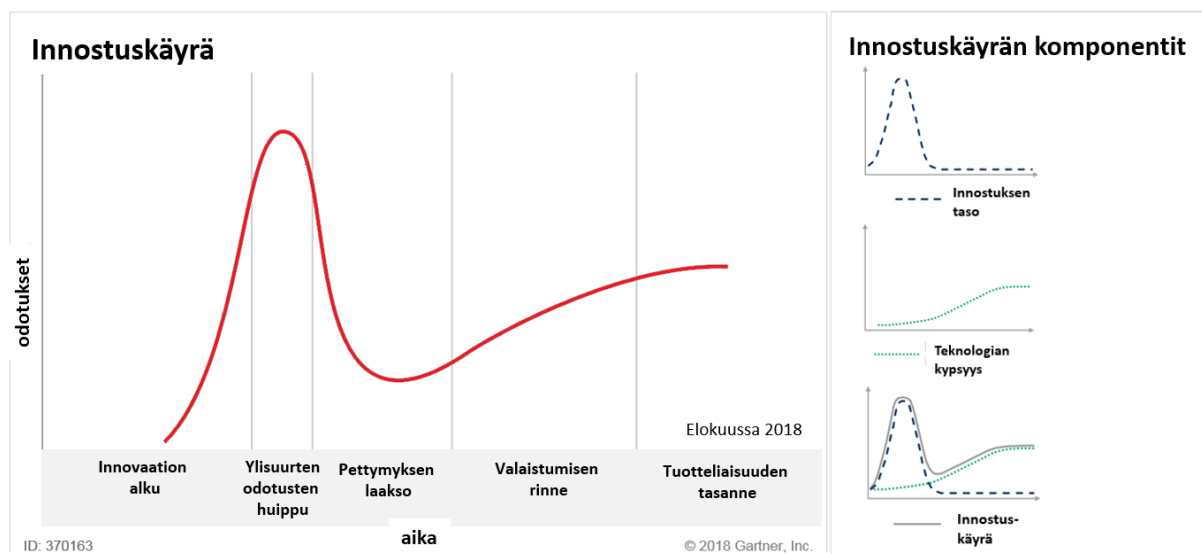
Teknologian kehittyessä ja teknisten ratkaisujen kypsentyessä tutkimus on alkanut keskittymään teknologioiden käyttömahdollisuuksiin, joista selkeimmäksi on viime vuosina noussut energia-aseiden käyttäminen lyhyen kantaman ilmatorjuntaan miehittämättömiä lennokkeja vastaan sekä ohjusten ja muiden ammusten torjuntaan.

Puolustusvoimien näkökulmasta aiheita ovat tutkineet ainakin Metsänvirta 2013 [8], Pernu 2017 [9], Haapsalo 2020 [2] sekä Liakka 2022 [10]. Nämä tutkimukset keskittyvät energia-aseiden käyttöön nimenomaan lyhyen kantaman ilmatorjunnassa ja pääosin pieniä lennokkeja vastaan.

Puolustusvoimien Tutkimuslaitoksen (PVTUTKL) Asetekniikkaosastolla on lisäksi viime vuosien aikana tutkittu suunnatun energian aseiden kehitystä, ja aiheesta on julkaistu kaksi raporttia [11; 12], jotka keskittyvät laser- ja mikroaaltoaseiden kehitykseen. Nämä raportit ovat turvaluokkaa IV, joten niiden sisältöjä on voitu hyödyntää tässä tutkimuksessa vain rajallisesti.

Energia-aseiden soveltuvuutta myös jalkaväen käyttöön on tutkittu maailmalla jo aiemmin, ja myös jalkaväen energia-aseiden prototyyppijä on esitelty vuosien varrella ainakin Kiinassa [13] ja Yhdysvalloissa, jossa sokaisevan laseraseen (*Close Combat Laser Assault Weapon*, C-

CLAW) prototyyppi esiteltiin jo 1980-luvulla [5; 14, s.72]. Nämä prototyypit ovat kuitenkin olleet niin pienitehoisia, etteivät ne ole soveltuneet korvaamaan olemassa olevia asejärjestelmiä. Lisäksi ensimmäisten prototyyppien julkaisun jälkeen maailmalla herättiin sokaisevia aseita koskeviin eettisiin kysymyksiin [14, s.72], minkä seurauksena solmittiin uusia kansainvälisiä sopimuksia tämän kaltaisten asejärjestelmien kehittämisen ja käytön rajoittamiseksi [15]. Miehittämättömien lennokkien torjunta on noussut selkeämmäksi prioriteetiksi viime vuosien aikana, mikä lienee osaltaan ohjannut tekniikan kehitystä enemmän kohti ilmatorjunnan tarpeita.



Kuva 1. Gartnerin innostuskäyrä (Muokattu kohteesta [16])

Suunnatun energian aseiden kehityksen voidaan katsoa sopivan monien muiden teknologioiden kanssa Gartnerin innostuskäyrälle (*hype cycle*, kuva 1.) [16]. Innostuskäyrää voidaan käyttää kuvaamaan suhtautumista uusiin lupaaviin teknologioihin, ja sitä miten suhtautuminen muuttuu sykleissä ajan kuluessa [17, s. 11]. Esimerkiksi laseraseiden tapauksessa käyrän voidaan katsoa alkavan 1960-luvulta ensimmäisten laserien kehittämisen jälkeen. Käyrän huippu saavutettiin noin 1980-luvulla, minkä jälkeen ymmärrys tehokkaiden laseraseiden vaatimasta tilasta ja energiasta sekä kansainvälisten sopimusten asettamat rajoitteet [15] saivat innostuksen laantumaan. Teknologioiden kypsyminen (*engineering maturity*) ja uudenlaisten uhkien ilmaantuminen taistelukentille on kuitenkin saanut kiinnostuksen heräämään uudestaan laseraseidenkin kehittämiseen.

1.2. Käsitteet, määritelmät ja lyhenteet

Niin sotilaallisista kuin tieteellisistäkin termeistä puhuttaessa on tavallista, että joitakin termejä käytetään päällekkäin tai limittäin toistensa kanssa. Tästä syystä on tärkeää määritellä tutkimuksessa käytettävät termit, jotta tutkija ja lukija ymmärtävät tutkimuksen sisällön mahdollisimman yhtenäisesti. Joissain tapauksissa on luontevaa myös ymmärtää termien vieraskielinen alkuperä, tällaisissa tapauksissa vieraskielinen ilmaisu on lisätty suluissa käytetyn termin perään.

Energia-aseet ovat aseita tai järjestelmiä, jotka käyttävät suunnattua energiaa lamauttaakseen, vaurioittaakseen tai tuhotakseen vihollisen kalustoa, rakennuksia ja/tai henkilöstöä [18].

Perinteiset aseet (*conventional weapons*) ovat aseita ja asejärjestelmiä, joiden vaikutus perustuu fyysisiin ammuksiin (luodit, haulit, sirpaleet, kranaatit, raketit, ohjukset) tai painevaikutukseen ja joiden ammusten kiihdyttäminen perustuu pääasiassa kemiallisille räjähdys- tai ajoaineille, joista yleisin on ruuti. Perinteisiin aseisiin luetaan myös erilaiset miinat, heitteet ja räjähteet.

Mikroaaltoaseet ovat energia-asejärjestelmiä, joiden vaikutus kohteessa perustuu suuritehoisiin mikroaaltoihin ja niiden aiheuttamiin välittömiin ja välillisiin vaikutuksiin. Tässä tutkimuksessa mikroaaltoaseista käytetään termiä HPM-aseet. Lisää termin käytöstä on luvussa 3.

Laseraseet ovat lasersäteilyyn (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) perustuvia energia-aseita. Laseraseet voidaan jakaa niiden tehon ja käyttötarkoituksen mukaan eri luokkiin.

Jalkaväellä (*infantry*) tarkoitetaan pääasiassa jalan liikkuvia sotilaita, joiden pääasiallinen tehtävä on taistella suoraan vihollista vastaan käsiaseilla. Jalkaväkijoukko voi käyttää siirtymiseensä erilaisia ajoneuvoja, mutta joukon taistelu tapahtuu jalkautuneena. Jalkaväki kykenee suorittamaan tehtäviä, joihin muut aselajit eivät kykene, kuten alueiden valtaaminen ja hallussa pitäminen.

Puolustusvoimissa jalkaväki on yksi Maavoimien kuudesta aselajista (jalkaväki, pioneeri, tykistö, huolto, viesti ja ilmatorjunta). Jalkaväki jakautuu Suomessa edelleen jääkäri-, tiedustelu-, kranaatinheitin-, panssarintorjunta-, panssari- sekä sotilaspoliisikoulutushaaroihin. Tässä tutkimuksessa *jalkaväellä* viitataan yleisesti jalkaväkeen maavoimien aselajina valtiosta, asevoimista ja koulutushaarasta riippumatta.

Lennokeilla (*drone*) tarkoitetaan miehittämättömiä ilma-aluksia, jotka voivat olla joko kiinteäsiipisiä tai roottoreilla lentäviä. Lennokit voivat olla joko siviili- tai sotilaskäyttöön tarkoitettuja ja niissä voi olla erilaisia hyötykuormia, kuten sensoreita tai asejärjestelmiä. Tässä tutkimuksessa myös vaanivat ampumatarvikkeet (*loitering munitions*) katsotaan kuuluvaksi *lennokki*-määritelmän alle, jos ei muuta mainita.

HEL	<i>High-Energy Laser</i> , suuritehoinen laser
HPM	<i>High-Power Microwave</i> , suuritehoinen mikroaalto.
SWaP	<i>Size, Weight and Power</i> , järjestelmän tehon suhde sen kokoon ja painoon nähden
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i> , miehittämätön ilma-alus
UGV	<i>Unmanned Ground Vehicle</i> , miehittämätön maalavetti
RAM	<i>Rocket, Artillery & Mortar</i> , epäsuoran tulen ammuksset.
C-RAM	<i>Counter-RAM</i> , epäsuoran tulen ammusten torjunta
C-UAS	<i>Counter-Unmanned Aerial System</i> , miehittämättömien ilma-alusten torjunta
RAS	<i>Robotic and Autonomous Systems</i> , robotiikka ja autonomiset järjestelmät

1.3. Tutkimustehtävä

Tutkimuksen aiheena on ”ENERGIA-ASEIDEN KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET JALKAVÄEN TAISTELUSSA 2030-LUVULLA”. Tutkimuksella pyritään selvittämään millaisia suorituskykyvaatimuksia ja rajoitteita jalkaväen taistelu ja siihen liittyvät elementit asettavat energia-aseiden käytölle ja niiden teknisille ratkaisuille sekä miten energia-aseilla kyetään vastaamaan näihin suorituskykyvaatimukseen havaittujen rajoitteiden puitteissa.

Tutkimuksen päätutkimuskysymys on: ”Millaisia käyttömahdollisuuksia energia-aseilla on jalkaväen taistelussa 2030-luvulla?” Tutkimuksen pääkysymykseen pyritään vastaamaan alakysymyksillä, jotka ovat

1. Millaista on jalkaväen taistelu 2030-luvulla?
2. Millaisia energia-asejärjestelmiä on kehitteillä ja mikä on arvio niiden kehityksen vaiheesta 2030-luvulla?
3. Mitä vaatimuksia ja rajoituksia energia-aseiden käytöllä on jalkaväen taistelun näkökulmasta?

1.4. Näkökulmat ja rajaukset

1.4.1. Energia-aseet

Energia-aseilla tarkoitetaan asejärjestelmiä, joiden vaikutus kohteessa perustuu suunnattuun energiaan. Vaikutus voidaan saavuttaa sähkömagneettisella säteilyllä (esim. mikroaallot, valo,

radioaallot), hiukkassäteillä tai ääniaalloilla. Energia-aseisiin voidaan katsoa kuuluvan myös sähkömagneettiseen kiihdytykseen perustuvat kineettisen vaikutuksen aseet kuten raidetykit, joiden vaikutus kohteessa perustuu kuitenkin perinteisten aseiden tapaan ammuksen kineettiseen vaikutukseen sen osuessa kohteeseen, mutta aseiden käyttövoimana toimii sähkö.

Tässä tutkimuksessa ”energia-aseilla” tarkoitetaan asejärjestelmiä, joiden vaikutus perustuu suunnattuun sähkömagneettiseen säteilyyn (*electromagnetic radiation*, EMR) ja sen aiheuttamiin vaikutuksiin kohteessa. Tällaiset asejärjestelmät voivat toimia periaatteessa millä sähkömagneettisen spektrin aallonpituudella tahansa, mutta tällaisista asejärjestelmistä tässä tutkimuksessa keskitytään **laser- ja HPM -aseisiin**, sillä ne ovat tämän tyyppisistä energia-aseista kehitetty pisimmälle [11; 3 s. 1013]. Tässä tutkimuksessa ei tarkastella hiukkassädeaseita (*particle beam*) eikä raidetykkeitä (*rail gun*).

Laser- ja HPM-aseista on kehitetty jo useita eri tasoisia prototyyppisiä ja joitakin asejärjestelmiä on jo otettu operatiiviseenkin käyttöön [12; 11; 10; 19; 20]. Lisäksi energia-aseiden kehitysohjelmat painottuvat pitkälti laseraseisiin HPM-aseohjelmien jäädessä lukumäärällisesti huomattavasti vähemmälle [9; 21]. Muunlaisten energia-aseiden kehitys on laser- ja HPM-aseita selkeästi vähäisempää.

Useat aiemmin kehitetyt, etenkin jalkaväen käyttöön tarkoitetut, sähkömagneettiseen säteilyyn perustuvat aseet ja järjestelmät kykenevät aiheuttamaan vain väliaikaisia vaikutuksia: tällaisia ovat esimerkiksi häikäisevät laseraseet sekä lennokkien torjuntaan tarkoitetut aseet, jotka häiritsevät tai katkaisevat lennokkien ohjaussignaalin [22] aiheuttamatta suoraan vaurioita kohteelle. Tässä tutkimuksessa keskitytään asejärjestelmiin, joilla pyritään aiheuttamaan pysyviä vaurioita kohteille tai niiden osille.

Energia-aseiden teho on niitä käsittelevissä materiaaleissa ilmoitettu yleensä suoraan lukuarvona, voidaan puhua esimerkiksi 50 kW laseraseesta. Tällöinkin kyse on laitteen nimellisestä tehosta, ja kohteeseen saatettu energiamäärä riippuu useasta muusta tekijästä, kuten ampumaetäisyydestä, näkyvyysolosuhteista, ilman kosteudesta ja ammunnanhallintajärjestelmän kyvystä pitää ase osoitettuna samaan kohtaan kohdetta [23, s. 28]. Tästä syystä energia-aseiden tehoa tarkasteltaessa ja määrällisessä vertailussa tässä tutkimuksessa keskitytään aseiden ilmoitettuun tehoon eikä sen kykyyn siirtää energiaa kohteeseen. Energia-aseiden käyttömahdollisuuksia jalkaväen taistelussa arvioitaessa otetaan huomioon esimerkiksi aseiden kyky (tai kyvyttömyys) läpäistä puita, maaston muotoja tai muita näköesteitä.

1.4.2. Jalkaväki

Tutkimuksessa jalkaväkijoukkoja tarkasteltaessa näkökulma on jalkaväkijoukkueen ja -komppanian tasolla – puhutaan siis energia-aseiden käyttämisestä lähellä ”etulinjan” taisteluita. Tutkimuksessa tarkastellaan taistelutehtäviä suorittavia, moottoroiduilla ajoneuvoilla liikkuvia jalkaväkijoukkoja – Suomen Maavoimien kannalta tämä tarkoittaa siis jääkäreitä.

Tutkimuksessa pyritään löytämään jalkaväen ja sen käytössä olevien ajoneuvojen asettamat rajoitteet esimerkiksi mahdollisten energia-asejärjestelmien koolle, painolle ja käytössä olevalle energiamäärälle. Näitä rajoitteita verrataan energia-aseiden tarpeisiin.

1.4.3. Muuta huomioitavaa

Asevoimissa käytettävänä oleva koulutusjärjestelmä asettaa omanlaisensa rajoitteet hankittaville varusteille, aseille ja kalustolle. Ammattiarmeija, jonka sotilaat erikoistuvat omaan tehtäväänsä (*specialist*) ja joilla on useiden vuosien palvelusaika, voi ottaa käyttöön teknisempiä järjestelmiä kuin asevelvollisuusarmeija, jonka sotilaat palvelevat vähemmän aikaa. Mitä teknisempi asejärjestelmä, sitä pidempään sen kouluttaminen henkilöstölle kestää. Energia-aseiden tapauksessa kyseessä ovat erittäin teknisen järjestelmät, joiden käyttäminen ja varsinkin ylläpitäminen vaatii todennäköisesti erikseen koulutettua teknistä henkilöstöä. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan oteta kantaa mahdollisten energia-aseiden käyttöönoton vaikutusta koulutusjärjestelmään tai koulutusjärjestelmän ominaisuuksien asettamien rajoitusten vaikutusta energia-aseiden käyttöön ottamiseen asevoimissa.

Tutkimuksessa ei myöskään oteta kantaa uudenlaisten asejärjestelmien käyttöön ottamiseen liittyviin käytännön järjestelyihin, kuten mahdollisten järjestelmien hankinnan aikatauluihin tai järjestelmien huoltovarmuuteen. Etenkin laseraseiden tapauksessa säteen tahaton heijastuminen kohteesta ja sen aiheuttamat turvallisuusriskit asettavat erinäisiä vaatimuksia esimerkiksi rauhan ajan harjoitusten turvallisuuden kannalta: järjestelmien varoetäisyydet saattavat olla jopa kymmeniä kilometrejä [24, Liite 2]. Tämä taas saattaa rajoittaa tällaisten asejärjestelmien rauhan ajan ampumarjoitusten järjestämistä ja asettaa huomattavia rajoitteita asejärjestelmien käytölle rauhan aikana.

1.5. Tutkimuksen menetelmät ja rakenne

Tutkimuksessa pääasiallisena menetelmänä käytetään kvalitatiivista eli laadullista kirjallisuustutkimusta. Kirjallisuustutkimuksella selvitetään energia-aseiden toimintaperiaatteita, nykyistä tilannetta sekä arviota niiden kehityksestä tulevaisuudessa.

Jalkaväen taistelun kuvaa 2030-luvulla ja jalkaväen suorituskykyä selvitetään myös kirjallisuustutkimuksella.

Tutkimus on osaltaan tulevaisuudentutkimusta, jossa tarkastellaan nykyhetken valossa mahdollisia tulevan kehityksen trendejä ja pyritään tunnistamaan mahdollisia vaihtoehtoisia tulevaisuuksia [25, s. 164]. Erilaisia mahdollisia tulevaisuuden kehityskulkuja ja niiden vaikutusta teknologioiden käyttöönottoon tarkastellaan tutkimuksessa tulevaisuustaulukon ja sen perusteella muodostettavien skenaarioiden avulla.

Taulukko 1. Esimerkki tulevaisuustaulukosta [26, s. 326]

		Epävarmuudet (muuttujat)					
		1 Työn tärkeys arjessa	2 Työsuhteet	3 Työn saman- kaltaisuus arjessa	4 Tuloerot	5 Työn käsitteen muutos	6 Itsenäisyys työssä
Kehitysvaihtoehdot (arvot)	A	Työaika vähenee keskimäärin alle 30 tuntiin viikossa	Pääasiassa yksi työsuhde	Viikot ovat erilaisia ja työtä on välillä liikaa, välillä liian vähän	Tuloerot kasvavat nopeasti	Työ on yhteistyötä	Työnantaja haluaa lopputuloksen
	B	Työaika täyttää yhä suuremman osan arjesta	Monia työsuhteita	Työ on vakaa ja tasainen osa arkea	Tuloerot kasvavat hitaasti	Työ on ongelmanratkaisua	Työnantaja haluaa ajan
	C				Tuloerot vähenevät	Työ on toimeentuloa	

Tulevaisuustaulukon avulla voidaan muodostaa erilaisia mahdollisia tulevaisuuksia kuvaavia skenaarioita. Skenaariot ovat kuvauksia jostakin vaihtoehtoisesta tulevaisuuden tilasta ja siihen johtavista tapahtumien kulusta [26, s. 313]. Skenaariot muodostetaan yhdistelemällä tulevaisuustaulukossa (taulukko 1) tunnistettuja vaihtoehtoisia kehityskulkuja eri muuttujien suhteen. Skenaarioiden sisältö määrittyy pitkälti niihin valittujen muuttujien kehitysvaihtoehtojen mukaan. [26, s. 317].

Energia-aseiden teknologista valmiusastetta arvioidaan 9-portaisella TRL (*Technology Readiness Level*) -asteikolla (Taulukko 2). TRL-asteikko on NASA:n kehittämä järjestelmä teknologioiden ja järjestelmien kypsyyden arviointia varten. Sitä voidaan käyttää arvioimaan teknologisten järjestelmien nykyistä kypsyyden tasoa sekä sen avulla voidaan arvioida aikaa, joka tietyn tasoisella teknologialla kestää saavuttaa täysi kypsyys (tasot 8 ja 9). [17, s. 12; 27]. Järjestelmien TRL-tasoa arvioitaessa tulee ottaa huomioon järjestelmän kaikkien osien kypsyydentaso: järjestelmän TRL-taso ei voi olla yksittäisten osien ja osajärjestelmien TRL-tasoa korkeampi.

Taulukko 2. *Technology readiness level* -järjestelmän mukainen asteikko [17 s. 12; 27] (tutkijan suomentama)

TRL 9	Varsinainen järjestelmä on todistettu käytettäväksi onnistuneilla operaatioilla
TRL 8	Varsinainen järjestelmä on valmis ja hyväksytetty kokeilla ja demonstraatioilla
TRL 7	Järjestelmän prototyypin demonstraatio todenmukaisessa ympäristössä
TRL 6	Järjestelmän/osajärjestelmän mallin tai prototyypin demonstrointi relevanteissa olosuhteissa
TRL 5	Komponentin ja/tai virtapiirin hyväksyttäminen relevanteissa olosuhteissa
TRL 4	Komponentin ja/tai virtapiirin hyväksyttäminen laboratorio-olosuhteissa
TRL 3	Analyttinen ja kokeellinen kriittinen toiminnallisuus ja/tai ominainen konsepti osoitettu toimivaksi
TRL 2	Teknologian konsepti ja/tai -sovellus muodostettu
TRL 1	Peruseriaatteiden havainnointi ja raportointi

Tässä tutkimuksessa järjestelmien TRL-tasoa ei laskettu määrällisesti TRL-laskurien avulla, vaan järjestelmien TRL-tasot arvioitiin laadullisesti järjestelmistä saatavien tietojen perusteella. Järjestelmien suorituskyvystä saatava tieto perustuu avoimiin tietolähteisiin, eikä järjestelmien kaikista osajärjestelmistä ole saatavissa riittävästi tietoa tämän tutkimuksen puitteissa TRL-tasojen laskemiseksi määrällisiä laskureita käyttämällä.

Rakenteellisesti tutkimus jakautuu johdantoon, kolmeen teorialukuun ja johtopäätöksiin. Toisessa luvussa tarkastellaan toimintaympäristöä sekä teknologisen kehityksen näkymiä jalkaväkijoukon näkökulmasta. Menetelmänä on kvalitatiivinen kirjallisuustutkimus.

Kolmannessa luvussa käsitellään energia-aseiden toimintaperiaatteita, suorituskykyjä, vaatimuksia ja kehitysnäkymiä laser- ja mikroaaltoaseiden osalta. Menetelmänä on kvalitatiivinen kirjallisuustutkimus sekä TRL-menetelmä.

Neljännessä luvussa yhdistetään toisen ja kolmannen luvun havainnot ja tarkastellaan energia-aseiden käyttöön vaikuttavia asioita kansainvälisten sopimusten, kansallisen lainsäädännön sekä Puolustusvoimien normien ja ohjesääntöjen näkökulmasta.

Viidennessä luvussa pohditaan erilaisten teknologisten kehityskulkujen vaikutusta energia-aseiden käytettävyyteen jalkaväen taistelun kannalta tulevaisuustaulujen avulla ja esitellään tutkimuksen tulokset.

1.6. Lähdemateriaali

Lähdemateriaali koostuu aikaisemmista tutkimuksista sekä aihetta käsittelevästä kirjallisuudesta ja artikkeleista, energia-aseita kehittävien (kaupallisten) yritysten materiaaleista sekä Puolustusvoimien oppaista, ohjesäännöistä ja varomääräyksistä.

Energia-asejärjestelmien turvallisuusnäkökulmia ja niiden käytön rajoitteita on käsitelty niin kansainvälisissä sopimuksissa [15] kuin Puolustusvoimien normeissa ja varomääräyksissäkin [28; 24].

Energia-aseiden fyysisiä peruseriaatteita ja niiden käyttämiseen liittyviä tärkeimpiä lähteitä ovat Philip E. Nielsenin *Effects of Directed Energy Weapons*, 1994 [29], Anil K. Mainin *Handbook of Defence Electronics and Optronics*, 2018 [3] sekä Louis Del Monten *War at the Speed of Light*, 2021 [14].

Puolustusvoimien Tutkimuslaitoksen (PVTUTKL) Asetekniikkaosaston tuottamissa *Suunnatun Energian Aseet 1.0 ja 2.0* -raporteissa (TL IV) on tutkittu energia-asejärjestelmien nykytilaa ja sovellutusten teknisiä ominaisuuksia [12, 11]. Ensimmäinen raportti käsittelee laser- ja mikroaaltoaseiden toimintaperiaatteita ja kartoittaa niiden kehityksen tilaa maailmalla sekä erilaisia maailmalla esiteltyjä energia-aseiden prototyyppejä. Toinen raportti keskittyy laseraseiden fysikaalisiin toimintaperiaatteisiin ja teknisiin ratkaisuihin.

Metsänvirta käsittelee EU-kurssin tutkielmassaan lyhyen kantaman ilmatorjuntajärjestelmissä käytettäviä teknologioita 2030-luvulla. Tutkimus on julkaistu 2013, eli se on julkaisuhetkellään katsonut noin 17-20 vuotta tulevaisuuteen. Tutkimuksen mukaan lasertekniikan voidaan nähdä tulevan osaksi ilmatorjuntajärjestelmiä 2030-luvulla, jos järjestelmät saadaan riittävän tehokkaiksi, pienikokoisiksi ja liikuteltaviksi. [8]

Pernu käsittelee YE-kurssin diplomityössään energia-aseteknologioiden kypsyyttä vuosien 2025-2030 aikana. Tutkimus on julkaistu 2017, eli sen on katsonut 8-13 vuotta tulevaisuuteen julkaisuhetkellään. Tutkimuksen fokus on energia-aseiden käyttämisessä nykyisten ilmatorjuntajärjestelmien korvaajana. Tutkimuksessa on suoritettu myös energia-aseteknologioiden teknisen valmiustason arviointi (*Technology Readiness Level*, TRL). Tutkimuksen mukaan pitkästä tutkimus- ja kokeilutoiminnasta huolimatta on edelleen ratkaistava monia ongelmia, ennen kuin energia-asejärjestelmiä voidaan ottaa käyttöön. Nykyisellä tasolla energia-aseiden teho ei riitä vaikuttamaan miehitettyjen ilma-alusten kokoihin kohteisiin. Tutkimuksessa esitetyn arvion mukaan energia-aseilla saavutetaan kyky

vaikuttaa UAV-kohteisiin 2-3 km etäisyyksiltä vuosina 2021-2029 ja 10 km etäisyyksiltä vuosina 2024-2030. [9]

Haapsalo käsittelee Pro Gradu -tutkimuksessaan erittäin lyhyen kantaman ilmatorjuntajärjestelmien kustannustehokkuutta, ja tutkittavina kohteina ovat ammus- ja ohjusilmatorjunnan lisäksi laser- ja mikroaaltoaseet. Tutkimuksessa luodaan yksinkertaisia matemaattisia malleja eri asejärjestelmien tarkkuuden ja kustannustehokkuuden arviointiin. Tutkimuksen mukaan sähkömagneettiseen vaikutukseen perustuvat järjestelmät (laser- ja HPM-aseet) tulevat todennäköisesti olemaan kustannustehokkaita verrattuna ohjus- ja ammusilmatorjuntajärjestelmiin, jos niiden hankintahinta saadaan pudotettua noin kymmenesosaan tämänhetkisestä (vuoden 2020) tasostaan. [2]

Liakka käsittelee Pro Gradu -tutkimuksessaan kattavasti laser- ja mikroaaltoaseiden toimintaperiaatteita, nykyisiä prototyyppisiä ja vaikutusta kohteessa (pieni kaupallinen lennokki) sekä määrittää aseille viitteelliset energiamäärät, jotka tarvittaisiin kohteen torjumiseen. Tutkimuksessa ei kuitenkaan käsitellä juurikaan energia-aseiden käytännössä asettamia vaatimuksia esimerkiksi tilan tarpeen, painavuuden tai energiantarpeen suhteen, ja tutkimus keskittyy kiinteän kohteen suojaamiseen. Liakka esittää oman tutkimuksensa mahdollisena jatkotutkimusaiheena suunnatun energian aseiden käyttöä taistelevien joukkojen suojana, esimerkiksi korvaamalla tai täydentämällä ilmatorjuntaohjussyksiköitä. Tutkimuksen mukaan pienten kaupallisten lennokkien muodostama tiedustelu-uhka kiinteitä kohteita vastaan voi muodostua jopa yli 4 km etäisyydeltä kohteesta. Tutkimuksen arvioiden mukaan lennokkeihin vaikuttamiseen vaaditaan lennokin materiaalista riippuen sekunnin kestävällä laserpulsilla tehoa 200 watista (muovi/komposiitti) aina 130 kilowattiin (hiilikuitu). [10]

Maasodankäynnin ja jalkaväen taistelun tulevaisuutta sekä varustuksen kehitystä tutkitaan myös jatkuvasti. Teoreettinen tutkimus on pitkälti julkista ja uusien varusteiden ja järjestelmien kehitys on pääosin riippuvaista kaupallisista yrityksistä, joten näistä on runsaasti tietoa saatavilla ainakin länsimaisista lähteistä. Varsinaisista asevoimien kehitysohjelmien sisällöstä kertova materiaali on useimmiten turvaluokiteltua ja siitä on siten vaikeampaa saada tietoa.

Puolustusvoimien jalkaväen kehittämisohjelmia ja jalkaväen taistelun kehitystrendejä on esitelty muun muassa useissa artikkeleissa Jalkaväen vuosikirjassa 2019-2020 [30]. Joidenkin lähteiden käyttöä tähän tutkimukseen rajoittaa niiden turvaluokitus.

2. JALKAVÄEN TAISTELU

Tässä luvussa arvioidaan jalkaväen taistelun kehitykseen vaikuttavia asioita 2030-luvulle mentäessä teknologisen kehityksen ja toimintaympäristön muutoksen kannalta. Lisäksi tässä luvussa tarkastellaan jalkaväkijoukkojen virranhallintaa ja sen kehitysnäkymiä, sillä joukkojen käytössä olevat energioresurssit ovat olennaisessa osassa energia-aseiden käytön kannalta.

Jalkaväki liikkuu nimensä mukaisesti pääosin jalan, mutta jalkaväkijoukkoja voidaan siirtää tai joukko voi siirtyä paikasta toiseen erilaisin ajoneuvokuljetuksin, kuten polkupyörillä, autoilla tai erilaisilla taistelujoneuvoilla. Suurin osa jalkaväkijoukoista toimii vain maalla, mutta joillakin joukkotyypeillä voi olla kyky suorittaa maihinnousuja ja/tai maahanlaskuja. Tällöinkin joukkojen taistelu tapahtuu maalla, mutta joukkojen siirtyminen voi tapahtua vesi- tai ilmateitse esimerkiksi maihinnousualuksilla, helikoptereilla tai lentokoneilla. Tässä tutkimuksessa keskitytään omilla ajoneuvoillaan liikkuviin jalkaväkijoukkoihin (moottoroitu/mekanisoitu jalkaväki).

2.1. Toimintaympäristö

Jalkaväkijoukot voivat toimia hyvinkin erilaisissa toimintaympäristöissä ja -olosuhteissa. Jalkaväkijoukon tulee kyetä toimimaan vuoden- tai vuorokaudenajasta riippumatta [31, s. 20]. Jalkaväkijoukkoja voidaan käyttää niin maastossa kuin rakennetuilla alueillakin.

Erilaiset toimintaympäristöt asettavat jalkaväkijoukoille erilaisia vaatimuksia. Harvaan rakennettu ja metsäinen alue on toimintaympäristönä hyvin erilainen kuin tiuhaan rakennettu kaupunkiympäristö. Tästä syystä myös eri alueilla toimimaan tarkoitettujen joukkojen koulutetaan hieman eri tavalla. Myös rakennetut alueet poikkeavat toisistaan: rakennetulla alueella joukko voi joutua taistelemaan yksittäisiä taloja tai taloryhmiä sisältävällä reuna-alueella, omakoti- tai rivitaloalueella, kerrostaloalueella tai vaarallisia aineita sisältävillä teollisuusalueilla. Kukin taajamatyypin edellyttää jonkin verran toisistaan poikkeavia valmisteluja ja menettelytapoja. [32, s. 119]

Toimintaympäristössä vallitsevat olosuhteet voivat myös vaihdella voimakkaasti. Esimerkiksi Suomessa lämpötilat voivat vaihdella vuodenajan mukaan noin -50 ja +35 asteen välillä [33]. Lisäksi sääilmiöt kuten vesi-, lumi- ja räntäsade sekä sumu vaikuttavat joukkojen ja järjestelmien toimintaan.

Myös toimintaympäristön muut toimijat vaikuttavat jalkaväkijoukon toimintaan. Joukon toimintaa rajoittavat esimerkiksi alueella olevat siviilit, jolloin korostuu jalkaväkijoukon kyky erottaa taistelualueella olevat vihollisen taistelijat siviileistä. Tämä myös rajoittaa erilaisten

asejärjestelmien käyttöä. Etenkin kaupunkialueilla toimivien joukkojen tulee kyetä paikantamaan, tunnistamaan ja vaikuttamaan vihollisen joukkoihin samalla välttämällä tai minimoimalla siviileihin ja infrastruktuuriin kohdistuvat tuhovaikutukset [34, s. 94].

2.1.1. Toimintaympäristön kehitys

”2030-luvun jääkäri- ja jalkaväkijoukkojen tulee myös kyetä hyökkäykseen kaikissa kotimaisissa toimintaympäristöissä, oli sitten kyseessä arktisen alueen pohjattomat kinokset, Savo-karjalainen syksyinen pilkkopimeä korpimaisema tai pääkaupunkiseudun monitasoinen ja- ulotteinen infrastruktuuri.” [30, s. 48]

Vuonna 2018 72% Suomen väestöstä asui kaupunkialueilla [35]. YK:n arvioiden mukaan 2050-vuoteen mennessä 68% koko maailman väkiluvusta tulee asumaan urbaaneilla alueilla. Tämä lisää kaupungistumista ja tuottaa haasteita tulevaisuuden sotilaallisille operaatioille niiden tasosta riippumatta. Urbanissa ympäristössä toimittaessa sotilaiden ja siviilien (taistelijoiden ja ei-taistelijoiden) välinen raja hämärtyy tai tilanteet voivat muuttua hyvinkin nopeasti. Tällaisissa tilanteissa on tärkeää, että joukoilla on kyky käyttää tappavaa ja ei-tappavaa voimaa joustavasti ulkopuolisten vahinkojen ja sivullisten uhrien minimoimiseksi tai välttämiseksi. [17, s. 34] Siviiliväestön seassa operointi korostuu etenkin tilanteissa, joissa konflikti kehittyy nopeasti eikä siviiliväestöä ehditä tai kyetä evakuoimaan operaatioalueilta.

Kaupunkialueet eivät tule enää olemaan toissijainen tai välteltävä operaatioympäristö, vaan merkittävä osa tulevaisuuden operaatioista tullaan toteuttamaan kaupunkiympäristöissä. Kaupunkiympäristössä toimiminen vaatii suuremman määrän sotilaita kuin muut operaatioympäristöt ja samalla pakottaa sotilaat ottamaan vastuulleen myös muita tehtäviä kuin pelkät taistelutehtävät, mikä johtaa osaltaan siihen, että maavoimien joukkomäärät eivät tule sotia käyvissä valtioissa pienenemään. [34, s. 94]

Rakennetuilla alueilla toimittaessa ympäristö aiheuttaa haasteita myös erilaisten elektronisten järjestelmien käytölle, sillä rakennukset ja maanalaiset järjestelmät heikentävät sensoreiden toimintaa ja radiotaajuiset häiriötekijät voivat huomattavasti heikentää sensoreiden sekä johtamis- ja viestijärjestelmien toimintaa. [17, s. 34] Sensoreiden pienentyessä ja halventuessa niiden käyttö tulee lisääntymään ja kaupunkiympäristö tulee ylikuormittumaan datalla. Tulevaisuudessa rakennetuille alueille on helpompi piiloutua ja suojautua kuin vaikeakulkuisimpaankaan maastoon. [34, s. 94]

Erilaisten toimijoiden kiinnostus myös arktista aluetta kohtaan on lisääntynyt viime vuosina ja tulee lisääntymään entisestään. Ilmaston lämpenemisen seurauksena arktisen alueen

käytettävyys on lisääntynyt, mikä lisää kiinnostusta alueen käyttöön muun muassa uusien resurssien ja liikennöintireittien myötä. Arktinen alue operatiivisena ympäristönä aiheuttaa joukoille myös huomattavia haasteita: operaatioalueiden suuret etäisyydet ja käytössä olevien satelliittien vähäinen määrä tekevät GPS- ja viestijärjestelmien kattavuudesta heikkoa. Sääolosuhteet heikentävät sensoreiden ja ajoneuvojen suorituskykyä. Kylmät talvet, lyhyet kesät ja voimakkaasti vaihtelevat sääolosuhteet aiheuttavat riskejä niin ihmisille kuin kalustollekin, jos näitä ei ole valmisteltu kestämiin kyseisiin olosuhteisiin. [17, s. 33]

2.2. Teknologisen kehityksen arviointi

Tulevaisuudessa tapahtuvaa kehitystä arvioidessa ei ole järkevää keskittyä yksittäisten järjestelmien tai teknisten ratkaisujen kehitykseen, vaan tärkeämpää on tunnistaa olemassa olevia trendejä, jotka voivat antaa laajemmin kuvaa siitä mihin suuntaan kehitys on menossa. Trendit (*trends*) tarkoittavat havaittavissa olevaa muutosta suuressa joukossa yksittäisiä järjestelmiä tai tapahtumia. Käytännössä trendit ovat asioita, joiden kehityksestä ja vaikutuksista voimme olla suhteellisen varmoja ainakin historiallisen datan perusteella. Trendit kuvaavat usein lyhyemmän aikavälin kehityskulkuja, kuten esimerkiksi erilaisten teknologioiden kehittymistä. [26, s. 323]

Uusien teknologioiden yleistymisen kannalta suurin haaste ei ole niiden kehittämisessä, vaan niiden käyttöönottamisessa. [34, s. 100]. Asejärjestelmien elinkaari voi kestää jopa 30–40 vuotta. Pitkän elinkaaren johdosta moni nykyisin käytössä oleva järjestelmä on käytössä myös 2030- ja 2040-luvuilla joko päivitettyinä tai täydennettyinä uusilla teknologioilla. [34, s. 45]. Trendinä on nykyäänkin, että esimerkiksi uusien taistelujoneuvojen kehittämisen tai hankkimisen sijaan pyritään päivittämään jo olemassa olevia järjestelmiä, jotka voivat olla jo kymmeniä vuosia vanhoja. [30, s. 54]. Näistä syistä uusien teknologioiden laajamittaisessa käyttöönotossa asejärjestelmissä voi kestää hyvinkin pitkään senkin jälkeen, kun ne ovat saavuttaneet riittävän kypsyyden – pienessä mittakaavassa uudet teknologiat voivat kuitenkin tulla käyttöön hyvinkin nopeasti.

Teknologian kehitykseen liittyviä trendejä tässä tutkimuksessa tarkasteltavalla ajanjaksolla on käsitelty muun muassa NATO:n Tiede & Teknologiaorganisaation *Technology Trends 2020-2040* -raportissa [17], Brookings -instituutin *Forecasting change in Military technology, 2020-2040* -raportissa [36], PVTUTKL Doktriiniosaston *Teknologiaennakointi - innovatiiviset kehityskaaret* -raportissa vuodelta 2017 (STIV) [37] sekä *Tuleva Sota* -kirjassa vuodelta 2018 [34]. Jalkaväen vuosikirjassa 2019-2020 [30] julkaistuissa artikkeleissa on pohdittu näiden

trendien vaikutusta jalkaväen taisteluun ja sitä, miten ne ilmentyvät tulevaisuuden taistelukentillä.

Vertailemalla aiemmin mainituissa lähteissä esiintyviä teknologisen kehityksen kohteita ja trendejä, voidaan tutkimuksen aihealueeseen liittyviä tulevaisuuden trendejä luokitella esimerkiksi seuraavalla tavalla:

- Tiedustelu, valvonta ja maalittaminen
- Tiedon käsittely ja välittäminen
- Asejärjestelmien kehitys
- Ihmisen suorituskykyjen parantelu
- Uudenlaiset materiaalit ja valmistusmenetelmät
- Robotiikka ja autonomia

Tarkempi lähteissä esiintyvien trendien erittely on esitelty tutkimuksen liitteessä 1.

Trendejä tarkasteltaessa tulee kyetä hahmottamaan eri tasoisten kehityskulkujen syy-seuraussuhteita. Esimerkiksi uusien materiaalien, uudenlaisten sensoreiden tai tietoverkkojen kehittyminen ja yleistyminen eivät välttämättä suoraan vaikuta jalkaväen taisteluun, mutta niiden lopputuloksena voi olla uudenlaisten suojarusteiden, laitteiden tai asejärjestelmien ilmaantuminen taistelukentille. Suuri osa mahdollisista muutoksista vaikuttaa samaan aikaan useampaan suorituskyvyn osa-alueeseen, ja muutokset ovat myös toisistaan riippuvaisia.

Arvioiden mukaan jalkaväen taisteluun vaikuttaa tämän tutkimuksen aikajaksolla voimakkaasti robotiikan ja autonomian kehitys. Ainakin Yhdysvaltojen ja Australian maavoimat ovat julkaisseet *Robotic and Autonomous Systems (RAS) Strategy* -konseptit, joissa hahmotellaan nimensä mukaisesti robotiikan ja autonomian vaikutusta tulevaisuuden maavoimien kehitykseen [38; 39]. Australian maavoimien mukaan robotiikan ja autonomian kehitys tarjoaa huomattavaa potentiaalia tulevaisuuden maavoimille ja saattaa jopa perustavanlaatuisesti muuttaa maavoimien toimintatapoja [39, s. 43]. Yhdysvaltain maavoimien mukaan niiden RAS-strategia auttaa muodostamaan vision siitä, miten maavoimat taistelee tulevaisuudessa [38, s. 17]. Myös Suomen Maavoimien tutkimuskeskuksen raportin mukaan esimerkiksi miehittämättömiä maalla liikkuvia laitteita voidaan soveltaa Maavoimien toimintaan useammallakin eri tavalla ja ne tarjoavat runsaasti mahdollisuuksia Maavoimien eri aselajeille [40, s. 36]. Robotiikan ja miehittämättömien järjestelmien kehitystä käsitellään luvussa 2.3. Muita tulevan kehityksen trendejä tarkastellaan seuraavissa alaluvuissa siitä näkökulmasta, millaista vaikutusta niillä voisi olla jalkaväen taisteluun.

2.2.1. Tiedustelu, valvonta ja maalittaminen

Erilaisten sensoreiden yleistyminen tekee kohteiden havaitsemisesta ja tunnistamisesta helpompaa, ja samalla tekee taistelukentällä piiloutumisesta entistä haastavampaa. Esimerkiksi useita eri aallonpituusalueita havainnoivalla hyperspektritekniikalla voidaan havaita naamioidut kohteet sekä erotella valelaitteet oikeista kohteista ja suorittaa kohteiden yleistunnistus, vaikka niistä ei saataisi hahmon tunnistamiseen riittävän tarkkaa kuvaa. Tällaisella spektrikameralla voidaan kyetä kohteiden tunnistukseen jopa 10–15 kertaa kauempaa kuin perinteisillä kameroilla. [34, s. 63]

Sensoreiden pientyminen mahdollistaa niiden asentamisen monenlaisille alustoille. Yhä monipuolisempia sensoreita voidaan asentaa muiden muassa lennokkeihin ja satelliitteihin, mikä mahdollistaa entistä kattavampien sensoriverkkojen muodostamisen. Esimerkiksi pienimmät SAR (*synthetic aperture radar*)-tutkat painavat nykyisin alle kilon, mikä mahdollistaa niiden asentamisen pieniinkin UAV-järjestelmiin. SAR-tutkien käyttämisestä aallonpituudesta riippuen tutkilla voidaan kyetä jopa näkemään metsän ja naamiointimateriaalien läpi ja erottamaan ajoneuvot, raskaat aseet, linnoitteet ja rakennukset. UAV-asenteisena tällaisella järjestelmällä kyettäisiin valvomaan laajaa ja peitteistäkin aluetta ympärivuorokautisesti riippumatta näkyvyysolosuhteista. [34, s. 61]

Sensorifuusio tarkoittaa useiden eri sensoreiden tuottaman tiedon yhdistämistä. Sensorifuusiota voidaan käyttää hyödyksi esimerkiksi yksittäisten maalien etsintään ja seurantaan sekä mahdollisimman kattavan tilannekuvan muodostamiseen laajemmalla alueelta. [41, s. 169] Sensorifuusion avulla voidaan yhdistää sekä yksittäisen laitteen käyttämien sensoreiden tietoa että useampien eri laitteiden sensoreiden tuottamaa tietoa.

2.2.2. Tiedon käsittely ja välittäminen

Sensoreiden määrän lisääntyessä ja laadun parantuessa myös niiden tuottama datamäärä lisääntyy, mikä asettaa vaatimuksia tiedon siirtämiseen ja käsittelyyn käytettävälle järjestelmille. Datan välittämiseen voidaan käyttää uusia tiedonsiirtojärjestelmiä, kuten yleistyvää 5G-teknologiaa [17, s. 42] sekä satelliitteihin perustuvaa tiedonsiirtoa. Satelliittien pientyminen lisää niiden käytettävyyttä tietoverkkojen rakentamisessa. Runsaslukuisia, pieniä satelliitteja hyödyntämällä voidaan rakentaa maanpäällisistä radio- ja valokuituverkoista riippumaton tiedonsiirtoratkaisu, joka on vaikeammin häiritävissä ja lamautettavissa kuin maanpäälliset järjestelmät. [34, s. 57]

Suurten datamäärien käsittelyssä voidaan hyödyntää erilaisia keinoälysovelluksia. Esimerkiksi useista satelliiteista ja muista sensoreista saatavaa dataa voidaan käsitellä ja yhdistää

automaattisesti hyödyntämällä erilaisia algoritmeja ja keinoälyä. [36, s. 13] Tällaisten järjestelmien avulla voidaan mahdollisesti tunnistaa uhkia ja jopa aloittaa vastatoimet automaattisesti [30, s. 51].

Erilaisten tietoverkkojen lisääntyessä ja yleistyessä niiden tarjoamien mahdollisuuksien lisäksi (tai juurikin niiden takia) tietoverkoista itsestään tulee myös tärkeitä vaikuttamisen kohteita taistelukentällä [17, s. 9]. Tietoverkkoihin voidaan vaikuttaa joko elektronisen sodankäynnin (ELSO) menetelmillä häiritsemällä niiden tiedonsiirtoa, kybersodankäynnin menetelmillä tai fyysisesti vaikuttamalla tietoverkkojen ”linkkeihin”, kuten radioihin, päätelaitteisiin ja reitittäjiin.

2.2.3. Asejärjestelmien kehitys

Uudenlaisia asejärjestelmiä ovat esimerkiksi hypersooniset aseet, raidetykit ja energia-aseet. Hypersooniset aseet ovat järjestelmiä, jotka liikkuvat yli 5 Machin nopeudella (6125 km/h) [17, s. 86]. Ne voivat lyhyelläkin aikavälillä mahdollistaa asevaikutuksen ulottamisen entistä nopeammin entistä pidemmille etäisyyksille ilman, että nykyiset torjuntajärjestelmät kykenevät vaikuttamaan niihin [34, s. 67] – tällä on kuitenkin todennäköisesti jalkaväen taisteluun vain välillinen vaikutus, sillä kyseiset asejärjestelmät ovat strategisen tason aseita.

Raidetykit ovat sähkömagneettiseen kiihdytykseen perustuvia aseita, joilla voidaan mahdollisesti päästä konventionaalisia aseita huomattavasti suurempiin ammusten lähtönopeuksiin. Raidetykkien hetkellisesti tarvitsemat tehot ovat kuitenkin niin suuria, että nykyisillä ja näköpiirissä olevilla tekniikoilla niiden käyttökohteet ovat lähinnä laivaston alusten aseistuksena [42, s. 21-24; 43]. Tästä syystä raidetykeillä ei liene vaikutusta jalkaväen taisteluun tämän tutkimuksen aikajaksolla.

Elektronisten komponenttien pieneneminen sekä hinnan laskeminen tulee osaltaan myös johtamaan siihen, että erilaiset täsmäaseet pienentyvät ja niiden käyttö yleistyy. Erilaiset täsmäaseet, kuten pienoishjukset, voivat tulla jopa yksittäisten taistelijoiden varustukseen. Asejärjestelmien tarkkuuden paraneminen mahdollistaa niiden käytön myös epäselvissä tilanteissa tai tilanteissa, joissa tulenkäyttöalueella on myös siviilejä. Mitä tarkemmin aseella voi osua kohteeseen, sitä kevyempi sen taistelulataus voi olla ja sitä kautta sen vaikutusetäisyys (sirpale- ja painevaikutus) myös pienenee. [34, s. 64]

2.2.4. Ihmisen suorituskykyjen parantelu

Ihmisen suorituskykyjen parantelulla tarkoitetaan teknologioita, joilla kehitetään ihmisen ominaisuuksia tai toimintaa enemmän kuin on tarpeen ihmisen terveyden palauttamiseksi tai

ylläpitämiseksi. Ihmisen fyysisiä ja kognitiivisia suorituskykyjä voidaan parannella esimerkiksi ottamalla käyttöön erilaisia ulkoisia tukirankoja (*exoskeleton*), lisätyn tai parannellun todellisuuden järjestelmiä (*augmented reality*, AR) ja tiedon käsittelyssä avustavia järjestelmiä sekä erilaisilla lääkkeillä tai piristeillä. [17, s. 94-100].

Ulkoisia tukirankoja voidaan käyttää parantamaan sotilaiden kuormankantokykyä ja liikkuvuutta haastavissa ympäristöissä [44, s. 20] – tällaiset järjestelmät tulevat todennäköisesti kuitenkin käyttöön vasta melko pitkän ajan päästä. Erilaiset lisätyn todellisuuden järjestelmät taas mahdollistavat joukkojen tilannetietoisuuden huomattavan parantamisen, kun erilaisista sensoreista saatava tieto voidaan tuoda suoraan sotilaan näkyville. [44, s. 24] Erilaisten sensoreiden tuottaman tiedon käsittelyssä voidaan lisäksi hyödyntää tekoälyä, joka osaltaan avustaa ihmisiä olennaisen tiedon löytämisessä ja päätöksenteossa [34, s. 157].

2.2.5. Uudenlaiset materiaalit ja valmistusmenetelmät

Uusilla materiaaliteknologioilla, kuten nanoteknologiolla, voidaan kehittää materiaaleja, joilla on parempia mekaanisia, optisia, sähköisiä, kemiallisia ja biologisia ominaisuuksia verrattuna nykyisin käytössä oleviin materiaaleihin. Nanoteknologiaan perustuvilla materiaaleilla voidaan esimerkiksi saavuttaa entistä paremmat suojausominaisuudet vähemmällä painolla – arvioiden mukaan nanoteknologiaa hyödyntävä suojaliivi voisi olla 10 kertaa nykyistä kevlar-liiviä lujempi jo vuoteen 2030 mennessä. [34, s. 73] Uudet materiaalit saattavat mahdollistaa maastoutumisen myös näkyvän valon aallonpituuksien ulkopuolella, esimerkiksi vähentämällä kohteen UV- ja IR-alueen säteilyä.

Materiaalia lisäävä valmistus (*additive manufacturing*, AM) mahdollistaa erilaisten kappaleiden valmistamisen digitaalisista malleista. Usein tätä prosessia kutsutaan myös 3D-tulostamiseksi. Materiaalia lisäävää valmistusta voidaan käyttää esimerkiksi nopeiden prototyyppien valmistamiseen, paikan päällä tapahtuvaan osien tuottamiseen ja korjaamiseen sekä räätälöityjen osien valmistamiseen. [34, s. 104] Materiaalia lisäävä valmistus voi mahdollistaa esimerkiksi aseiden osien valmistamisen missä tahansa sellaisessa paikassa, missä tulostinta voidaan käyttää.

2.3. Robotiikka ja autonomiset järjestelmät

Autonomisilla järjestelmillä tarkoitetaan järjestelmiä, jotka kykenevät itsenäiseen eli ihmisestä riippumattomaan toimintaan. Ihmisen siirtäminen järjestelmän ulkopuolelle mahdollistaa pienempien, ketterämpien ja nopeampaan taisteluun kykenevien tiedustelu-, valvonta- ja asejärjestelmien kehittämisen [34, s. 69]. Järjestelmien autonomian taso voi vaihdella ihmisen valvomista järjestelmistä kokonaan autonomisiin järjestelmiin. *Human-In-The-Loop (HITL)* -

järjestelmissä autonominen järjestelmä toimii ihmisen antamien ohjeiden ja komentojen mukaisesti. *Human-On-The-Loop (HOTL)* -järjestelmissä ihminen valvoo autonomisen järjestelmän toimintaa ja puuttuu siihen tarvittaessa. *Human-Out-Of-The-Loop (HOOTL)* -järjestelmät toimivat kokonaan ilman ihmisen valvontaa. [45, s. 9]

Tässä tutkimuksessa *autonomisilla järjestelmillä* tarkoitetaan kaikkia sellaisia miehittämättömiä (*unmanned*) järjestelmiä, jotka kykenevät jollakin tasolla ihmisestä riippumattomaan toimintaan, esimerkiksi lennokkeja, jotka kykenevät itse lentämään ennalta määritettyä reittiä ilman ihmisen suoraa ohjausta.

Autonominen järjestelmä voi sisältää itse lavetin (ajoneuvon) lisäksi erilaisia laitteita, kuten sensoreita ja johtamis- tai viestilaitteita, aseistusta ja muuta hyötykuormaa. Autonomiset järjestelmät kattavat sekä miehittämättömät lavetit että itsenäisesti toimivat asejärjestelmät. Järjestelmät voidaan jakaa toimintaympäristönsä mukaan maalla, ilmassa tai vedessä toimiviin järjestelmiin. Jalkaväen taistelun kannalta olennaisia ovat maalla toimivat (*Unmanned Ground System, UGS*) ja ilmassa toimivat (*Unmanned Aerial System, UAS*) järjestelmät.

Itsenäisesti toimivat asejärjestelmät (*Lethal Autonomous Weapon Systems, LAWS*) ovat järjestelmiä, jotka kykenevät itsenäisesti sekä tunnistamaan kohteen että käyttämään asevaikutusta sen tuhoamiseksi. Tällaisen järjestelmän tulee kyetä itsenäisesti havaitsemaan kohde, tunnistamaan se, tekemään päätös vaikuttamisesta ja suuntaamaan asejärjestelmänsä vaikutus sitä kohti. [45, s. 9] Kokonaan autonomisten asejärjestelmien kehittäminen on jo teknisesti mahdollista, mutta niiden kehittämiseen ja käyttöön liittyy runsaasti eettisiä haasteita.

Autonomisten järjestelmien käytön yleistymisestä kertoo esimerkiksi se, että vuonna 2003 Yhdysvaltojen asevoimilla ei ollut käytössään yhtään UGV:ta, mutta vuonna 2008 niitä oli jo kaksitoista tuhatta, joista osa oli jo vanhentuneita. Vuonna 2018 jonkinlaisia UAV-järjestelmiä taas oli käytössä yli 90 maan asevoimilla [34, s. 104-105].

Yhdysvaltain maavoimien vuonna 2017 julkaisemassa *Robotic and Autonomous Systems Strategy* -dokumentissa määritetään viisi tavoitetta RAS-suorituskyvyille [38]:

- Tilannetietoisuuden lisääminen
- Taistelijoiden fyysisen ja kognitiivisen taakan keventäminen
- Joukkojen ylläpitäminen lisääntyneillä täydennyksillä ja tehokkuudella
- Liikkumisen ja taisteluliikkeiden tukeminen/mahdollistaminen
- Joukkojen suojan lisääminen

2.3.1. Maalla toimivat järjestelmät

Jalkaväen taistelua voidaan tukea autonomisilla maalla kulkevilla laitteilla, jotka voivat esimerkiksi kuljettaa jalkaväen varusteita tai aseita ja näin keventää sotilaiden varustekuormaa [30, s. 52; 44, s. 20]. Maalla liikkuvat laitteet voivat käyttää etenemiseensä pyöriä, teloja tai jalkoja. Tällaiset järjestelmät voivat olla kaikkea pienistä tiedusteluroboteista taistelua tukeviin ajoneuvoihin ja miehittämättömiin panssarivaunuihin. Tällaisille laveteille voidaan ulkoistaa nykyään ihmisten suorittamia tehtäviä, kuten evakuoinnit, varusteiden kantaminen ja täydennysten toteuttaminen. UGV:itä voidaan myös aseistaa ja käyttää jalkaväen taistelun tukemiseen (kuva 2).

Miehittämättömien maalavettien kehitystä 2030-luvulle mentäessä on tutkittu muun muassa Maavoimien tutkimuslaitoksen *Miehittämättömät maalla liikkuvat laitteet* -raportissa (TL IV). Raportissa esitellyn jaottelun mukaan UGV:t voidaan jakaa painonsa mukaan erittäin kevyisiin (alle 5 kg), kevyisiin (5-100 kg), keskiraskaisiin (100-5000 kg) ja raskaisiin (5-40 t). [40]



Kuva 2. Milremin Themis -keskiraskas UGV [46]

Raportti esittelee yhden mahdollisen käyttökohteen 2030-luvun jalkaväkeä tukeville UGV:ille. Keskiraskaita tulitukirobotteja voidaan käyttää jalkaväkiryhmissä esimerkiksi korvaamaan nykyisiä tukiasempuja tai niillä voidaan lisätä ryhmien tulivoimaa. Tällaiset robotit voisivat toimia hybridimoottorilla, liikkua joko pyörillä tai teloilla ja painaa 200-1000 kg. Niitä voi olla jalkaväkiryhmässä useita ja ne kykenevät kommunikoimaan keskenään ja osoittamaan maaleja toisilleen. Yksi tällaisten robottien eduista on, että ne voidaan laittaa sotilaiden sijasta vaaralliseen tuliasemaan esimerkiksi sitomaan vihollinen taisteluun. [40, s. 26]

2.3.2. Ilmassa toimivat järjestelmät

Ilmassa toimivat järjestelmät (UAV) voivat olla kiinteäsiipisiä tai roottoreilla liikkuvia. UAV:t voidaan jakaa eri luokkiin esimerkiksi niiden käyttötarkoituksen, koon ja/tai painon mukaan. NATO:n käyttämän jaottelun mukaan lennokit jaetaan kolmeen luokkaan. Luokka I sisältää lennokit, joiden paino on alle 150 kg; Luokka I jakautuu edelleen mikro- (alle 2 kg) mini- (alle 15 kg) ja pieniin (alle 150 kg) lennokkeihin. Luokka II kattaa 150-600 kg painoiset lennokit ja luokka III sitä suuremmat lennokit. [47]

Hyötykuormastaan riippuen lennokkeja voidaan käyttää muun muassa alueiden tiedusteluun, valvontaan ja kohteiden maalittamiseen, epäsuoran tulen johtamiseen, elektroniseen sodankäyntiin sekä kohteisiin vaikuttamiseen. [37] Lennokkeja voidaan käyttää myös tiedonsiirtoverkkojen linkkeinä.

Etenkin mikro- ja minilennokkien yleistymisen jalkaväen kalustona tuo jalkaväelle uudenlaisia suorituskykyjä, kun yksittäisetkin sotilaat voivat käyttää lennokkeja esimerkiksi tiedustelu- ja valvontatehtäviin. Jo nykyään joillain kaupallisilla minilennokeilla voidaan kyetä tiedustelemaan kiinteitä kohteita yli 4 km etäisyyksiltä, jos olosuhteet ovat suotuisat [10, s. 56]. Liikkuvien kohteiden havaitseminen tai tiedustelu ei välttämättä onnistu samoille etäisyyksille, mutta jos lennokkien avulla jalkaväki kykenee havaitsemaan viholliskohteet esimerkiksi 1 km etäisyydeltä, se voi mahdollistaa vaikuttamisen viholliseen jalkaväelle turvallisen etäisyyden päästä.

Vaanivat ampumatarvikkeet (*loitering munitions*) voivat toimia itsenäisesti ilmassa pitkiäkin aikoja ja sopivan kohteen havaitsemisen jälkeen ne voidaan ohjata (tai ne voivat itse ohjautua) kohteeseen ja tuhota sen. Niiden käytettävyys on jo todettu taistelutilanteissa, ja todennäköisesti tekniikan kehitys tekee niistä entistä yleisempiä taistelukentällä, mahdollisesti jopa yksittäisen sotilaan varustuksessa [44, s. 20; 34, s. 70]. Jos vaaniva ampumatarvike tekee itse päätöksen vaikuttamisesta, sitä voidaan pitää itsenäisesti toimivana asejärjestelmänä (*LAWS*).

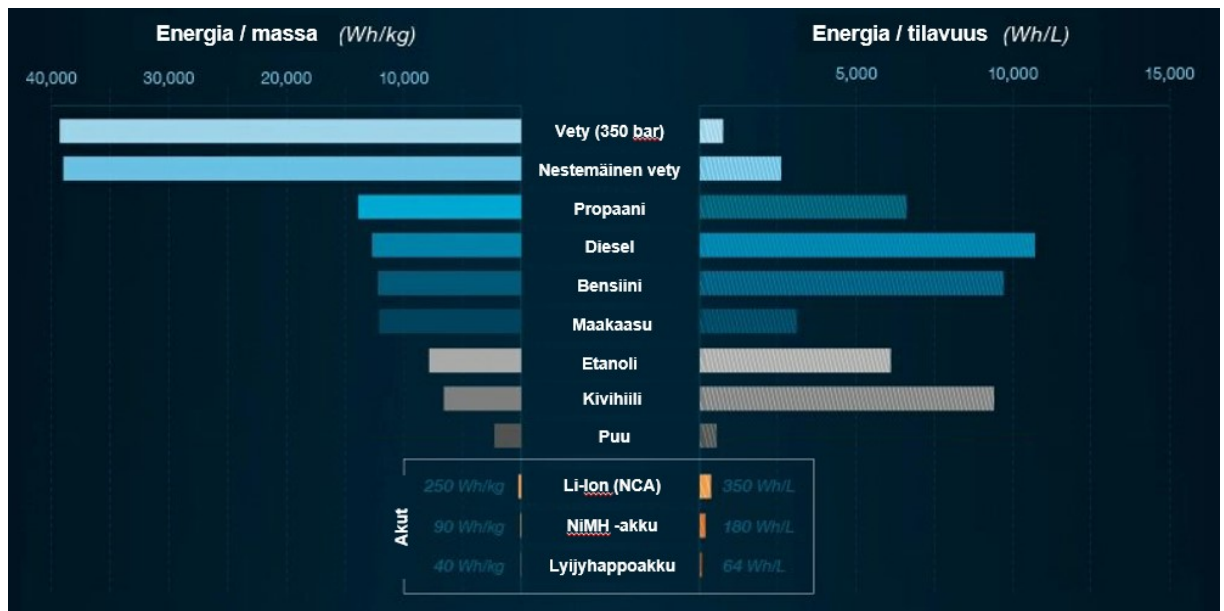
Keinoälyn mahdollistama lennokkien parveilu (*swarming*) tekee pienistäkin lennokeista yhä suuremman uhan taistelukentällä. Parvessa toimivat lennokit kommunikoivat keskenään ja tehtävänsä mukaisesti muodostavat päätöksen siitä, miten ne toimivat ja mitä kukin parven yksilö tekee. Osa parven jäsenistä voi pyrkiä lamauttamaan kohteen suojausjärjestelmät samalla kun toiset lennokit pyrkivät pääsemään vaikutukseen. Nopeasti liikkuvista, mikro- ja minikokoisista lennokeista muodostuvaa parvea voi olla vaikeaa havaita ja torjua. Tällaisen suhteellisen laajalle alueelle levittäytyneen parven torjunta nykyisillä asejärjestelmillä voi olla haastavaa, sillä yksittäisten lennokkien tuhoutuminen ei myöskään välttämättä estä

lennokkiparvea jatkamasta tehtäväänsä, jos parvi kykenee mukautumaan tilanteeseen riittävän nopeasti. [34, s. 71].

2.4. Virranhallinta

Jalkaväkijoukkojen varusteiden teknisen tason kasvaessa ja teknisten välineiden lisääntyessä on joukkojen toimintakyvyn kannalta tärkeää kyetä ylläpitämään järjestelmien tarvitsema energiamäärä. Ruoan, veden, ampumatarvikkeiden, polttoaineen ja ensiapuvälineiden lisäksi jalkaväkijoukon tulee kyetä täydentämään myös erilaisia sähköisiä virtalähteitä.

Virtalähteiden monimuotoisuus aiheuttaa haasteita joukkojen virranhallinnan kannalta. Pahimmassa tapauksessa jokainen erilainen joukon käytössä oleva laite tarvitsee omanlaisensa virtalähteen, jolloin uuden laitteen lisääminen joukolle voi tarkoittaa myös laitteen omien akkujen sekä laturin lisäämistä joukon kalustoon. [48]



Kuva 3. Erilaisten energianlähteiden energia-massa- ja energia-tilavuus-suhteita (muokattu kohteesta [49])

Diesel ja muut hiilivetyihin pohjautuvat polttoaineet ovat energiatiheitä aineita (Kuva 3) [49]. Niitä käytetäänkin sähköisen energian jakelujärjestelmien pohjana: sen sijaan että joukoille toimitettaisiin paristoja ja/tai valmiiksi ladattuja akkuja, joukolle toimitetaan polttoainetta, jonka joukko muuntaa sähköenergiaksi erilaisia generaattoreita käyttämällä. Generaattorit voivat olla joko erillisiä kannettavia generaattoreita (sähkövoimakoneet) tai esimerkiksi ajoneuvoihin asennettuja generaattoreita, tai virrantuottoon voidaan käyttää joukkojen ajoneuvojen sähköjärjestelmiä.

2.4.1. Virranhallinnan kehitysnäkymiä

Sotilaan ja jalkaväkijoukon virranhallinnan ongelmiin on herätty maailmalla järjestelmien teknistyessä ja yksittäisen sotilaan varustekuorman kasvaessa. Ongelman ratkaisemiseksi ollaan kehittämässä erilaisia teknisiä ratkaisuja, joiden pääasiallinen trendi vaikuttaa olevan erilaisten virtalähteiden määrän karsiminen ja virtalähteiden kirjon pitäminen mahdollisimman pienenä sekä järjestelmien virransyötön ja liitäntöjen yhtenäistäminen [30, s. 54; 50].

Vaikka kaikki jalkaväkijoukon käyttämien laitteiden akut voitaisiin ladata samaa järjestelmää hyödyntämällä, tulee joukolla silti olla kyky itsenäiseen virran tuottamiseen. Käytännössä tämä voidaan toteuttaa hyödyntämällä joukon käytössä olevia ajoneuvoja ja niiden sähköjärjestelmiä. Tulevaisuudessa hybriditeknologioiden käytön yleistymisen ajoneuvoissa mahdollistaa suuremman sähköntuotannon ja -varastointikapasiteetin verrattuna nykyisiin, polttomoottorikäyttöisiin ajoneuvoihin [51, s. 25]. Kuitenkin 2030-luvulle mentäessä suuri osa jalkaväen ajoneuvokalustosta perustuu edelleen polttomoottoritekniikkaan, johtuen kohdassa 2.2 mainituista uusien järjestelmien käyttöönottoon liittyvistä seikoista.

2.5. Yhteenveto – kehityksen vaikutus joukkojen toimintaan

Teknologian kehitys parantaa jo olemassa olevia suorituskykyjä ja tuo niiden rinnalle uusia, esimerkkeinä UAV- ja UGV-järjestelmien mukanaan tuomat suorituskyvyt ja lisääntyvien sensoreiden sekä tietoverkkojen mahdollistama tilannetiedon jakaminen.

Tulevaisuudessa taistelut keskittynevät yhä enenevässä määrin rakennetuille alueille. Pahimmassa tapauksessa jalkaväkitaistelua joudutaan käymään siviiliväestön keskuudessa, jolloin korostuu joukkojen kyky erottaa erilaiset kohteet toisistaan sekä käyttää aseellista voimaa tarkasti ja joustavasti. Ei-tappavan voiman käyttö korostuu tilanteissa, joissa halutaan rajoittaa ulkopuolisille henkilöille ja materiaalille aiheutuvia vaurioita.

Mikro- ja minikokoisten UAV-järjestelmien sekä UGV-järjestelmien käyttö mahdollistaa joukoille tiedustelun, valvonnan ja maalittamisen sekä tulenkäytön oman ryhmityksensä ulkopuolelle ja katvealueille. Erilaiset autonomiset, miehittämättömät järjestelmät mahdollistavat vaikutuksen ulottamisen etäämmälle ja myös paikkoihin, joihin ihmisen (sotilaan) olisi liian riskialtista mennä, esimerkiksi rakennetuilla alueilla. Miehittämättömät järjestelmät ja niiden sensorit yhdistettynä kattaviin tietoverkkoihin voivat myös lisätä joukkojen tilannetietoisuutta huomattavasti [44, s. 22]. Autonomisia järjestelmiä käyttämällä voidaan ottaa suurempia riskejä, mikä nopeuttaa joukon taktista liikkumista ja mahdollistaa rohkeampia taisteluliikkeitä [34, s. 72].

Taistelukentän digitalisaatio ja tietoverkkojen lisääntymisen sekä tiedustelun, valvonnan ja maalittamisen kykyjen lisääntyminen tuo jalkaväkijoukoille huomattavan määrän tietoa saatavilleen. Tulevaisuudessa jokaisella sotilaalla voikin olla käytössään jonkinlainen radio ja/tai taistelijan päätelaite, joilla voi olla yhteydessä erilaisiin tietojärjestelmiin ja esimerkiksi tiedustelutietoa tuottaviin lennokkeihin.

Selviytymisen kannalta olennaista on minimoida vihollisen asevaikutus omiin joukkoihin ja järjestelmiin. Kehittyneiden, useilla eri aallonpituusalueilla toimivien sensorien yleistyminen saattaa tehdä piiloutumisesta ja maastoutumisesta vaikeampaa, jolloin vihollisen vaikutuksen väistäminen liikkumalla ja harhauttamalla nousee selviytymisen kannalta olennaiseen osaan. Suojautumisen ja piiloutumisen vaikeutta lisää se, että sensorit voivat toimia verkostossa, jossa voidaan käyttää tilanteen kannalta parasta sensoria sekä yhdistää eri sensoreiden tuottama tieto sensorifuusion avulla [34, s. 64].

Teknologisten järjestelmien yleistyminen vaatii myös jalkaväkijoukon virranhallinnan kehittämistä, jotta jalkaväkijoukot kykenevät operoimaan itsenäisesti pitkiäkin aikoja. Näillä näkymin joukkojen virranhallinnan keskeisenä tekijänä on edelleen joukon ajoneuvojen tai muiden polttoainekäyttöisten generaattorien käyttäminen virran tuottamiseen.

3. ENERGIA-ASEET

Tässä luvussa käsitellään laser- ja mikroaaltoaseiden toimintaperiaatteita, vaikutusta kohteessa, vuorovaikutusta ympäristön ja ilmakehän kanssa, kehityksen nykytilannetta sekä arviota niiden kehityksestä. Kyseisten asejärjestelmien fysikaalisia toimintaperiaatteita on käsitelty useissa muissa teoksissa ja tutkimuksissa, joten tässä tutkimuksessa pitäydytään järjestelmien teknisessä tarkastelussa ja näkökulmana on asejärjestelmien ominaisuuksien tarkastelu pääosin maavoimien joukkojen taistelun näkökulmasta.

3.1. Yleistä

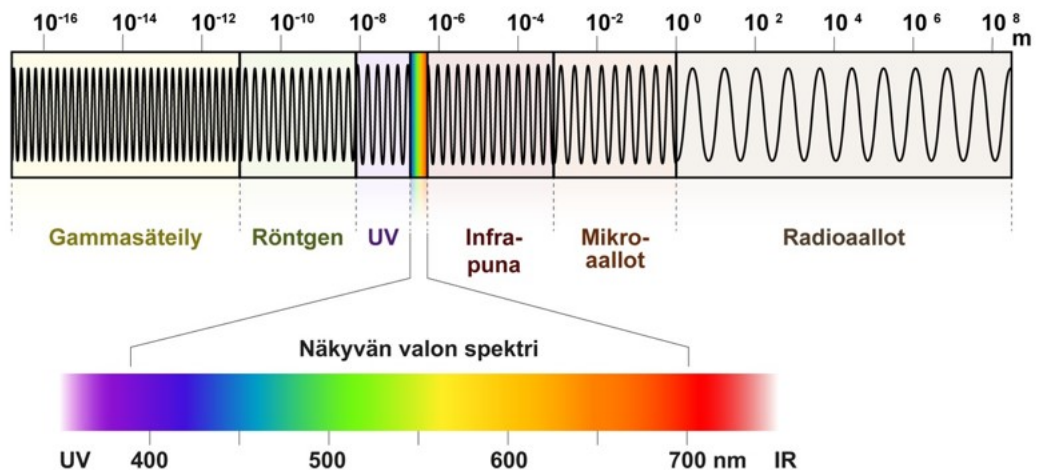
Energia-aseiden toiminta perustuu sähkömagneettisen säteilyn tuottamiseen ja suuntaamiseen kohteeseen. Riittävän voimakkaalla säteilyllä voidaan saada kohteessa aikaan erilaisia vaikutuksia, joita tarkastellaan tarkemmin luvuissa 3.2.2 ja 3.3.2.

Energia-aseiden kehittämisen tavoitteena on saada aikaan asejärjestelmä, joka kykenee muuttamaan sähköistä energiaa suoraan sähkömagneettiseksi säteilyksi. Tällöin asejärjestelmä toimii pelkästään sähköllä, ei kuluta ampumatarvikkeita eikä sitä tarvitse täydentää kuluvilla materiaaleilla. [52, s. 1] Tästä syystä esimerkiksi suuritehoisten lasereiden kehityksessä ollaan siirrytty kemiallisista lasereista (*chemical lasers*) kohti kiinteän olomuodon lasereita (*solid-state lasers, SSL*), sillä kemialliset laserit tarvitsevat toimiakseen kuluvia kemiallisia yhdisteitä [23, s. 31].

Ilman erillisiä ampumatarvikkeita toimivalla asejärjestelmällä saavutetaan useita hyötyjä. Ampumatarvikkeet vievät suuria määriä tilaa, ne painavat paljon ja niiden valmistaminen, varastointi sekä käsittely on riskialtista. Ampumatarvikkeita kyetään varastoimaan ja kuljettamaan vain rajallinen määrä, mikä rajoittaa asejärjestelmien käyttöä ja luo logistisia haasteita, minkä lisäksi ampumatarvikkeet itsessään voivat olla hyvinkin kalliita. Asejärjestelmän toimiminen sähköllä yksinkertaistaa asejärjestelmän tarvitsemää logistiikkaa, kun sen ampumatarvikkeita ei tarvitse erikseen hankkia, kuljettaa ja varastoida [52, s. 1]. Mikäli energia-ase kyetään integroimaan esimerkiksi ajoneuvon sähköjärjestelmään, se voisi käyttää energianlähteenään samaa järjestelmää kuin itse ajoneuvokin [51, s. 67].

Koska sähkömagneettinen säteily etenee valonnopeudella c , energia-aseiden vaikutus ”osuu” kohteeseensa käytännössä välittömästi. Tästä syystä energia-aseilla ei ole tarvetta ennakoida kohteen liikettä samalla tavoin kuin fyysisiin ammuksiin perustuvilla asejärjestelmillä. Energia-aseiden vaikutusta voi olla samasta syystä johtuen myös hyvin haastavaa väistää. [41, s. 392]

3.1.1. Sähkömagneettinen säteily



Kuva 4. Sähkömagneettinen spektri [53]

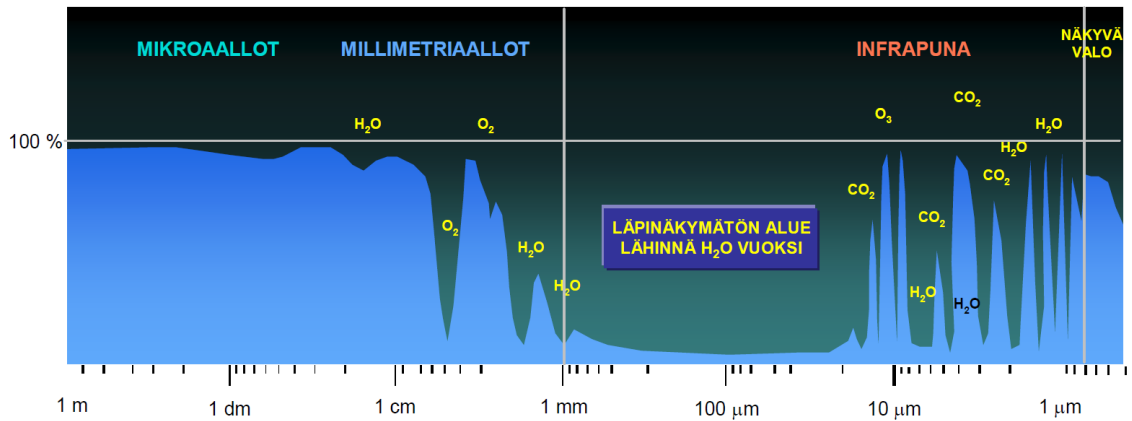
Sähkömagneettinen spektri on jaettu eri alueisiin säteilyn aallonpituuden perusteella. Nykyisin erilaisten laserlähettinten aallonpituusalue ulottuu kolmesta nanometristä kolmeen millimetriin [41, s. 318], mutta pääosa yleisesti käytössä olevista lasereista toimii näkyvän valon, UV-säteilyn ja IR-säteilyn aallonpituusalueilla (kuva 4). HPM-aseet toimivat nimensä mukaisesti (pääosin) mikroaaltoalueella.

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

Kaava 1. Aallonpituuden ja taajuuden välinen suhde

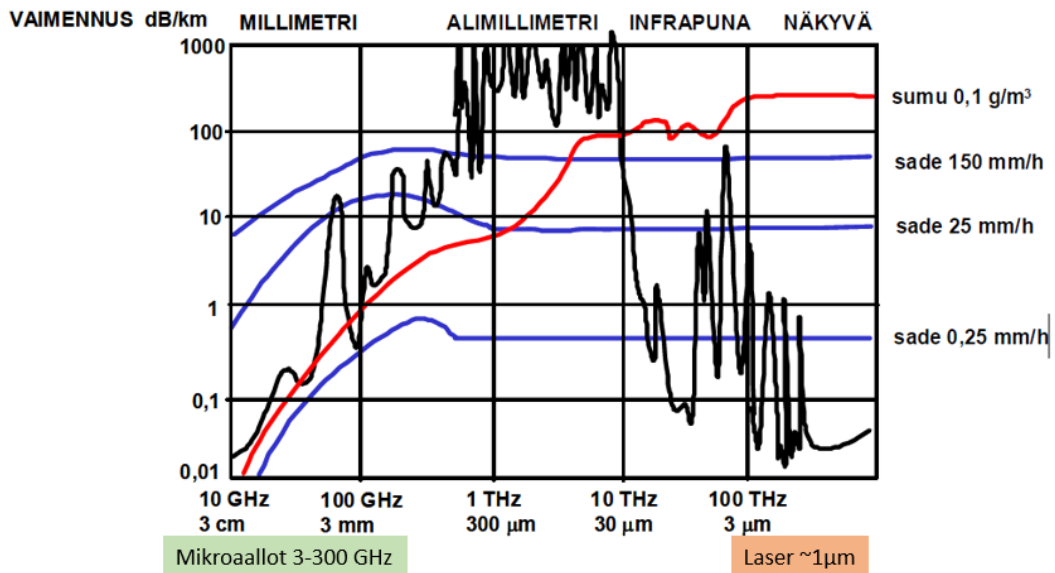
Sähkömagneettisen säteilyn taajuus f voidaan laskea sen aallonpituudesta λ (kaava 1) ja valon nopeudesta c . Esimerkiksi lasersäteen, jonka aallonpituus λ on 1050 nm, taajuus f on 285,5 THz (kaava 1). Mikroaaltojen taajuus on tätä huomattavasti pienempi, 3 GHz – 300 GHz, eli niiden aallonpituus vaihtelee 10 cm ja 0,1 cm välillä. [41, s. 39] Huomattavaa on, että HPM-aseista puhuttaessa voidaan tarkoittaa myös laitteita, joiden käyttämä taajuus on mikroaaltoalueen taajuuksia alhaisempi, esimerkiksi 300 MHz [11, s. 6].

Usein alhaisempia taajuuksia (esimerkiksi radio- ja mikroaallot) käsiteltäessä on luontevampaa puhua niiden taajuudesta ja korkeampia taajuuksia (näkyvä valo, infrapuna) käsitellessä niiden aallonpituudesta. [41, s. 43] Tästä syystä laserlaitteita käsiteltäessä käytetään niiden aallonpituusalueita ja mikroaaltoaseita käsitellessä niiden käyttämää taajuutta.



Kuva 5. Alailmakehän läpinäkyvyys eri aallonpituusalueilla [41, s. 57]

Asevoimien käytössä olevat laserlaitteet toimivat useimmiten näkyvän valon tai infrapunasäteilyn aallonpituuksilla. Puolustusvoimien käytössä olevat laserlaitteet toimivat aallonpituusvälillä 532 – 1574 nm [24, Liite 2] eli pääasiassa näkyvän punaisen valon ja lähi-infrapunavalon (NIR, *Near Infra Red*) alueilla. Näitä aallonpituusalueita hyödynnetään laserlaitteissa laajalti siitä syystä, että ilmakehän kaasut absorboivat vain vähän kyseisen aallonpituusalueen (n. 1050 nm) säteilyä [11].



Kuva 6. Ilmakehän kaasujen absorptiosta sekä kosteudesta johtuva vaimennus eri aallonpituusalueilla. [41, s. 64]

3.1.2. Säteilyn suuntaaminen

Sähkömagneettista säteilyä tuottavan laitteen (esimerkiksi laser- tai HPM-aseen) tuottama säteily suunnataan kohteeseen käyttämällä jonkinlaista suuntaavaa *antennia* (mikroaaltojen tapauksessa) tai *linssiä* (lasersäteen tapauksessa). Molemmissa tapauksissa suuntaavan elementin (*aperture*) koko D ja säteilyn aallonpituus λ vaikuttavat säteilyn poikkeamaan eli divergenssiin θ (*divergence*) kaavan (2) mukaisesti. [29, s. 210]

$$\theta \approx \lambda / D \quad (2)$$

Kaava 2. Säteen poikkeaman, aallonpituuden ja suuntaavan elementin halkaisijan välinen suhde (radiaania)

Sähkömagneettinen säteily pysyy *kollimoituna* eli samansuuntaisena tietyn matkaa sen jälkeen, kun säde poistuu suuntaavasta elementistä. Kollimoidun säteen poikkeama ei kasva etäisyyden mukana, vaan säteen poikkeama pysyy samana. Etäisyyttä Z_r , jolla säde pysyy kollimoituna, kutsutaan *Rayleighin etäisyydeksi* (*Rayleigh range*) ja se lasketaan kaavalla (3). [29, s. 213] Z_r on riippuvainen aallonpituudesta λ ja suuntaavan elementin halkaisijasta D .

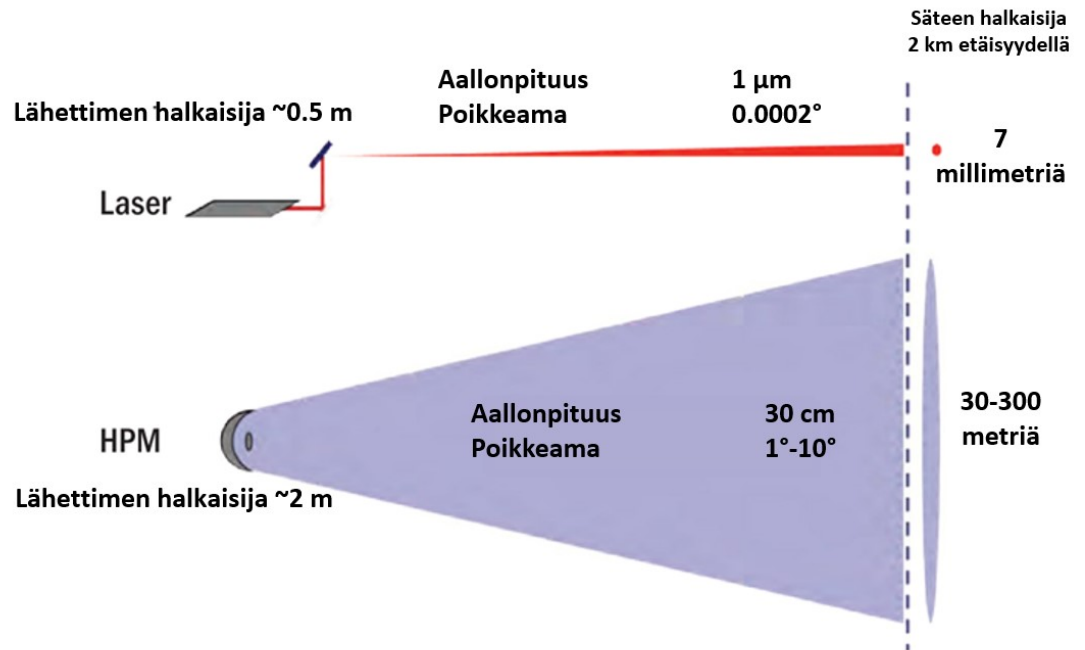
$$Z_r = \pi D^2 / \lambda \quad (3)$$

Sähkömagneettisen säteilyn eteneminen voidaan Rayleighin etäisyyden mukaan jakaa lähikenttään (*near field*) ja kaukokenttään (*far field*). Kaukokentässä Rayleighin etäisyyden ulkopuolella säteen poikkeama lasketaan kaavan 2 mukaisesti, mistä johtuen kaukokentän alueella tapahtuvan etenemisen seurauksena säteilyn tehotiheys laskee verrattuna lähikentässä tapahtuvaan etenemiseen [29, s. 105].

Lasersäteilyn tapauksessa aallonpituuden λ ollessa $1 \mu\text{m}$ ja lähettimen halkaisijan D ollessa 1 m , lähikentän pituus Z_r on kaavan 3 mukaisesti noin 3142 km . Vastaavasti mikroaaltojen tapauksessa, kun $D = 1 \text{ m}$ ja $\lambda = 1 \text{ cm}$ ($f = 30 \text{ GHz}$), lähikentän pituus Z_r on noin 314 m . Mikroaaltoantennin halkaisijan kasvattaminen 10 metriin samalla aallonpituudella saisi lähikentän etäisyyden kasvamaan noin $31,4$ kilometriin.

Koska laser- ja HPM-aseet toimivat eri taajuualueilla, myös niiden käyttämät suuntaimet ovat edellä mainittujen ilmiöiden vuoksi eri kokoisia. Mikroaaltoaseiden suuremman aallonpituuden vuoksi niiden suuntaimien tulisi olla huomattavasti suurempia kuin laseraseiden, mikäli niillä halutaan päästä yhtä pieniin poikkeamiin. Tämän mittaluokan suuntausantennit eivät kuitenkaan ole käytännöllisesti järkeviä toteuttaa, joten HPM-aseiden säteen poikkeama on

laseraseiden poikkeamaa suurempi ja niiden suuntaimet ovat laseraseiden suuntaimia kookkaampia (kuva 7). [41, s. 209]



Kuva 7. Kuvaus Laser- ja HPM -aseiden säteiden halkaisijasta (muokattu lähteestä [23, s. 40])

3.2. Laseraseet

“Laser” on lyhenne sanoista *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Termi on kuitenkin niin vakiintunut kielenkäyttöön, että sitä käytetään sellaisenaan eikä pelkästään lyhenteenä. Usein ”laser” itsessään viittaakin laitteeseen, joka tuottaa lasersäteilyä.

Ensimmäiset laserlaitteet rakennettiin 1960-luvulla, minkä jälkeen niiden kehitys on ollut jatkuvaa. Laserit ovat elintärkeä osa useaa nykyaikaista teknistä järjestelmää ja teollisuuden alaa. Käytännössä heti ensimmäisten lasereiden kehittämisen jälkeen myös asevoimat ovat olleet kiinnostuneet lasereiden potentiaalista. [14, s. 69-72]

3.2.1. Toimintaperiaate

Laserit toimivat tuottamalla säteilyä laseroivasta väliaineesta (*lasing medium*) syöttämällä siihen energiaa ja voimistamalla tätä säteilyä ja lopuksi kohdistamalla sen ulos laitteesta lasersäteenä. Laserlaitteen tuottaman säteen on fotonit ovat samassa vaiheessa, eli sen tuottama säteily on koherenttia. Laserista lähtevä valo on kollimoitua eli samansuuntaista, minkä vuoksi pulssi pysyy koossa edetessään kohteeseensa eikä juurikaan vaimene leviämisen vuoksi. [41, s. 314]

Laserit voidaan jakaa laseroivan väliaineen mukaisesti esimerkiksi kemiallisiin lasereihin (*chemical laser*), kaasulasereihin (*gas laser*), vapaaelektronilasereihin (*free-electron laser, FEL*) ja kiinteän olomuodon lasereihin (*solid state laser, SSL*). [23, s. 27]

Kemiallisilla lasereilla, kaasulasereilla ja vapaaelektronilasereilla voidaan saavuttaa kiinteän olomuodon lasereita suuremmat tehot. Tämänäyttöiset laserjärjestelmät vaativat kuitenkin runsaasti tilaa verrattuna kiinteän olomuodon lasereihin, joilla päästään parempiin teho-painosuhteisiin. Kemiallisten lasereiden tapauksessa niiden laseroiva väliaine voi myös olla hyvinkin haitallista ja se kuluu käytön aikana, mikä vaatii väliaineen täydentämistä [23, s. 29]. Arvion mukaan kiinteän olomuodon lasereilla päästään kemiallisiin lasereihin verrattuna jopa 30 kertaa parempiin teho-painosuhteisiin (kg/kW) [54]. Yksi esimerkki asekäyttöön tarkoitetusta kaasulaserista on Yhdysvaltain ilmavoimien *Airborne Laser (ABL)*, joka käyttää COIL-tyyppistä laseria (*chemical oxygen-iodine laser*) – kyseisellä asejärjestelmällä päästään megawattiluokan tehoihin, mutta se myös painaa kokonaisuudessaan yli 90 tonnia [23, s. 30].

Kiinteän olomuodon laserit voidaan jakaa rakenteensa mukaan edelleen kuitu- (*fiber*), laatta- (*slab* tai *bulk*) ja kiekkolasereihin (*thin-disk*). [23, s. 33] Kiinteän olomuodon lasereiden laseroiva väliaine on nimensä mukaisesti kiinteää, toisin kuin kemiallisissa tai vapaaelektronilasereissa. Kiinteän olomuodon laserit ovat yleistyneet laserasejärjestelmissä osittain siksi, että niiden avulla lavetin tuottama sähköteho on helpoimmin muunnettavissa optiseksi laservalotehoksi hyvällä laatutekijällä verrattuna muun tyyppisiin lasereihin [11, s. 27].

Kiinteän olomuodon lasereiden etuna on mahdollisuus suhteellisen yksinkertaisesti yhdistää usean laserlähteen säteet voimakkaammaksi lasersäteeksi. Yksittäisen kuitulaserin maksimiteho on noin 20 kW ja yksittäisen laserlaatan noin 15 kW [11]. Tehokkaampien laseraseiden kehittäminen tämänäyttöisiä lasereita hyödyntämällä vaatii siis useamman säteen yhdistämistä. Tällainen rakenne mahdollistaa kuitenkin myös yksittäisten laserlähteiden jäädyttämisen [11; 55]. Toisaalta useampien matalatehoisten laserien yhdistäminen yksittäiseksi lasersäteeksi (tai niiden säteiden kohdistaminen samaan kohteeseen) tekee koko laserasejärjestelmästä monimutkaisemman toteuttaa.

3.2.2. Vaikutus kohteessa

Laseraseen vaikutus kohteessa riippuu säteen tehosta sen osuessa kohteeseen sekä kohteen laadusta. Säättämällä laseraseen säteen tehoa sillä voidaan saavuttaa erilaisia vaikutuksia kohteessa. Matalilla tehoilla laseria voidaan käyttää kohteiden havaitsemiseen ja etäisyyksien mittaamiseen sekä kohteiden varoittamiseen. Suuremmilla tehoilla kohteiden sensoreita

voidaan hetkellisesti häiritä (*jamming*), kohteet voidaan lamauttaa esimerkiksi tuhoamalla niiden sensoreita tai kohteet voidaan tuhota aiheuttamalla niille rakenteellisia vaurioita. [56, s. 24]

Kohteesta riippuen siinä voi olla useita erilaisia sensoreita, joita voidaan häiritä heikollakin lasersäteellä. Esimerkiksi taisteluajoneuvoissa näkyvän valon tai infrapuna-aallonpituuden lämpökameroita voi olla mahdollista hetkellisesti sokaista lasersäteellä ilman, että komponentit vaurioituvat. Tällöin ajoneuvon toiminta saattaa kokonaisuutena häiriintyä, jos esimerkiksi sen aseiden käyttö perustuu kameran käyttöön. Häirintä on vain hetkellistä, ja jos komponentteja ei vaurioiteta, laserhäirinnän loppuessa myös sensoreiden toimintakyky palautuu.

Kriittistä laseraseen vaikutuksen kannalta on sen kyky siirtää energiaa kohteen materiaaliin riittävän nopeasti, jotta sillä kyetään aiheuttamaan rakenteellisia vaurioita [29, s. 101]. Jos kohteen materiaalia ei saada kuumennettua riittävän nopeasti, lopputuloksena on vain kohdemateriaalin lämpeneminen. Lasersäteen kyky siirtää energiaa kohdemateriaaliin riippuukin aseiden tehon lisäksi kohteen materiaalin ominaisuuksista sekä kohteen rakenteesta. Metalleilla on esimerkiksi hyvä lämmönjohtamiskyky ja melko korkeat sulamispisteet, joten jos lasersäteen osumakohdan materiaali on esimerkiksi paksua terästä, riittävän lämpötilan aikaansaaminen pinnassa voi olla haastavaa tuotetun lämmön siirtyessä tehokkaasti osumakohtaa ympäröivään materiaaliin.

Lasersäteen osuessa kohteeseen sen pintamateriaali saattaa äkillisesti höyrystyä. Tällöin osumakohdan alueelle muodostuu pieni höyrypilvi, joka saattaa heikentää lasersäteen vaikutusta kohteessa säteen energian kohdistuessa höyrypilveen. Tämän ilmiön vaikutusta laseraseen tehoon voidaan pyrkiä vähentämään ampumalla lasersäde useina lyhyinä pulsseina yhden jatkuvan säteen sijasta. Pulssien välillä pintamateriaalista muodostuneella höyryllä on aikaa haihtua osumakohdasta. [14, s. 75]

3.2.3. Ympäristön vaikutukset

3.2.3.1. Ilmakehä

Käytettäessä laserasetta ilmakehän sisällä aseiden ja kohteen välissä olevan väliaineen (ilman) koostumuksella on suuri vaikutus lasersäteen tehoon kohteessa. Ilmassa oleva kosteus (sade, sumu, pilvet), pienhiukkaset (pöly, savu) sekä ilman tiheyden poikkeamat (turbulenssi) vaikuttavat kaikki laseraseen hyötysuhteeseen. Pahimmassa tapauksessa laseraseen käyttö estyy huonoissa olosuhteissa kokonaan. Etenkin sade vaikuttaa laserin tehokkuuteen hyvin negatiivisesti, kun säteen teho siirtyy itse säteestä ilmassa oleviin vesipisaroihin (absorptio).

Myös laseraseen tuottaman säteilyn aallonpituus vaikuttaa sen kykyyn läpäistä ilmakehää, sillä eri aallonpituuden säteily absorboituu ilmakehään eri suhteessa (Kuva 5) [29, s. 93; 11].

Lasersäteen varrella olevat ilman tiheyden poikkeamat aiheuttavat säteeseen taittumaa (refraktio). Säteen edetessä eri tiheyksisten ilmakerrosten välillä se taittuu hieman, mikä vähentää säteen tarkkuutta ja lisää säteen osumapinta-alaa kohteessa, mikä taas heikentää lasersäteen tehoa. Vaikutusetäisyyden kasvaessa myös säteen refraktio lisääntyy, mikä absorption ohella vähentää säteen tehoa kohteessa. [41, s. 319; 11]

3.2.3.2. Kiinteät esteet

Laser on yksinkertaistetusti hyvin tarkasti kohdistettua voimakasta valoa. Näin ollen laserase vaatii toimiakseen suoran näkölinjan (*line of sight*, LOS) kohteeseensa. Laser ei kykene vaikuttamaan sellaisen materiaalin läpi, jota säde ei aallonpituutensa vuoksi läpäise. Painovoima ei myöskään (merkittävästi) vaikuta lasersäteen kulkuun, joten laserilla ei voida vaikuttaa ”kaarevasti” tai horisontin taakse. [56, s. 24]

3.3. HPM-aseet

Mikroaaltoaseen (HPM-ase) toiminta perustuu sähkömagneettisen säteilyn tuottamiseen ja suuntaamiseen kohteeseen. HPM-aseista käytetään myös nimitystä HPRF-aseet (High Power Radio Frequency) johtuen siitä, että mikroaallot ovat tietyn taajuuksia radioaaltoja [41, s. 64]. 30 GHz taajuudesta ylöspäin voidaan puhua myös millimetriaaltoalueesta, sillä tällä alueella säteilyn aallonpituus on millimetrien luokkaa [41, s. 65]. Tässä tutkimuksessa HPM-aseilla viitataan kaikkiin asejärjestelmiin, joiden toiminta perustuu radio- tai mikroaaltojen tuottamiseen ja suuntaamiseen kohteeseen.

Kohteesta ja käytetystä aseiden tehosta riippuen mikroaallot saavat kohteessa aikaan erilaisia vaikutuksia. Ihmisiä vastaan käytettäessä mikroaalloilla voidaan saada aikaan biologisia tai neurologisia vaikutuksia [14, s. 95]. Erilaisiin laitteisiin HPM-aseella pyritään vaikuttamaan häiritsemällä, lamauttamalla, vaurioittamalla tai tuhoamalla laitteiden sähköisiä komponentteja. [41, s. 97]

HPM-ase voidaan toteuttaa useilla tavoilla: esimerkiksi kertakäyttöisenä räjähteenä, taistelukärkenä ohjuksessa tai lavetille asennettuna mikroaaltolähtetimenä. [41, s. 395] Tässä tutkimuksessa keskitytään liikuteltaviin, lavetille asennettuihin mikroaaltolähtetimiin, sillä niillä on tutkijan arvion mukaan vaihtoehtoista suurin käyttöarvo jalkaväen taistelun näkökulmasta.

HPM-aseiden tuottama säde on huomattavasti laseraseiden sädettä laajempi, johtuen järjestelmien tuottaman säteilyn aallonpituudesta ja säteen keskittämisen haasteista (kaava 2). HPM-aseilla voitaisiin näin ollen mahdollisesti torjua kohteita laserasetta laajemmalla alueella, jolloin sitä voitaisiin käyttää tehokkaasti esimerkiksi drone-parvia (*swarm*) vastaan [57].

3.3.1. Toimintaperiaate

HPM-aseet muodostavat mikroaaltopulssin ja suuntaavat sen kohteeseensa suuntaavaa antennia käyttämällä. HPM-pulssin muodostamistavasta riippuen HPM-aseen mikroaaltolähde voi olla kertakäyttöinen tai monikäyttöinen [41, s. 395]. Tässä tutkimuksessa keskitytään HPM-aseisiin, jotka eivät ole kertakäyttöisiä.

HPM-ase voi olla joko kapealla tai laajalla kaistalla toimiva. Kapeakaistaiset HPM-aseet lähettävät nimensä mukaisesti mikroaaltosäteilyä kapealla taajuuskaistalla, minkä ansiosta niillä voidaan saada aikaan erittäin suuri teho kyseillä aallonpituudella. Laajakaistaiset HPM-aseet lähettävät säteilyä leveämmillä taajuuskaistoilla, jolloin niiden vaikutus ulottuu useammille aallonpituuksille mutta niiden teho per aallonpituusalue jää heikommaksi. [19, s. 15-17]

HPM-aseiden rakenteesta johtuen ne toimivat vain tietyillä aallonpituusalueilla. Samalla asejärjestelmällä voidaan toimia vain niillä aallonpituusalueilla, joihin se rakenteellisesti soveltuu. Järjestelmän käyttämää aallonpituusaluetta ei siis juurikaan voi säätää: tästä johtuen eri aallonpituusalueilla toimimiseen vaaditaan eri laitteet. Näin ollen laajakaistaiset HPM-aseet ovat kapeakaistaisempia HPM-aseita käyttökelpoisempia useammassa eri käyttötilanteessa, kun kohteiden käyttämät aallonpituudet eivät ole tiedossa tai kohteet toimivat usealla eri aallonpituudella. [19, s. 17]

3.3.2. Vaikutus kohteessa

Mikroaaltojen vaikutusperiaate kohteessa riippuu siitä, millainen kohde on kyseessä. Karkeasti mikroaaltoaseiden mahdolliset kohteet voidaan jakaa ihmisiin ja laitteisiin.

Ihmisiä vastaan suunnattujen mikroaaltoaseiden käyttötarkoituksena on yleisesti joukkojen hallinta, eivätkä aseet ole tällöin suunniteltuja tuottamaan pysyviä vaurioita. Ihmisiä vastaan käytettäessä mikroaaltoaseen vaikutus riippuu aseiden tehosta ja käytetystä taajuudesta. Yhdysvalloissa kehitetty ADS-järjestelmä (*Active Denial System*) toimii 95 GHz taajuudella (M-kaista). Sen toiminta perustuu ihmisen ihon pintakerroksissa olevien molekyylien kuumentamiseen, millä pyritään saamaan kohteessa hetkellisesti aikaan voimakas kivun tunne ja näin pakottamaan ihminen väistymään säteen tieltä. [14, s. 96] Mikroaalloilla voidaan saada

ihmisessä aikaan myös neurologisia vaikutuksia [14, s. 95], mutta niitä ei tässä tutkimuksessa tarkastella.

Laitteita vastaan käytettäessä HPM-aseen toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon: mikroaallot saavat kohteen virtapiireissä sähkömagneettisella induktiolla aikaan virtapiikin, joka voi häiritä, lamauttaa, vaurioittaa tai tuhota virtapiirin komponentteja. Tämä voi aiheuttaa kohdelaitteen hetkellisen lamautumisen tai kohteen elektroniikan tuhoutumisen. [41, s. 397]

HPM-aseiden vaikutusta laitteisiin voidaan luokitella seuraavalla tavalla [9]:

Häiritseminen (upset) tarkoittaa vaikuttamista komponenttien toimintaan tai niiden toiminnan hetkellistä estämistä. Kun häiritsevä signaali lakkaa vaikuttamasta järjestelmään, järjestelmän toiminta palautuu normaaliksi.

Lamauttaminen (lockup) aiheuttaa samanlaisia vaikutuksia komponenteille kuin häirintä, mutta lamauttamisen vaikutukset poistuvat vasta kun järjestelmä tai komponentit käynnistetään uudestaan.

Vaurioittaminen (latch-up) tarkoittaa komponenttien toiminnan pysäyttämistä, joko katkaisemalla niiden sähkönsaanti tai aiheuttamalla komponenttiin rakenteellisia vaurioita.

Tuhoaminen (burnout) tarkoittaa komponenttien vaurioittamista pysyvästi eli niiden fyysistä tuhoutumista.

Mikroaaltosäteilyllä voidaan vaikuttaa kohdelaitteen elektroniikkaan joko suoralla tai epäsuoralla kytkeytymisellä (*front door* tai *back door* -kytketyminen). Suorassa kytkeytymisessä mikroaallot indusoituvat kohteen antennien ja metallisten johtimien kautta kohteen kaapeliyhteyksiin ja niitä pitkin kohteen laitteiston herkkiin komponentteihin. Epäsuorassa kytkeytymisessä mikroaallot tunkeutuvat kohteen virtapiireihin esimerkiksi läpivientien, luukkujen ja saumojen rakojen kautta. [29, s. 393] Suoralla kytkeytymisessä voidaan päästä epäsuoraa kytkeytymisessä selvästi parempaan hyötysuhteeseen, mutta se edellyttää, että käytettyjen mikroaaltojen taajuus vastaa kohdelaitteen antennien tai muiden johtimien toimintataajuuksia [41, s. 398].

Kapeakaistaisella HPM-aseella pääasiallinen vaikutusmekanismi on suora kytketyminen, edellyttäen että ase käyttämä taajuus vastaa kohteen käyttämää taajuutta. Kapeasta aallonpituusalueesta johtuen mahdollisuus vaikuttamiseen epäsuoralla kytkeytymisellä on tällaisella aseella epävarmaa. Leveäkaistaisella HPM-aseella taas epäsuora kytketyminen on

merkittävämpää, sillä laajemmalla taajuusalueella pääsee todennäköisemmin tunkeutumaan kohdejärjestelmän ”heikoista kohdista”. [19, s. 17]

3.3.3. Ympäristön vaikutukset

3.3.3.1. Ilmakehä

Lasersäteisiin verrattuna ilmakehän olosuhteet vaikuttavat mikroaaltojen etenemiseen huomattavasti vähemmän. [3, s. 1039] Pääasiallisesti mikroaaltojen vaimenemiseen ilmakehässä vaikuttavat vesipisarat. Sademääriä voidaan määrittellä seuraavasti: tihkusade 0,2 – 1 mm/h, sadekuuro 2 – 5 mm/h, rankkasade 16 mm/h tai hetkittäin 25 – 50 mm/h [41, s. 67]. Kuvasta 6 on nähtävissä sademäärän vaikutus mikroaaltojen vaimenemiseen – voidaan siis todeta, että sade vaikuttaa HPM-aseiden toimintaan vain vähän, etenkin lyhyillä käyttöetäisyyksillä.

3.3.3.2. Kiinteät esteet

Aallonpituudestaan johtuen mikroaallot läpäisevät suurimman osan ei-sähköä johtavista eristävistä materiaaleista (*insulator*), mutta heijastuvat suurimmasta osasta metalleja. [29, s. 212] Mikroaaltopulssi kuitenkin vaimenee edetessään kiinteässä aineessa, sitä enemmän mitä suurempi on mikroaaltojen taajuus [41, a. 397]. Tästä syystä mikroalloilla ei välttämättä kyetä vaikuttamaan tehokkaasti myöskään kiinteiden esteiden läpi, vaikka esteen materiaalit olisivatkin ei-sähkönjohtavia.

3.4. Energia-aseiden nykytilanne ja TRL-taso

Useissa maailman valtioissa ollaan kehittämässä tai on jo kehitetty eritasoisia laseraseita asevoimien käyttöön: muun muassa Yhdysvallat, Kiina, Israel, Venäjä, Intia, ja Iso-Britannia ovat ilmoittaneet jonkinlaisten laserasejärjestelmien kehittämisestä. Pisimmälle kehityksessä ovat todennäköisesti edenneet Yhdysvallat ja Kiina. Eri tasoisia HPM-aseohjelmia on myös ollut käynnissä useissa eri maissa, ainakin Yhdysvalloissa, Kiinassa, Venäjällä ja Intiassa. [10; 11] Yhdysvalloissa puolustusministeriö on hakenut vuoden 2023 budjettiin yhteensä 1014 miljoonaa dollaria (julkisia) energia-aseiden tutkimus-, kehittämis- ja hankintaohjelmia varten [57].

Maailmalla käynnissä olevia ja aikaisemmin käynnissä olleita energia-aseohjelmia on esitelty melko kattavasti jo aikaisemmassa tutkimuksessa [9; 11; 10], mistä johtuen niitä käsitellään tässä tutkimuksessa vain pinnallisesti.

Taulukossa 3 on esitelty Yhdysvalloissa käynnissä olevia eri tasoisia maavoimien (*army*) käyttöön suunnattuja energia-aseohjelmia. [21] Nämä antavat tutkijan arvion mukaan parhaiten kuvaa jalkaväen käyttöön suunnattujen energia-aseiden tämänhetkisestä kehityksestä maailmalla. Myös laivaston käyttöön ollaan kehittämässä erilaisia energia-aseisiin perustuvia torjuntajärjestelmiä, mutta laivoihin asennettavilla asejärjestelmillä ei ole samanlaisia koko- ja painorajoitteita kuin maalla liikkuviin ajoneuvoihin asennettavilla järjestelmillä – tästä syystä maavoimien ohjelmat antavat paremmin kuvaa asejärjestelmistä, jotka voivat olla jalkaväen käytettävissä.

Taulukko 3. Käynnissä olevia Yhdysvaltojen maavoimien DEW-hankkeita. [21; 57]

Ohjelma	Tyyppi /Tehotavoite	Kohde / Tehtävä	Alusta
DE M-SHORAD Directed Energy Maneuver Short Range Air Defense	Laser 50 kW	C-UAS luokat 1-2 C-RAM	Panssariajoneuvo (Stryker)
AMP-HEL Army Multi-Purpose High Energy Laser	Laser 20 kW	C-UAS luokat 1-2	Jalkaväen ryhmäajoneuvo (Infantry Squad Vehicle)
IFPC-HEL Indirect Fire Protection Capability-High Energy Laser	Laser 300 kW	C-RAM, C-UAS luokat 1-3, lentokoneet	Kuorma-auto
IFPC-HPM Indirect Fire Protection Capability-High Power Microwave	HPM	C-UAS luokat 1-2	Kontti/Ajoneuvoilla siirrettävä
P-HEL Palletized-High Energy Laser	Laser 10-20 kW	C-UAS luokat 1-2	Siirrettävä

Eri järjestelmien nykyisen TRL-tason ja täyden teknologisen valmiuden eli TRL 9-tason saavuttamisen arvioinnin kannalta on oleellista tunnistaa järjestelmiltä vaadittavat *tavoitellut suorituskyvyt* ja järjestelmien *tekninen monimutkaisuus*. Mitä monimutkaisempi järjestelmä, sitä pidempään sillä kestää saavuttaa TRL 9-taso [9, s. 15]. Energia-aseiden tapauksessa kyseessä ovat monimutkaiset järjestelmät, ja arvion mukaan niiden kehitys TRL 6 -tasolta TRL 9 -tasolle voi kestää 6-9 vuotta; TRL 4 -tasolta kehitys TRL 9-tasolle voi kestää 6-16 vuotta [9, s. 86].

Järjestelmien kehityksen vaihetta määrittävät myös niiden tavoitellut suorituskyvyt: esimerkiksi 100 kW kiinteän olomuodon laserasejärjestelmiä on jo demonstroitu [9, s. 93], mutta niiden koon ja painon pieneneminen sellaisiksi, että niitä voidaan hyödyntää taisteluajoneuvoissa, vaatii edelleen kehitystyötä. Tästä voidaan käyttää esimerkkinä kuvassa 9 esitettyjä Boeingin HEL MD ja Raytheonin HELWS -laserasejärjestelmiä. Molemmat laseraseet käyttävät 10 kW kiinteän olomuodon lasereita, mutta HELWS on huomattavasti HEL MD -järjestelmää pienempi. Molemmilla järjestelmillä on onnistuneesti pudotettu lennokkeja ja vaikutettu

epäsuoran tulen ammuksiin käytännön testeissä [58; 59], eli niiden TRL tason voi katsoa olevan 6/7. HEL MD saavutti tämän tason jo vuonna 2013, kun taas HELWS saavutti saman tason vuonna 2022.

3.4.1. Laser

Lasereiden tapauksessa niiden SWAP -ominaisuuksia voidaan ilmaista niiden painon ja tehon suhteena (kg/kW) (tässä lyhyesti PWR, *power-weight-ratio*). Yhden arvion mukaan nykyisten energia-asejärjestelmien PWR-suhte on noin 35-55 kg/kW. Joidenkin ohjelmien tavoitteena on PWR-suhteen kehittäminen jopa 2-7 kg/kW -tasolle. [9, s. 36]. Järjestelmien PWR-suhteen arviointi on usein haastavaa tai mahdotonta avoimista lähteistä saatavan tiedon perusteella, sillä järjestelmien kokonaismassaa ei useinkaan kerrota kovinkaan tarkasti, jos ollenkaan. Näissä luvuissa ei myöskään välttämättä oteta mukaan laserjärjestelmän virtalähteen painoa. Yhden arvion mukaan esimerkiksi 30 kW laseraseen akut voisivat painaa noin 135 kg ja vaatia 0,5 m³ tilaa [54].

Tämän tutkimuksen tekemisen aikana Yhdysvaltojen armeija on ilmoitusten mukaan saamassa koekäyttöön niin 50 kW DE M-SHORAD -laserasejärjestelmiä kuin 20 kW AMP-HEL -laserjärjestelmiäkin. [21] Molemmat järjestelmät ovat ajoneuvoasenteisia, ja niiden on tarkoitus toimia ajoneuvojen voimantuottoa hyväksikäyttäen eli ilman ajoneuvon ulkopuolisia virtalähteitä. Sikäli kun nämä järjestelmät läpäisevät käyttötестit, niiden TRL -tason voi katsoa olevan TRL 6/7 (Taulukko 2).

Yhdysvaltojen ohjelmien tavoitteena on laseraseiden tehon kasvattaminen 150 kW:sta 300 kW:iin vuonna 2023, 500 kW:iin vuonna 2025 ja megawattien tasolle vuoteen 2026 mennessä [57].



Kuva 8. Stryker-panssariajoneuvot aseistettuna Raytheonin 50 kW DE-MSHORAD - laseraseella (vasen) ja Epiruksen LEONIDAS -HPM-aseella (oikea) [19; 20]

DE M-SHORAD:n 50 kW laserase on integroitu Stryker-panssariajoneuvoon (kuva 8). Sen virtalähteenä käytetään suurikapasiteettisia akkuja, jotka ladataan käyttämällä ajoneuvon moottoria. Järjestelmän käyttämä 50 kW lasersäde muodostetaan keskittämällä 20-25 kuitulaservahvistimen (*fiber laser amplifier*) säteet yhdeksi vahvemmaksi säteeksi. Aiemmassa 10 kW versiossa vastaavia kuitulaservahvistimia oli neljästä kuuteen. [60] Järjestelmän painosta ja tilavuudesta ei ole saatavissa tarkkaa tietoa, mutta jos arvioidaan järjestelmän PWR-suhteen olevan 35 kg/kW, sen paino olisi 1750 kg – tämä ei vaikuta täysin mahdolltomalta, kun vertaa järjestelmän kokoa itse Stryker-ajoneuvon kokoon.



Kuva 9. Boeingin 10 kW HEL MD -laserase vuonna 2013 (vasen) ja Raytheonin 10 kW HELWS -laserase vuonna 2022 (oikea) [58; 59].

Kuvasta 9 on nähtävissä laseraseiden SWAP-ominaisuuksien kehitys viimeisen vuosikymmenen aikana. Kuvassa oikealla oleva HELWS -järjestelmä on asennettu Polariksen MZRZ D4 -ajoneuvoon, jonka kuorman (*payload*) maksimipaino on 680 kg [61]. Jos oletetaan

itse laserjärjestelmän kattavan koko järjestelmäkokonaisuudesta (akut, sähkönsiirto, jäähdytys, suuntaus) noin 50%, voidaan HELWS -järjestelmän PWR-suhteen olettaa olevan *maksimissaan* 34 kg/kW. Tämä arvio on kuitenkin vain suuntaa-antava.

3.4.2. HPM

Kuvassa 10 on Raytheonin Phaser -järjestelmä sekä Yhdysvaltain ilmavoimien tutkimuslaboratorio ARFL:n THOR -järjestelmä. Järjestelmät on tarkoitettu tukikohtien suojaamiseen UAV-uhkia vastaan, ja niillä kyetään torjumaan myös UAV-parvia. Molemmat järjestelmät on rakennettu merikontteihin, mikä mahdollistaa niiden siirtämisen kokonaisuutena paikasta toiseen. [10, s. 30-33; 11] Tällaiset järjestelmät eivät kuitenkaan kokonsa vuoksi sovellu jalkaväen taistelun tukemiseen.



Kuva 10. Raytheonin Phaser (vasen) ja AFRL:n THOR -HPM-järjestelmät (oikea) [62; 63]

Kuvassa 8 kuvattu Epiruksen Leonidas HPM-järjestelmä valittiin tammikuussa 2023 IFPC-HPM -ohjelmaan (taulukko 3). Leonidas pärjasi ohjelman valintatesteissä paremmin kuin kuusi muuta järjestelmää. Leonidaksesta on myös peräkärriin asennettava versio. [64] Leonidas HPM-järjestelmän kaltainen ajoneuvoasenteinen järjestelmä soveltuu jalkaväen taistelun tukemiseen paremmin kuin konttiin asennettu järjestelmä.

Strykeriin asennetulla Leonidas-järjestelmällä on vaikutettu onnistuneesti yksittäisiin lennokkeihin sekä lennokkiparviin [65]. Järjestelmän TRL-tason voi siis arvioida olevan TRL 6/7 (taulukko 2). Järjestelmän tehosta, painosta tai vaikutusetaisyydestä ei ole saatavissa tietoa, joten sen SWaP-ominaisuuksiin ei voida tämän tutkimuksen puitteissa ottaa kantaa.

HPM-aseiden suorituskyvyn määrittämisen haasteista johtuen (luku 4.2) myös erilaisten HPM-järjestelmien suorituskykyjen vertaileminen keskenään on haastavaa, ellei jopa mahdotonta. Tätä ongelmaa lisää se, ettei kaupallisistakaan järjestelmistä juurikaan ole saatavissa tietoa niiden avainparametreista, kuten EIRP-tehosta tai käytetyistä taajuualueista. [66]

3.5. Huomioon otettavia asioita

Jotta energia-aseen vaikutuksen väistämisen voidaan välttää, tulee aseiden ”laukauksen” olla riittävän tehokas, jotta kohde ei kykene väistämään sitä ennen haluttuun vaikutukseen pääsemistä. Laukauksen tehokkuus ei ole riippuvainen vain aseiden tehosta, vaan pitkälti ympäröivistä (sää)olosuhteista. Tästä syystä energia-aseiden käytettävyyden kannalta on tärkeää kyetä saamaan riittävästi tietoa esimerkiksi ilman kosteudesta, näkyvyydestä ja pilvisyydestä (kuva 6), jotta energia-aseiden ammunnanhallintajärjestelmä voidaan kalibroida optimaalisesti sekä tehokas tulenavausetäisyys voidaan määrittää. Tämä taas vaatii energia-asetta tukevilta järjestelmiltä kykyä tuottaa ja välittää tarkkaa ja ajantasaista olosuhdetietoa.

Jo nyt on olemassa laservaroitusjärjestelmiä, jotka tunnistavat, jos kohdetta valaistaan laservalolla (esimerkiksi laseretäisyysmittarilla tai maalinosoituslaserilla). Vastaavanlaisen järjestelmän tuottaman ennakkovaroituksen avulla esimerkiksi lennokki voisi havaita sitä vastaan käytetyn energia-aseiden säteilyn ja väistää ennen kuin aseella päästään riittävään vaikutukseen.

Laseraseiden uhka on tunnistettu jo miehittämättömien lennokkien suunnittelussakin: venäläisen Lancet -vaanivan ampumatarvikkeen on ilmoitettu olevan ”immuuni” laseraseiden vaikutukselle sen sisäänrakennetun lasersuojauksen ansiosta [67]. Tarkemmin lasersuojauksen laadusta ei ole kerrottu, mutta käytännössä lasersäteeltä suojautuminen vaatisi laserin käytöstä varoittavan järjestelmän ja säteen väistämisen, säteen tehoa heikentävän pintamateriaalin tai torjuntajärjestelmän, joka estää lasersäteen esteettömän osumisen kohteeseen.

Laseraseiden vahvuus ja heikkous on niiden tarkkuudessa. Johtuen laseraseiden toimintaperiaatteesta niillä ei ole juurikaan hajontaa: ne osuvat juurikin siihen kohteeseen mihin ne suunnataan. Tämä vähentää oheisvaurioiden (*collateral damage*) riskiä huomattavasti verrattuna perinteisiin asejärjestelmiin (lukuun ottamatta mahdollisten heijastusten aiheuttamia riskejä). Toisaalta laseraseiden tarkkuus vaatii niiden tähtäin- ja suuntausjärjestelmiltä suurta tarkkuutta ja kykyä pitää lasersäde suunnattuna samaan pisteeseen kohteen pinnalla jopa useiden sekuntien ajan.

HPM-aseiden käytettävyys erilaisia kohteita vastaan vaihtelee suuresti. HPM-aseilla ei pyritä aiheuttamaan suoraa rakenteellista vahinkoa kohteille, joten HPM-aseiden kohteiden tulee olla jollain tapaa alttiit aseiden tuottamalle säteilylle esimerkiksi elektronisten komponenttiansa osalta. Erilaisten kohteiden alttiuden arviointi on HPM-aseiden tapauksessa huomattavasti hankalampaa kuin perinteisten aseiden kannalta [29, s. 208]. Joihinkin kohteisiin ei välttämättä

voida HPM-aseilla vaikuttaa lainkaan, jos niissä ei ole mikroaalloille herkkiä osia tai jos kohteen virtapiireihin ei päästä tunkeutumaan.

3.5.1. Hyötysuhde

Järjestelmien hyötysuhde vaikuttaa olennaisesti niiden tarvitsemaan energiaan. Hyötysuhteella tarkoitetaan energia-aseeseen syötetyn energian (*input*) suhdetta aseesta lähtevän säteen (*output*) energiaan. Loput järjestelmän käyttämästä energiasta muuttuu pääasiassa lämmöksi, minkä vuoksi järjestelmiä täytyy jäähdyttää niiden toiminnan jatkuvuuden turvaamiseksi [11]. Järjestelmien jäähdyttäminen vaatii myös energiaa, ja jäähdytysjärjestelmät kasvattavat osaltaan koko energia-asejärjestelmän massaa ja kokoa.

Lasereiden tapauksessa laserin tyypistä ja tehosta riippuen niiden höytysuhde voi vaihdella arvioiden mukaan 5 ja 60 prosentin välillä [23]. Mainin mukaan esimerkiksi 50-100 kW laserin käyttäminen vaatisi noin 400-500 kW tehoa [3, s. 1066]; näin ollen järjestelmän hyötysuhde olisi arviolta 10-25 %. Yhdysvaltain Puolustusministeriön johtamassa Joint High Power Solid-State Laser (JHPSSL) -hankkeessa on laattalaserilla saavutettu 100 kW teholla noin 20 % hyötysuhde [23, s. 34]. Kiinteän olomuodon lasereiden hyötysuhteeksi arvioidaan PVTUTKL raportissa 30 % [11].

Käyttämällä 20 prosenttia arviona laserien hyötysuhteesta voidaan arvioida esimerkiksi DE M-SHORAD:n 50 kW laseraseen vaativan noin 250 kW tehoa alustaltaan. IFPC-HEL -järjestelmän 300 kW laser taas tarvitsisi toimiakseen 1,5 MW tehoa.

Laseraseiden tapauksessa aseiden tarvitsemaan energiaan vaikuttaa myös haluttuun vaikutukseen pääsemiseen tarvittava aika. Esimerkkitapauksena voidaan pitää pienen kaupallisen lennokin pudottamista Raytheonin 10 kW laseraseella. Lennokkien pudottaminen on kenttäolosuhteissa kestänyt laseraseella noin 10 s [59], eli ase tarvitsi 10 kW tehoa 10 s ajan, mikä tarkoittaisi 100% hyötysuhteella yhteensä noin 28 Wh energiaa per pudotus. Olettaen laserin hyötysuhteeksi 30%, lennokin pudotukseen tarvittiin noin 93 Wh energiaa. Lisäksi tulee ottaa huomioon, että loput 70% energiasta muuttuu hukkalämmöksi, mikä pitää ottaa huomioon järjestelmän jäähdytyksessä.

HPM-aseiden tapauksessa samankaltaisten laskelmien tekeminen ei ole ainakaan tämän tutkimuksen rajoissa mahdollista johtuen mikroaaltojen kytketymisen monimutkaisuudesta; todetaan kuitenkin, että myöskään HPM-järjestelmien tapauksessa aseiden hyötysuhde ei ole 100%, vaan aseesta lähtevän mikroaaltosäteilyn energiamäärä on huomattavasti pienempi kuin

aseen käyttämä energiamäärä. Lisäksi säteen divergenssistä johtuen kohteeseen osuu vain murto-osa aseiden säteen kokonaisenergiasta.

HPM-aseille voidaan määrittää EIRP-teho (*effective isotropic radiated power*), eli teho, jonka HPM-ase säteilee ilmaan järjestelmän antennivahvistus (*gain*) huomioiden. EIRP-tehon avulla voidaan laskea aseiden sähkömagneettisen kentän voimakkuus tietyllä etäisyydellä, mistä voidaan taas arvioida vaikuttamistodennäköisyyttä. Tämä olisi HPM-aseiden tarkastelun kannalta hyödyllinen parametri, mutta hyvin harvoin kyseistä tietoa on saatavilla järjestelmistä. [66]

3.5.2. Vaikutuksen arvioiminen

Riippuen ase- ja omasuojajärjestelmien aikaansaamasta vaikutuksesta kohteessa voidaan puhua joko *soft kill* tai *hard kill* -järjestelmistä. *Soft kill* -järjestelmällä kohteen toiminta saadaan estettyä tai pysäytettyä ilman, että kohteelle aiheutetaan suoranaisia rakenteellisia vaurioita: esimerkiksi infrapunahakeutuvan ohjuksen hakupään sokaisu infrapunavalolla. *Hard kill* -järjestelmillä kohde tuhoetaan tai sille aiheutetaan rakenteellisia vaurioita, niin että sen toiminta estyy: esimerkiksi onteloraketin tuhoaminen panssariajoneuvon omasuojajärjestelmän panoksella. [41, s. 416] Lisäksi voidaan käyttää termiä *mission kill*, eli kohteeseen vaikuttamista siten, ettei se kykene jatkamaan alkuperäistä tehtäväänsä riippumatta vaikutuksen luonteesta. *Mission kill* voidaan siis saavuttaa sekä *hard-* että *soft-kill* -menetelmillä.

Energia-aseiden vaikutuksen arvioiminen kohteessa voi olla erittäin haastavaa, etenkin jos aseiden vaikutus on häiritsevä tai lamauttava (*soft kill*). Lennokkien tapauksessa lamauttava vaikutus voi aiheuttaa lennokin syöksymisen maahan ja siten sen tuhoutumisen tai vaurioitumisen: tällöin aseiden vaikutus on todennettavissa. Toisaalta lamauttava vaikutus voi myös vaurioittaa vain jotain lennokin sensoreista, mikä ei välttämättä näy lennokin toiminnassa ulkoisesti millään tavalla. Tällöin vaikutuksen todentaminen voi vaatia esimerkiksi kohteen toiminnan havainnointia useiden minuuttien ajan.

Laseraseiden tapauksessa vaikutuksen todentaminen kohteessa on olennaista aseiden tehokkaan käytön kannalta: tehosta riippuen kohdetta voidaan joutua ampumaan lasersäteellä useiden sekuntien ajan haluttuun vaikutukseen pääsemiseksi. Jos kohteita on useita (esimerkiksi drone-parvi tai RAM-ammukset), maalin valinta, aseiden suuntaaminen, vaikuttaminen ja vaikutuksen todentaminen saattaa kestää liian kauan uhkaan vastaamiseksi riittävän nopeasti.

3.6. Yhteenveto

Laseraseilla kyetään kohdistamaan energiaa hyvin tarkasti pienelle alueelle, mikä mahdollistaa vaikuttamisen tarkasti yksittäisiin kohteisiin pitkienkin etäisyyksien päähän. Laserin vaikutus perustuu pitkälti kohteen materiaalin lämmittämisestä aiheutuviin mekaanisiin vaurioihin sekä alhaisemmilla tehoilla käytettäessä kohteen lasersäteilylle herkkien komponenttien vaurioittamiseen.

Lasersäteilyn eteneminen ilmakehässä on hyvin riippuvaista ympäröivistä olosuhteista, ja tietyt sääolosuhteet, kuten vesisade, voivat rajoittaa laseraseiden käyttöä tai estää sen kokonaan. Lasersäteen pienestä poikkeamasta johtuen on myös tärkeää kyätä suuntaamaan lasersäde tarkasti kohteeseen, mikä vaatii laseraseen tähtäys- ja suuntausjärjestelmältä suurta tarkkuutta.

HPM-aseilla kohteisiin vaikuttaminen perustuu mikroaaltojen aikaansaamiin virtapiikkeihin kohteiden elektronisissa komponenteissa. Mikroaallot voivat kytkeytyä kohteen virtapiireihin joko suoralla kytkeytymisellä esimerkiksi kohteen antennien kautta tai epäsuoralla kytkeytymisellä kohteen saumojen ja läpivientien kautta. Suoralla kytkeytymisellä saadaan kohteeseen kohdistettua suurempi määrä energiaa kuin epäsuoralla kytkeytymisellä, mutta se vaatii HPM-aseen taajuuden sovittamista kohteen käyttämiin taajuuksiin, mikä rajoittaa HPM-aseen käytettävyyttä erilaisia kohteita vastaan.

Ilmakehän olosuhteet eivät vaikuta HPM-aseiden säteilyn etenemiseen yhtä paljoa kuin laseraseiden käyttöön, mutta vesisade heikentää HPM-aseen tehoa mikroaaltojen absorboituessa ilmassa oleviin vesimolekyyleihin. Lasereihin verrattuna HPM-aseiden säteen poikkeama on kuitenkin merkittävästi suurempi: tästä johtuen HPM-aseilla kyetään vaikuttamaan kerralla lasereita laajemmalle alueelle, mutta HPM-aseiden energia jakautuu niin ikään suuremmalle alueelle eikä yksittäiseen kohteeseen saada kohdistettua vastaavaa määrää energiaa. Tämä lyhentää HPM-aseiden tehokasta kantamaa.

Sekä laser- että HPM -aseiden tekninen toteutettavuus, toimivuus kenttäolosuhteissa ja asennettavuus liikkuvalla lavetille on jo demonstroitu [19; 20]. Tulevaisuudessa järjestelmien kehitys tulee keskittymään järjestelmäkokonaisuuksien SWAP -suhteen parantamiseen eli järjestelmien vaatiman tilan ja painon pienentämiseen ja hyötysuhteiden parantamiseen.

Ajoneuvoon asennettavien laser- ja HPM-aseiden tämänhetkiset TRL-tasot ovat arvion mukaan korkeimmillaan TRL 6/7 molempien tyyppisille järjestelmille. Lasereiden tapauksessa tämä koskee 10-50 kW järjestelmiä – tätä tehokkaammat ajoneuvoasenteiset järjestelmät ovat eivät ole vielä tällä TRL-tasolla.

4. ENERGIA-ASEET JALKAVÄEN TAISTELUSSA

Tässä luvussa tarkastellaan energia-aseiden käyttämistä jalkaväkijoukkojen näkökulmasta. Luvussa yhdistetään lukujen 2 ja 3 havainnot ja tarkastellaan energia-aseiden suorituskykyvaatimuksia sekä energia-aseille aiheutuvia rajoitteita niin jalkaväen taistelun ominaispiirteiden kuin lainsäädännönkin kannalta.

Tarkasteltaessa energia-aseiden käyttöä jalkaväen näkökulmasta tulee huomioida sekä energia-aseiden mahdolliset käyttökohteet, energia-asejärjestelmien vaatimukset sekä ulkoisten tekijöiden (esimerkiksi lainsäädäntö) energia-aseiden käytölle asettamat rajoitteet. Osaltaan nämä tekijät ohjaavat energia-aseiden käyttöä tiettyyn suuntaan ja toisaalta rajaavat pois toisia käyttömahdollisuuksia.

4.1. Lainsäädäntö ja asiakirjat

Energia-aseiden kehittämistä ja käyttöä rajoittavat kansainväliset sopimukset ja paikallinen lainsäädäntö sekä ohjesäännöt.

4.1.1. Kansainväliset sopimukset

YK:n kansainvälisen sopimuksen *Protocol on blinding laser weapons* mukaisesti sellaisten laseraseiden, joiden ainoana tai yhtenä funktiona taistelussa on aiheuttaa pysyvä sokeus vahvistamattomalle näölle, käyttäminen on kielletty. (Vahvistamattomalla näöllä tarkoitetaan paljasta silmää ml. käytettäessä silmälaseja tai muita näköä korjaavia välineitä). Kielto ei koske laserjärjestelmien laillista sotilaallista käyttöä, johon luetaan laserjärjestelmien käyttö optisen laitteiden torjunnassa ja sen satunnais- tai sivuvaikutuksena tapahtunutta sokeuttamista. [15] Laseraseilla ei siis saa tarkoituksella sokaista ihmisiä, mutta laseraseen muun sallitun käytön yhteydessä tahattomasti tai välillisesti aiheuttama sokaisu ei ole sopimuksen mukaan kiellettyä.

Kansainvälisen humanitäärisen lain (*International Humanitarian Law*, IHL) mukaisesti asejärjestelmät eivät saa aiheuttaa tarpeetonta vahinkoa, vammoja tai kärsimystä niiden sotilaallisiin käyttötavoitteisiin nähden. Tämän määritelmän mukaan asejärjestelmän aiheuttamien vaikutusten määrä on siis suhteutettava asejärjestelmän käytön tavoitteeseen. [28; 68] Esimerkiksi laseraseella aiheutetut palovammat voisivat siis olla hyväksyttävä lopputulos, jos vaihtoehtona olisi käyttää kuolettavaa voimaa perinteisillä asejärjestelmillä – toisaalta vaikeiden palovammojen aiheuttaminen laseraseiden tahallisella tai tahattomalla käytöllä voi helposti myös aiheuttaa ”suuren yleisön” mielipiteen kääntymisen kyseisten asejärjestelmien käyttöä vastaan.

IHL:n mukaan myöskin sellaisten asejärjestelmien, joiden vaikutukset ovat sattumanvaraisia tai umpimähkäisiä (*indiscriminate*), käyttö on kielletty – asejärjestelmien vaikutus tulee siis kyetä kohdentamaan haluttuihin (sotilaallisiin) kohteisiin. [68] Energia-aseiden kannalta haasteen tässä suhteessa aiheuttaa sähkömagneettisen säteilyn etenemisen luonne: jos säteily ei pysähdy haluttuun kohteeseen, se jatkaa etenemistään, kunnes kohtaa esteen, johon se absorboituu (tai vaimenee riittävästi). Tällöin aseiden vaikutus voi kohdentua johonkin muuhun kuin haluttuun kohteeseen, mukaan lukien siviilikohteisiin. Tätä ongelmaa voi lisätä säteilyn heijastuminen arvaamattomasti erilaisista pinnoista esimerkiksi rakennetulla alueella.

4.1.2. Suomen lainsäädäntö

Puolustusvoimista annetun lain (551/2007) 4 §:n mukaan puolustusvoimien käyttämien sotilaallisten voimakeinojen tulee olla sopusoinnussa Suomea sitovien kansainvälisten velvoitteiden kanssa. [69] Näin ollen myös Puolustusvoimien käytössä olevien asejärjestelmien tulee noudattaa aiemmin mainittuja kansainvälisiä sopimuksia.

Säteilylain (859/2018) 4 §:n 1 momentissa määritellään *ionisoimaton säteily* seuraavasti:

”Tässä laissa tarkoitetaan -- ionisoimattomalla säteilyllä ultraviolettisäteilyä, näkyvää valoa, infrapunasäteilyä, radiotaajuista säteilyä, pientaajuisia ja staattisia sähkö- ja magneettikenttiä sekä ultraääntä;” Ionisoiva säteily taas määritellään ”-- ionisoivalla säteilyllä säteilyä, joka muodostaa väliaineessa ioneja;” [70]. Näiden määritelmien mukaisesti sekä lasersäteily että mikroaaltosäteily ovat ionisoimatonta säteilyä.

Säteilylain 161 §:ssä ”*Ionisoimattoman säteilyn aiheuttaman altistuksen rajoittaminen*” määritetään ionisoimattoman säteilyn käytöstä seuraavasti:

”Toiminnassa, josta aiheutuu altistusta ionisoimattomalle säteilylle:

- 1) altistus sähkömagneettiselle kentälle tai ultraäänelle ei saa aiheuttaa haitallisia kudonvaurioita tai muutoksia elintoiminnoissa;
- 2) lyhytaikainen altistus optiselle säteilylle ei saa aiheuttaa haitallisia kudonvaurioita ja aiheutuvien pitkäaikaisten terveyshaittojen on oltava mahdollisimman vähäisiä;
- 3) väestön altistus ei saa olla altistuksen raja-arvoa suurempi.

Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksella annetaan tarkemmat säännökset ionisoimattoman säteilyn väestölle aiheuttaman altistuksen raja-arvoista ja muusta rajoittamisesta.” [70]

Säteilylain 175 § ”*Ionisoimattoman säteilyn käyttö puolustusvoimissa ja Rajavartiolaitoksessa*” tarkoittaa ionisoimattoman säteilyn käyttämistä Puolustusvoimien ja Rajavartiolaitoksen toiminnassa:

”Puolustusvoimat ja Rajavartiolaitos valvovat käytössään olevien ionisoimattoman säteilyä tuottavien laitteiden ja niiden käytön turvallisuutta, jollei muualla toisin säädetä.

Ionisoimattoman säteilyn käyttö puolustusvoimissa ja Rajavartiolaitoksessa on toteutettava turvallisesti ja 161§:n 1 momentin 1 ja 2 kohdan vaatimusten mukaisesti tämän kuitenkaan rajoittamatta ionisoimattoman säteilyn käyttöä puolustusvoimien ja Rajavartiolaitoksen voimankäytön välineenä. Näitä vaatimuksia sovelletaan myös ionisoimattomasta säteilystä aiheutuvaan työperäiseen altistukseen.” [70]

Säteilylain 161 §:ssä mainitussa *Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriön asetuksessa ionisoimattoman säteilyn väestölle aiheuttaman altistuksen rajoittamisesta (1045/2018)* mainitaan lisäksi erikseen, että kyseistä asetusta ei sovelleta Puolustusvoimien ja Rajavartiolaitoksen maanpuolustukseen ja rajaturvallisuuden ylläpitämiseen käyttämään tekniseen laitteistoon. [71]

Säteilylaki siis mahdollistaa ionisoimattoman säteilyn (laser- ja mikroaaltosäteilyn) käyttämisen puolustusvoimien toiminnassa voimankäytön välineenä.

4.1.3. Puolustusvoimien ohjesäännöt

Energia-aseiden käyttöönoton kannalta Puolustusvoimissa tulee noudattaa Pääesikunnan Oikeudellisen osaston määräystä PVHSMK PEOIKOS 204 - *Uusien aseiden ja asejärjestelmien kansainvälisten velvoitteiden mukaisuuden oikeudellinen arviointi puolustusvoimissa*. Kyseisen määräyksen kohdassa 7.9 tarkennetaan laseraseita koskevia määräyksiä, mutta käytännössä määräyksen sisältö on identtinen YK:n kansainvälisen laseraseita rajoittavan sopimuksen kanssa. HPM-aseisiin ei määräyksessä oteta lainkaan kantaa. [28].

Huomionarvoista on myös, että määräyksessä aseet luokitellaan joko joukkotuhoaseiksi tai tavanomaisiksi (konventionaalisisiksi) aseiksi. Tavanomaisia aseita ovat määräyksen mukaan ”sellaiset aseet, joiden käyttö aseellisessa selkkauksessa on vakiintunutta ja tavanomaista ja joiden vaikutus perustuu pääasiassa maaliin toimitetun esineen tunkeutumiseen, sen räjähdyksestä aiheutuneisiin sirpaleisiin ja paineeseen.” [28] Energia-aseet eivät varsinaisesti sovi tähän määritelmään, mutta niiden käyttö- ja toimintaperiaatteet ovat kuitenkin lähempänä tavanomaisia aseita kuin joukkotuhoaseita.

Koska Puolustusvoimilla ei ole käytössä energia-aseita, myöskään niiden käyttöä varten ei ole säädetty erillisiä varomääräyksiä. Energia-aseiden käyttöä rajoittavia tekijöitä voidaan kuitenkin arvioida tarkastelemalla toimintaperiaatteiltaan energia-aseiden kaltaisten järjestelmien käytöstä säädettyjä varomääräyksiä. Laseraseiden osalta tällaisia järjestelmiä ovat esimerkiksi laseretäisyysmittarit ja tulenjohtolaserit. HPM-aseiden tapauksessa lähimpänä ovat luultavasti erilaiset tutkajärjestelmät. Koska energia-aseiden tapauksessa kyseessä ovat nimenomaan asejärjestelmät ja niiden tehot ovat laseretäisyysmittareiden ja tutkien tehoja suuremmat, on todennäköistä, että niistä annettavat määräykset olisivat tiukempia kuin nykyisistä järjestelmistä annetut määräykset.

Puolustusvoimien nykyisten laserlaitteiden käytöstä on säädetty ohjeessa PVTOK EL 10:002 *Laserlaitteet* sekä varomääräyksessä LOGVAROM D 7.4; *Laserlaitteiden käyttö*. Kyseisessä varomääräyksessä noudatetaan standardin IEC 60825-1 mukaista laserlaitteiden jaottelua. Tämän standardin mukaan laseraseet sijoittuisivat laserturvallisuusluokkaan 4, jonka tehon ylärajaa ei ole määritetty. [24] Varomääräyksen liitteessä 2 on määritetty laserlaitteiden varoetäisyydet paljaalle silmälle. Pisimmillään varoetäisyys on 45 000 m TYR-tulenjohtolaserilla, joka toimii 1064 nm aallonpituudella [24, liite 2].

Radio- ja tutkalaitteiden säteilyturvallisuudesta on säädetty Puolustusvoimien Logistiikkalaitoksen Esikunnan määräyksessä *PVLOGLHSMK radio- ja tutkalaitteiden säteilyturvallisuustoiminta (NIR) PVLOGL:ssa* [72]. Kyseistä määräystä sovelletaan taajuusalueella 1,5 MHz – 300 GHz radiotaajuista sähkömagneettista energiaa säteileville tutka- ja radiolaitteille – tämä taajuusalue kattaa siis myös HPM-aseiden toimintataajuuksia.

4.2. Järjestelmien suorituskykyvaatimukset

Jalkaväen taistelun kannalta energia-aseiden olennaisina suorituskykyinä voitaneen pitää vaikuttamista vihollisiin ja vihollisen järjestelmiin sekä omien joukkojen suojaamista.

Energia-asejärjestelmien suorituskykyvaatimuksia määriteltäessä tulee ottaa huomioon niiden tavoitellut käyttökohteet, eli mitä energia-aseilla halutaan saada aikaan ja millaisessa ympäristössä niitä halutaan käyttää. Koska laser- ja mikroaaltoaseiden toimintaperiaatteet ja vaikutus kohteissa poikkeavat toisistaan, molemmille asejärjestelmätyypeille ei voida määrittää yhteisiä teho vaatimuksia.

Laseraseiden toimintaperiaatteen vuoksi niille on mahdollista määrittää käyttökohteen mukaiset tavoiteltavat tehoarvot (taulukko 4). Arvioita voidaan muodostaa kohteiden pintamateriaalien ominaisuuksien ja liikenopeuksien avulla. Liakka esimerkiksi määrittelee

tutkimuksessaan laseraseilla lennokkeihin vaikuttamisen vauriokriteeriksi yhden kuutiosenttimetrin sulattamiseen ja höyrytämiseen tarvittavan energiamäärän eri materiaaleilla (muovi, alumiini ja hiilikuitu) [10, s. 57].

HPM-aseiden toimintaperiaatteen vuoksi niiden tehovaatimusten määrittäminen ei ole yhtä suoraviivaista kuin laseraseiden tapauksessa. [10, s. 61] Tämä johtuu siitä, että HPM-aseiden vaikutus kohteessa ei perustu niinkään rakenteellisten vaurioiden tuottamiseen, vaan kohteen elektronisten komponenttien häiritsemiseen tai vaurioittamiseen.

HPM-aseen suorituskyky voidaan määrittää käytännössä muutamalla parametrilla: aseiden EIRP-teho, käytettävä taajuus/taajuuskaista, pulssin pituus ja pulssintoistotaajuus. Nämä parametrit ovat kuitenkin yleensä turvaluokiteltua tietoa, eikä niitä yleensä kerrota edes kaupallisista tuotteista. [66]

4.2.1. Laser

Etenkin kohteen liikkeen nopeus ja suunta vaikuttaa niiden torjuntaan tarvittavaan energiaan, sillä laserin tulee vaikuttaa samaan kohtaan kohdetta riittävän pitkä aika vaurioiden aikaansaamiseksi. Mitä enemmän kohde liikkuu suhteessa asejärjestelmään, sitä haastavampaa on pitää säde suunnattuna samaan pisteeseen kohteen pinnalla. [10, s. 60] Tämä taas vaatii lasersäteen tehon kasvattamista: 100 kW järjestelmällä päästään samaan vaikutukseen laskennallisesti 10 kertaa nopeammin kuin 10 kW järjestelmällä [11, s. 33].

Maini määrittelee laserasejärjestelmien tavoiteltaviksi tehoiksi taulukon 4 mukaiset arvot käyttökohteesta riippuen [3]. Samansuuntaisia arvioita aseiden tehon ja kohteiden suhteen on esitetty myös muissa lähteissä [9; 11; 23; 57]. Huomionarvoista on, että taulukossa esitetyistä käyttökohteista pinnasta pintaan -vaikuttamista ovat vain räjähteiden raivaaminen (1) ja alusten pintauhkien torjunta (3) – muut käyttökohteet ovat maasta ilmaan tai ilmasta maahan vaikuttamista.

Taulukko 4. Laseraseiden teho vaatimuksia tehtävästä riippuen (muokattu lähteestä [3, s. 1069])

Nro	Tehtävä/kohde	Tyypillinen käyttöetäisyys (km)	Laserin teho (kW)
1.	Räjähtämättömien ampumatarvikkeiden/räjähteiden raivaus	0.2 – 0.3	1 - 2
2.	UAV/RPV/Drone -torjunta	1 – 3	10
3.	Alusten pintauhkien torjunta	1 – 3	10
4.	Lyhyen kantaman taktiset käyttökohteet – RAM- ja ohjustorjunta	1 - 3	50
5.	Ilmasta suoritettu täsmäisku maamaaleihin	5 – 10	100
6.	Maalla oleva ilma- ja ohjustorjunta sekä RAM-torjunta	5 – 10	100
7.	PST-ohjusten, ontelorakettien ja risteilyohjusten torjunta	5 – 10	100
8.	Alueen käytön kiistäminen lentokoneilta, helikoptereilta ja UAV:iltä	5 – 10	100
9.	Ballististen ohjusten torjunta	satoja	1-2 MW
10.	Avaruusperustainen (<i>space-based</i>) laser	tuhansia	10-20 MW

Jalkaväen taistelun tukemisen kannalta taulukon 4 käyttökohteista olennaisina voidaan pitää taulukon kohteita 1, 2, 4, 7 ja 8. Jalkaväen käyttöön tarkoitettujen laseraseiden tehon tavoitteena voidaan siis pitää 10-100 kilowattia; tätä heikommät laserit soveltunevat lähinnä räjähteiden raivaamiseen sekä vihollisen sensoreiden häirintään.

4.2.2. HPM

Yhden HPM-aseiden vaikutusmallin mukaisesti HPM-aseiden vaikutuksen mallinnus voidaan jakaa kuuteen askeleeseen: HPM-lähteen mallinnus, HPM-järjestelmän mallinnus, mikroaaltojen eteneminen, mikroaaltojen vaikutus kohdekomponenttiin, mikroaaltojen vaikutus koko kohteeseen ja aseiden vaikutus tehtävän suorittamiseen [73]. Tämä osoittaa HPM-aseiden vaikutuksen mallintamisen monimutkaisuuden, kun kyseessä ei ole suhteellinen yksinkertainen kohteen fyysinen vaurioittaminen.

Kapeakaistaisia HPM-aseita voidaan käyttää tehokkaasti vain sellaisiin kohteisiin, jotka ovat alttiita aseiden käyttämälle aallonpituudelle. Jotta HPM-asetta voidaan käyttää tehokkaasti useita erilaisia kohteita vastaan, aseiden tulisi toimia laajalla aallonpituuskaistalla (laajakaistainen HPM-ase). Tällöin mikroaaltojen epäsuora (*back door*) kytkeytyminen kohteen virtapiireihin nousee suoraa (*front door*) kytkeytymistä tärkeämmäksi. Haasteeksi muodostuu epäsuoran kytkeytymisen huonompi hyötysuhde suoraan kytkeytymiseen verrattuna: epäsuoraan

kytkeytymiseen perustuvalla laajakaistaisella HPM-aseella saadaan vähemmän energiaa toimitettua kohteeseen kuin vastaavan tehoisella, suoraan kytkeytymiseen perustuvalla kapeakaistaisella HPM-aseella. Suoralla kytkeytymisellä vaikuttaminen voi olla jopa miljoona kertaa tehokkaampaa kuin epäsuoralla kytkeytymisellä [41, s. 398].

Lisää haasteita HPM-aseen toteuttamisen kannalta luo kaavan 2 mukainen aallonpituuden ja lähtetimen halkaisijan suhde: HPM-aseiden aallonpituudella joko lähtetimen halkaisija kasvaa helposti epäkäytännöllisen suureksi tai aseiden säteen poikkeama (divergenssi) kasvaa, mikä johtaa säteen energian hajaantumiseen laajemmalle alueelle ja näin aseiden tehokkaan kantaman pienenemiseen.

Jalkaväen taistelun kannalta HPM-aseiden käytöllä lienee olennaista niiden kyky vaikuttaa vihollisen elektronisiin järjestelmiin laajalla alueella, mikä voi mahdollistaa esimerkiksi lennokkiparvien torjumisen, ammusten tai muiden laitteiden ohjauselektronikan häirinnän sekä muiden elektronisten laitteiden kuten radioiden häirinnän tai lamauttamisen.

4.3. Energia-aseiden mahdollisia käyttökohteita

Kuten luvussa 3 todettiin, laser- ja HPM-aseiden käytön kannalta olennaista on suoran näkölinjan saaminen kohteeseen. Energia-aseiden käyttäminen maan pinnalta toiseen maan pinnalla olevaan kohteeseen saattaa olla maaston muotojen, rakennusten, kasvillisuuden ja muiden esteiden takia haastavaa, minkä lisäksi maanpinnan läheisyydessä olevat ilmakehän pienhiukkaset (savu, pöly) voivat heikentää energia-aseiden tehoa. Suurin osa energia-aseiden tavoitelluista käyttökohteista liittyykin ilmassa olevien kohteiden, kuten lennokkien ja epäsuoran tulen ammusten torjuntaan. Lisäksi ilmassa liikkuvat kohteet voi olla helpompi erottaa taustasta, mikä edesauttaa niiden havaitsemista ja niihin tähtäämistä.

Ilmassa liikkuvat kohteet ovat myös asevaikutuksen toteuttamisen kannalta edullisessa asemassa. Esimerkiksi lennokkien tapauksessa haluttuun vaikutukseen pääsy on helppoa todentaa lennokin pudotessa, ja epäsuoran tulen ammusten tuhoutuminen voidaan todeta ammusten räjähtäessä. Maalla liikkuvien kohteiden tapauksessa vaikutukseen pääsemistä ei välttämättä voida todentaa lainkaan ilman kohteen lähempää tarkastelua, tai vaikutuksen todentaminen voi vaatia kohteen liiketilän tarkastelua pitkänkin aikaa. Jos taas pyritään esimerkiksi tuhoamaan vihollisen elektronisia järjestelmiä kuten radioita HPM-aseella, aseiden vaikutus ei välttämättä näy ulospäin millään tavalla, vaan vaikutus tulisi todentaa tarkkailemalla muutosta vihollisen viestiliikenteessä.

Jalkaväen taistelussa käytettävien asejärjestelmien kannalta on olennaista, että kyseiset asejärjestelmät ovat joko jalkaväen itsensä käytettävissä (esimerkiksi käsiaseet ja ryhmäaseet), orgaanisesti jalkaväkijoukon mukana (ajoneuvojen aseistus) tai niiden vaikutus on muutoin jalkaväen käytettävissä (epäsuoran tulen asejärjestelmät). Koska energia-aseet vaativat suoran näkölinjan kohteeseensa, jalkaväen käytössä olevien energia-aseiden tulisi olla sellaisia, että niitä kyetään liikuttamaan jalkaväen mukana. Tämä asettaa rajoitteita energia-asejärjestelmien koolle ja painolle ja sitä kautta rajoittaa jalkaväen energia-aseiden tehoa. Seuraavissa alaluvuissa tarkastellaan mahdollisia käyttökohteita energia-aseille jalkaväen taistelussa.

4.3.1. Vaikuttaminen jalkaväkeen

Energia-aseiden käyttäminen aktiivisesti jalkaväkeä vastaan ei ole todennäköinen vaihtoehto. Laseraseilla kyetään vaikuttamaan jalkaväkeen ja aiheuttamaan palovammoja paljaalle iholle, mutta pysyvien näkövammojen vaaran takia laseraseiden käyttäminen jalkaväkeä vastaan tuskin tulee yleistymään 2030-luvulle mentäessä. Vaikka laserasetta ei olisi suunniteltu ihmisten sokaisemiseen, eli se olisi kansainvälisten sopimusten mukainen [15], sen käyttäminen aktiivisesti henkilöstöä vastaan aiheuttaisi todennäköisesti julkisuudessa voimakkaita vastareaktioita.

HPM-aseilla kyetään vaikuttamaan ihmisiin [14], mutta tällaisen pelkästään ihmisiä vastaan suunnatun järjestelmän tuominen jalkaväen käyttöön taistelukentälle on tutkijan arvion mukaan epätodennäköistä, sillä tällaisen järjestelmän käyttöarvo taistelutilanteessa on kyseenalainen. Laitteiden torjuntaan tarkoitettu HPM-ase taas ei välttämättä käyttämänsä aallonpituuden ja tehonsa takia sovellu henkilöstöön vaikuttamiseen, ellei järjestelmän taajuutta ja tehoa voida säädellä joustavasti. Tällöin järjestelmää kyettäisiin ehkä rajoitetusti käyttämään esimerkiksi alueiden käytön estämiseen henkilöstöltä, joka ei ole riittävästi suojautunut mikroaaltosäteilyä vastaan. Todennäköistä on kuitenkin, että lyhyitä, voimakkaita mikroaaltopulsseja tuottamaan suunniteltua järjestelmää ei kyetä käyttämään pitkäaikaisen ja matalatehoisen säteilyn tuottamiseen [11, s. 7].

4.3.2. C-UAS

UAV-järjestelmien torjuminen on yksi energia-aseiden tärkeimmistä tavoitelluista käyttötarkoituksista [9; 21]. Aiemmin mainittujen seikkojen (kohteiden materiaali, riippuvuus elektroniikasta, vaikutuksen todentaminen) vuoksi energia-aseet soveltuvat hyvin juurikin erilaisten lennokkien torjumiseen.

4.3.3. Ajoneuvojen omasuoja

Ajoneuvojen omasuojajärjestelmiin energia-aseet voisivat teoriassa sopia hyvin. Laseriin perustuvilla omasuojajärjestelmillä voitaisiin joko sokaista ajoneuvoa kohti tulevien ohjusten sensoreita tai tuhota ammuksentekijät kokonaan, ja HPM-aseilla voitaisiin häiritä tai tuhota hakeutuvien tai ohjattavien ammusten elektroniikkaa. Ongelmaksi muodostuu torjuttavien kohteiden havaitsemiseen ja vaikuttamiseen käytettävissä oleva aika sekä sähkömagneettisen säteilyn suuntaaminen.

Esimerkiksi jos ajoneuvoa kohti ammutaan 200 m/s lentävä onteloraketti 300 m etäisyydeltä, järjestelmällä on 1,5 s aikaa havaita ammus, analysoida sen lentorata, tehdä päätös torjumisesta, suunnata torjuntajärjestelmä kohti ammusta ja suorittaa vastatoimet. Laseraseilla tarkka vaikuttaminen pieneen, lentävään kohteeseen onnistuisi, mutta laserin tulee olla erittäin tehokas (>100 kW) jotta sen teho riittää nopeasti liikkuvan kohteen tuhoamiseen lyhyessä ajassa (taulukko 4). Tämän tehoiset laseraseet taas ovat kokonsa puolesta vielä kaukana siitä pisteestä, että ne voitaisiin asentaa esimerkiksi jalkaväen taisteluajoneuvoon.

HPM-aseella voitaisiin vaikuttaa laajemmalle alueelle, mikä vähentää tarvetta suunnata järjestelmä tarkasti kohteeseen, mutta kaikki torjuttavat kohteet eivät välttämättä ole riittävän herkkiä mikroaalloille. Lisäksi äkillinen vaikuttaminen torjuttavan kohteen suuntaan voimakkaalla laserilla tai mikroaaltopulssilla aiheuttaa riskejä läheisille joukoille ja järjestelmille.

4.3.4. C-RAM

Epäsuoran tulen ammusten torjuminen on yksi energia-aseiden tavoitelluista käyttötarkoituksista [21]. RAM-kohteet ovat liikeratansa ansiosta suhteellisen helppoja kohteita laseraseille: ne liikkuvat ilmassa, niiden liikerata on suhteellisen suoraviivainen ja niiden liikettä on havaitsemisen jälkeen mahdollista ennakoita. Toisaalta pyörimisvakavoitujen ammusten pyörimisliike sekä ammusten kuorten materiaali ja kuoren paksuus saattavat tehdä ammuksista melko vastustuskykyisiä laserin polttovaikutukselle. On arvioitu, että esimerkiksi 300 kW laserilla ohuen, 3mm teräskuorisen raketin tuhoaminen kestää alle sekunnin, mutta ammuksen kuoren paksuuden ollessa >7mm tuhoamisaika nousee useisiin sekunteihin [12]. Näin ollen tehokkaillakin (100-300 kW) laseraseilla C-RAM toiminta rajoittuu yksittäisten tai harvojen ammusten torjuntaan, eikä niillä kyetä torjumaan useamman ammuksen iskuja yhtäaikaaisesti: ammuksen tuhoamiseen tarvittavan ajan lisäksi tulee ottaa huomioon aika, joka järjestelmältä kestää havaita ja tunnistaa kohteet sekä suunnata ja kohdistaa laser kohteesta toiseen.

HPM-aseiden soveltuvuus varsinaiseen C-RAM -toimintaan on rajallinen: HPM-aseen toimintaperiaatteesta johtuen ne soveltunevat lähinnä sellaisten RAM -ammusten torjuntaan, joissa on jonkinlaista ohjauselektronikkaa tai joiden sytytysmekanismiin voidaan vaikuttaa mikroaalloilla. Nimestään huolimatta esimerkiksi IFPC-HPM -järjestelmänkään tarkoitus ei ole torjua epäsuoran tulen ammuksia, vaan olla osa kerroksittaista (*layered*) kohteidensuojajärjestelmää ja vaikuttaa pääosin pieniin lennokkeihin ja lennokkiparviin, joihin ei muilla asejärjestelmillä kyetä tehokkaasti vaikuttamaan [57].

4.3.5. Sensoreiden vaurioittaminen

Sensoreiden optiikkaa voidaan suojata esimerkiksi suodattamalla kaikki muut aallonpituudet kuin se, jolla sensorin omat ilmaisimet toimivat [41, s. 408]. Laseraseilla voidaan vaurioittaa optisia sensoreita jo noin 100 W teholla, olettaen että laser toimii samalla aallonpituusalueella sensorin kanssa ja näin ollen pääsee vaikuttamaan sensorin ilmaisinelementteihin. Jos laser ei toimi optiikan läpäisy spektrillä eli se ei läpäise sensorin optiikkaa, tulee vaurioiden tuottamiseksi saada aikaan rakenteellisia vaurioita, mikä vaatii 1 – 10 kW tehoa. [11, s. 26] Pelkästään sensoreiden vaurioittamiseen tarkoitetun tehoista laserasetta ei siis todennäköisesti voida käyttää rakenteellisten vaurioiden aiheuttamiseen muihin kohteisiin.

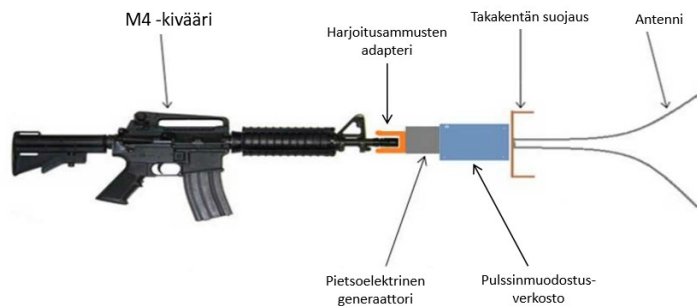
4.4. Alustat ja lavetit

Energia-aseiden käytön kannalta aseet tulee asentaa kokonaisuutena jonkinlaiselle alustalle: mahdolliset alustat voidaan jakaa koon mukaan karkeasti käsiaseisiin, kannettaviin järjestelmiin, ajoneuvoon asennettaviin järjestelmiin ja kiinteisiin järjestelmiin. Jalkaväen taistelun kannalta kiinteästi asennettujen järjestelmien tarkastelu ei liene oleellista, joten seuraavissa alaluvuissa tarkastellaan liikuteltavia alustoja.

4.4.1. Käsiaseet

Käsiaseet ovat yksittäisen henkilön käyttöön tarkoitettuja aseita. Esimerkkejä jalkaväen käytössä olevista käsiaseista ovat rynnäkkökiväärit ja konekiväärit. Energia-aseiden SWAP-vaatimuksista johtuen tehokkaiden, yksittäisen sotilaan suunnatun energian käsiaseiden kehittäminen on edelleen kaukana tulevaisuudessa. Vaikka esimerkiksi laseraseiden PWR-suhde saataisiin 1 kg/kW -tasolle, 10 kW ase painaisi pelkästään laserin osalta 10 kg, minkä lisäksi tarvittaisiin muun muassa virtalähde ja jäähdytysjärjestelmä – lisäksi vaikuttaminen tarkasti pitkän etäisyyden päähän vaatinee jonkinlaisen säteen suuntaus- ja/tai vakavoimisjärjestelmän.

Kuvassa 11 on kuvattu yhdysvaltalaiseen M4 -kivääriin suunniteltu lisäosa, jolla kyettäisiin muodostamaan sähkömagneettisia pulsseja käyttäen hyväksi kiväärin paukkupatruunoiden energiaa. Lisäosan tarkoituksena on mahdollistaa jokaisen yksittäisen sotilaan aseensa muuntaminen tarpeen vaatiessa energia-aseeksi. Järjestelmä kehitettiin ja se oli testikäytössä vuonna 2015, ja sille myönnettiin patentti Yhdysvalloissa 2019. [74] Järjestelmän suorituskyvystä ei ole löytynyt tietoa; on kuitenkin todennäköistä, että tämänkaltaisen järjestelmän tuottama teho on täysin riittämätön edes lennokkeihin vaikuttamiseen etenkin pitkän etäisyyden päästä.



Kuva 11. UWB-taajuusalueen pulssin muodostava adapteri M4-kivääriin (suomennettu kohteesta [74])

4.4.2. Kannettavat järjestelmät

Kannettavat asejärjestelmät ovat jalkaväen siirreltävässä olevia erillisiä asejärjestelmiä, jotka voivat toimia ilman ulkoisia ”tukielementtejä”: energia-aseiden tapauksessa esimerkiksi ilman järjestelmään kuulumatonta virtalähdettä kuten ajoneuvoa. Kannettava asejärjestelmä siis sisältää kaikki omaan toimintaansa tarvittavat komponentit. Kannettavat asejärjestelmät mahdollistavat asejärjestelmien siirtämisen paikkoihin, joihin ei esimerkiksi ajoneuvoilla pääse.

Kannettavien asejärjestelmien rajoitteena on niiden koko ja paino: järjestelmän kaikkien osien on oltava ihmisten siirreltävässä. Energia-aseiden tapauksessa tämä tarkoittaa kannettavan energia-asejärjestelmän käytettävissä olevan tehon rajoittamista. Kuvassa 12 on Boeingin CLaWS -järjestelmä, jota on saatavissa 2, 5 ja 10 kW versioina ja joko kannettavana tai ajoneuvoasenteisena versiona [75]. Järjestelmän kannettava versio on kahden hengen siirreltävässä – arvion mukaan tehokkain 10 kW versio on kuitenkin käytettävissä lähinnä ajoneuvoon asennettuna.



Kuva 12. Boeingin Compact Laser Weapon System (CLaWS) asennettuna ajoneuvoon ja kannettavana järjestelmänä [76; 75]

4.4.3. Ajoneuvoalustaiset järjestelmät

Ajoneuvot ovat kaikkein yleisin energia-aseiden alusta: tämä on nähtävissä jo esimerkiksi alaluvussa 3.4 esitellyistä energia-aseohjelmista, joista neljä viidestä on suunniteltu joko ajoneuvon asejärjestelmäksi tai ajoneuvolla siirrettäväksi. Energia-aseiden asentaminen ajoneuvoihin mahdollistaa niiden siirtämisen, ajoneuvon oman sähköjärjestelmän hyödyntämisen sekä mahdollisesti ajoneuvon muiden järjestelmien hyödyntämisen (esimerkiksi maalien tunnistus- ja seurantajärjestelmät).

Energia-aseiden ajoneuvointegroinnin kannalta ajoneuvon oman sähköjärjestelmän hyödyntäminen energia-aseen virtalähteenä on sen käytettävyyden kannalta olennainen tekijä: ei liene järkevää asentaa ajoneuvoon asejärjestelmää, joka lisäksi tarvitsisi ulkoisen virtalähteen. Ajoneuvojen rakenteen siirtyminen kohti hybriditeknologian ja sähkömoottoreiden käyttöä luo paremmat edellytykset myös energia-aseiden integroimiselle taisteluajoneuvoihin [51, s. 25], mutta tämä voi vaatia uudenlaisten ajoneuvojen kehittämistä ja käyttöönottoa. Näillä näkymin suuri osa ainakin 2030-luvun alussa käytössä olevista taisteluajoneuvoista toimivat edelleen polttomoottoreilla, ja sotamateriaalin pitkästä elinkaaresta johtuen kyseiset ajoneuvot voivat olla käytössä vielä useita vuosikymmeniä [77]. Jos energia-ase ei voi hyödyntää ajoneuvon akkuja, asejärjestelmä tarvitsee oman energiavarastonsa, mikä kasvattaa järjestelmän kokoa ja painoa. Energia-aseiden akkujen lataaminen voidaan kuitenkin nykyisistäkin ajoneuvoista toteuttaa ajoneuvon virrantuottoa hyödyntämällä [60].

Kuvassa 8 on Yhdysvaltojen Maavoimien Styker -panssariajoneuvoihin asennettuja energia-asejärjestelmiä. [19; 20] Kyseessä ovat asejärjestelmien prototyyppit, ja niistä on nähtävissä

nykyteknologian puitteissa toteutettujen energia-aseiden koon suhde itse ajoneuvon kokoon. Etenkin HPM-aseen lähettimen suuri koko kasvattaa koko ajoneuvon profiilia huomattavasti, mutta myös laserasejärjestelmän komponentit vaativat runsaasti tilaa. Kuvan kaltaiset järjestelmät eivät olisi taistelutilanteessa kovinkaan kestäviä, sillä järjestelmien komponentit ovat ajoneuvon panssaroinnin ulkopuolella – todennäköisesti myös tulevaisuudessa vähintäänkin asejärjestelmien suuntaavat elementit (antenni/lähetin) joudutaan asentamaan panssaroinnin ulkopuolelle, vaikka järjestelmien muut komponentit saataisiin panssaroinnin suojaan.

Lisäksi on otettava huomioon tällaisilla asejärjestelmillä varustettujen ajoneuvojen käytettävyyden muihin tehtäviin: kuvan 8 Stryker-ajoneuvoissa ei todennäköisesti ole tilaa esimerkiksi jalkaväen kuljettamiseen, vaan tämän kaltaiset ajoneuvot toimivat ainoastaan lavetteina energia-asejärjestelmille. Jalkaväkijoukon tapauksessa tämä tarkoittaisi sitä, että olemassa oleviin jalkaväen ajoneuvoihin ei voitaisi asentaa tämän kokoista energia-asetta, vaan energia-ase vaatisi oman ajoneuvon jalkaväen muiden ajoneuvojen lisäksi.

Ajoneuvojen tapauksessa voidaan tarkoittaa myös *miehittämättömiä ajoneuvoja (UxV)*. Energia-aseiden asentaminen UAV-alustalle voisi mahdollistaa näkölinjan saamisen kohteisiin, jotka ovat maanpinnalla toimivien aseiden näkymättömissä, sekä aseiden viemisen lähemmäs kohteita. Lennokkien kantokyky on kuitenkin hyvin rajallinen, joten niihin asennettavien energia-aseiden teho jäänee hyvin vaatimattomaksi: laseraseiden tapauksessa tämä rajoittanee asevaikutusta sensoreiden häiritsemiseen ja HPM-aseiden tapauksessa aiheuttanee vaikutusetäisyyden rajoittumisen muutamiin metreihin.

UGV-alustalle asennettua energia-asetta taas voitaisiin liikuttaa jalkaväen mukana, ja energia-ase voisi hyödyntää UGV:n muita järjestelmiä (virrantuotto, akut, maalien paikannus). Riittävän tehon takaamiseksi UGV:n tulisi olla kuitenkin riittävän kookas, jotta se mahdollistaisi energia-aseen asentamisen – todennäköisesti siis keskiraskas tai raskas UGV. HPM-aseiden antennien koosta johtuen laserit olisivat todennäköisempi vaihtoehto UGV:iden aseistukseksi.

4.5. Huomioon otettavaa

4.5.1. Käyttöturvallisuus

Varsinkin laseraseiden tapauksessa on tärkeää ottaa huomioon mahdollinen säteilyn heijastuminen kohteesta tai muista ympäristössä olevista pinnoista. Säteilyn tahaton heijastuminen voi asettaa omat sotilaat ja sensorit sekä ulkopuoliset henkilöt vaaraan ja aiheuttaa pysyviäkin silmävaurioita jopa laserin tehokkaan vaikutusetäisyyden ulkopuolella

[78; 56 s. 24]. Heijastumista voi tapahtua niin ympäristössä olevista luonnollisista pinnoista (kivet, kalliot, vesistöt), rakennusten pinnoista (seinät, ikkunat) kuin ajoneuvojen tai varusteiden pinnoistakin (tuulilasit, prismat, peilit, heijastimet, linssit, suojalasis). Etenkin rakennetuilla alueilla erilaisia heijastavia pintoja on runsaasti ja lasersäde saattaa tällaisessa ympäristössä heijastua arvaamattomasti useita kertoja.

HPM-aseiden tapauksessa niiden säteen suuresta poikkeamasta johtuen on tärkeää kyetä suuntaamaan aseiden vaikutus siten, että säteilyn vaikutus muihin omiin järjestelmiin ja henkilöstöön saadaan minimoitua. Vapaassa tilassa säteen suuntaaminen ei tuottane haasteita, mutta käytettäessä järjestelmiä alueella, jolla on mahdollisuus säteilyn heijastumiseen (esimerkiksi rakennetut alueet) tahattomat hajaheijastukset voivat muodostua ongelmaksi.

HPM-aseiden säteen vaarallisuutta ihmisille voidaan arvioida laskemalla aseiden säteen tehoitiheys kullakin etäisyydellä, minkä lisäksi tulee ottaa huomioon myös laitteiden ympärilleen säteilemä energia. Verrokkina voidaan käyttää vastatykistöä, joka vastaa kokoonpanoltaan melko pitkälti ajoneuvon päälle asennettua HPM-asetta. Erään vastatykistöä turvaetäisyydet (työntekijöille) ovat laskennallisesti tutkakeilan suuntaan lähes 200 metriä ja sivuille 3 metriä [79, liite 2]. Koska HPM-aseiden käyttämät tehot ovat tällaisia järjestelmiä suurempia, voidaan olettaa, että myös niiden turvaetäisyydet ovat tätä suurempia.

Sekä laser- että HPM-järjestelmät tarvitsevat toimiakseen suuria määriä energiaa ja sisältävät runsaasti herkkiä elektronisia komponentteja. Tällaisten järjestelmien käyttäminen olosuhteissa, joissa ne voivat joutua esimerkiksi vihollisen asevaikutuksen kohteeksi on riskialtista sekä järjestelmien itsensä että niiden käyttäjien kannalta.

4.5.2. Kustannustehokkuus

Kustannustehokkuuden kannalta olennaista on käytettävien asejärjestelmien ja niiden kohteiden kustannusten suhde: edullista kohdetta ei kannata tuhota kalliilla asejärjestelmällä - esimerkiksi halpaa, kaupallista lennokkia ei ole kustannustehokasta torjua kalliilla ilmatorjuntaohjuksella.

Yhdysvaltain laivasto arvioi laserasejärjestelmien hankintahinnan olevan noin 100 miljoonaa dollaria 60 kW järjestelmille ja noin 200 miljoonaa dollaria 250 kW -tasoiselle järjestelmille (kappalehinta). Tämä vertautuu muiden asejärjestelmien hankintahintoihin, jotka vaihtelevat 70 ja 150 miljoonan välillä. Laseraseiden käyttökustannusten per laukaus arvioidaan olevan

kuitenkin merkittävästi halvemmat kuin perinteisillä aseilla: 1,15\$ per laukaus 60 kW järjestelmälle ja 9,20\$ 480 kW järjestelmälle. [56, s. 27]

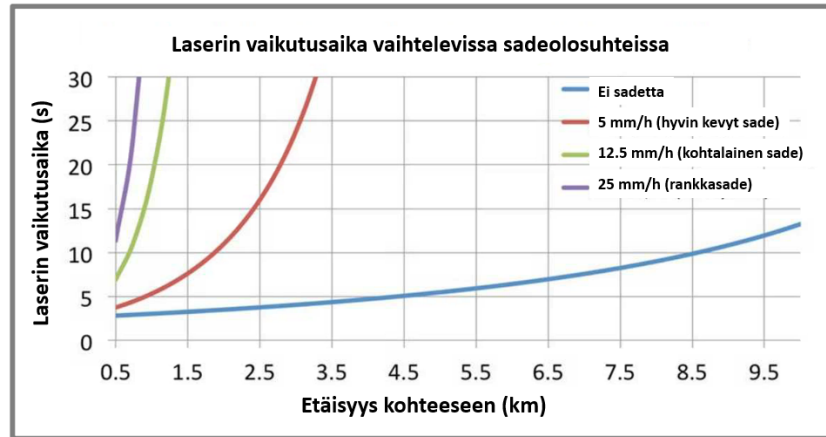
Kohteiden suojaaminen laser- ja mikroaaltosäteilyä vastaan on mahdollista. Laseraseita vastaan voidaan suojautua muun muassa suojasavuilla, heijastavilla pinnoilla, pintojen muotoilulla ja nopealla liikehtimisellä [12, s. 21]. HPM-aseita vastaan taas voidaan suojautua suojaamalla kohteen sähköiset komponentit virtapiikeiltä. Laitteiden suojaaminen vaikutusta vastaan tekee kuitenkin laitteiden valmistamisesta kalliimpaa. Energia-aseiden vaikutusta voidaan myös pyrkiä väistämään hyödyntämällä erilaisia ennakkovaroitusjärjestelmiä, mutta tällaisten järjestelmien lisääminen muuten edullisiin laitteisiin ei välttämättä ole kustannustehokasta. Esimerkiksi lennokkien valmistaminen siten, että niiden rakenteet kestävät laseraseen vaikutuksen tai estävät mikroaaltojen kytkeytymisen virtapiireihin saattaa tehdä laitteista niin kalliita, että niiden torjuminen ammus- tai ohjusilmatorjunnalla muodostuu jälleen kannattavaksi.

Energia-aseiden vaikutuksen kannalta on olennaista, että kohteet ovat alttiita asejärjestelmien vaikutukselle: laseraseiden kannalta kohteiden tulee olla rakenteellisesti sopivia sekä materiaaliltaan että rakenteeltaan tai niissä tulee olla lasersäteilylle alttiita sensoreita. HPM-aseiden kannalta kohteiden tulee olla sellaisia, että mikroaaltosäteily pääsee tunkeutumaan laitteen virtapiireihin ja vaurioittamaan komponentteja.

4.5.3. Saatavuus

Uusien asejärjestelmien laajamittaisen käyttöönottoon kannalta on olennaista niiden saatavuus. Tällä hetkellä energia-aseita kehitetään useiden valtioiden ja yhtiöiden toimesta, mutta koska kyseessä ovat hyvin tekniset ja monimutkaiset asejärjestelmät, niiden saatavuus tulee olemaan vielä pitkän aikaa hyvin rajallista.

4.5.4. Olosuhteiden vaikutus



Kuva 13. Sadeolosuhteiden vaikutus laseraseen vaikutusaikaan (muokattu kohteesta [80, s. 84])

Kuvassa 13 on nähtävissä tutkimuksessa [80] esitetyn laskennallisen mallin mukaiset vaihtelevien sadeolosuhteiden vaikutukset laseraseen vaatimaan vaikutusaikaan (aika, joka kestää haluttuun vaikutukseen pääsemiseksi). Mallinnettu laserase oli teholtaan 50 kW ja kohteena oli mallinnettu lentokone tai lennokki [12]. Kuvaajia tarkasteltaessa on nähtävissä, että jo kevyt sade vaikuttaa tarvittavaan vaikutusaikaan: 2 km etäisyydellä kevyt sade kaksinkertaistaa tarvittavan ajan. Rankkasade taas kolminkertaistaa vaikutusajan jo 0,5 km etäisyydellä. Lisäksi laserin vaimenemiseen vaikuttavat muun muassa näkyvyys ja ilman turbulenssi [80]. Kuvasta 6 on nähtävissä myös sumun vaikutus lasersäteilyn vaimenemiseen – käytännössä sumu vaimentaa laseria sadettakin voimakkaammin.

Energia-aseiden käytön kannalta on toki huomioitava olosuhteiden vaikutus aseiden kohteisiin. Rankkasade voi estää laseraseen käytön kokonaan, mutta se voi myös estää lennokkien toiminnan. Kuten kohdassa 3.3.3 todettiin, ilmakehän olosuhteet eivät vaikuta HPM-aseisiin yhtä paljoa kuin laseraseisiin.

5. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

5.1. Tulevaisuustaulukko ja skenaarioanalyysi

Taulukossa 5 on esitetty jalkaväen energia-aseiden tulevaisuustaulukko, joka on muodostettu luvussa 1.5 esiteltyjen periaatteiden mukaisesti. Tulevaisuustaulukon avulla pohditaan tässä luvussa mahdollisia tulevaisuuden kehityskulkuja energia-aseiden käyttöönoton kannalta. Tulevaisuustauluun on valittu muuttujiksi energia-aseiden käyttöönottoon vaikuttavia asioita, ja tulevaisuustaulun aikaikkuna on tutkimuksen tekohetkestä 9-13 vuotta eteenpäin, eli noin vuodet 2030-2035.

Taulukon muuttujille on kuvattu kehitysvaihtoehdot A, B ja C. Sarakkeen A vaihtoehdot kuvaavat sellaista muuttujien kehitystä, joka ei juurikaan edesauta energia-aseiden käyttöönottoa. Sarakkeen B vaihtoehdot kuvaavat tilannetta, jossa teknologiat kypsyvät odotetulla tavalla, mutta mullistavaa kehitystä ei tapahdu. Sarakkeen C vaihtoehdot taas kuvaavat tilannetta, jossa tapahtuu huomattavia teknisiä kehitysaskelleita tai muita muutoksia. Kaikille muuttujille ei ole kuvattu kolmea erilaista kehitysvaihtoehtoa, sillä osalle muuttujista kaksi kehitysvaihtoehtoa on tutkijan arvion mukaan skenaarioiden muodostamisen kannalta riittävä määrä.

- Muuttujat 1 ja 2 kuvaavat energia-aseiden (laser- ja HPM-aseet) kehitystä.
- Muuttujat 3 – 5 kuvaavat energia-aseiden käyttöönottoon liittyvien tukevien teknologioiden kehitystä.
- Muuttuja 6 kuvaa UAV-järjestelmien kehitystä jalkaväelle aiheutuvan uhan näkökulmasta.
- Muuttujat 7 ja 8 kuvaavat jalkaväen toimintaympäristön ja lainsäädännön muutosten vaikutusta.

Muuttujien perusteella on muodostettu kolme erilaista vaihtoehtoisia tulevaisuuksia kuvaavaa skenaariota. *Konservatiivinen skenaario* kuvaa tilannetta, jossa kehitys ei ole juurikaan edennyt nykyisestä, *keskitien skenaario* kuvaa tilannetta, jossa teknistä kehitystä tapahtuu maltillisesti ja *nopean kehityksen skenaario* tilannetta, jossa tapahtuu huomattavia teknisiä edistysaskelleita. Skenaariot on muodostettu yhdistelemällä eri muuttujien kehitysvaihtoehtoja ja pohtimalla niiden vaikutusta energia-aseiden käytettävyyteen jalkaväen taistelun kannalta. Skenaarioihin valitut muuttujien kehitysvaihtoehdot ovat nähtävissä seuraamalla taulukon värillisiä viivoja: konservatiivinen skenaario punaisella, keskitien skenaario on sinisellä ja nopean kehityksen skenaario vihreällä.

Taulukko 5. Tutkimuksen tulevaisuustaulukko

		TULEVAISUUSTAULUKKO		
Muuttujat		Kehitysvaihtoehdot		
		A	B	C
1	Laser	Vähäistä kehitystä järjestelmien hyötysuhteessa	Mallillista kehitystä järjestelmien hyötysuhteessa, olosuhteiden vaikutus rajoittaa edelleen käyttöä	Huomattavia parannuksia hyötysuhteessa ja olosuhteiden vaikutuksen minimoinnissa
2	HPM	Vähäistä kehitystä järjestelmien hyötysuhteessa, järjestelmät edelleen prototyyppivaiheessa	Mallillista kehitystä järjestelmien hyötysuhteessa, yksittäisiä järjestelmiä operatiivisessa käytössä	Huomattavaa kehitystä järjestelmien teho-painosuhteessa sekä säteen suuntaamisessa
3	Energian varastointi	Akkujen energiakapasiteetti jatkaa kehittymistä, mutta teknologisia läpimurtoja ei tapahdu		Akkujen energiakapasiteetti kasvaa uusien materiaalien ja teknologioiden kehittymisen myötä
4	Hybridiajoneuvot	Hybriditeknologiaa otetaan rajoitetusti käyttöön taistelujoneuvoissa, valtaosa käytössä olevista ajoneuvoista on edelleen vain polttomoottorilla toimivia	Uudet ajoneuvot hyödyntävät hybriditeknologiaa, mutta suuri osa ajoneuvokalustosta toimii edelleen polttomoottoreilla	Valtaosa käytössä olevista ajoneuvoista hyödyntää hybriditeknologiaa
5	UGV:t	Yksittäisiä UGV:ta jalkaväen käytössä erikoistehtävissä (tiedustelu, raivaaminen)	Puoliautonomisia UGV:tä käytössä jalkaväen tukena (evakuoinnit, täydennykset, varusteiden ja aseiden kuljetus)	Keskiraskaita autonomisia tulituki-robotteja ja kevyitä tiedustelurobotteja laajamittaisesti jalkaväen käytössä
6	UAV:t	Mikro- ja minilennokkien (Luokka I) yleistymisen jalkaväen käytössä joukkueetasolla	Autonomisten lennokkien ja vaanivien ampumatarvikkeiden yleistymisen ryhmien ja yksittäisten sotilaiden käytössä	Suuri määrä pieniä, parveilua hyödyntäviä autonomisia vaikuttamiskykyisiä lennokkeja laajamittaisesti käytössä (Luokka I)
7	Jalkaväen taistelun kuva	Taistelut käydään taajama-alueilla ja niiden ulkopuolella alueilla, joita siviiliväestö on evakuoitu ja rintamalinjat ovat selkeitä	Taisteluita käydään syvällä alueella sekä evakuoituilla alueilla että kaupungeissa siviiliväestön keskuudessa	Tilanteet kehittyvät nopeasti ja taisteluita käydään pääosin siviiliväestön keskuudessa kaupunkialueiden hallinnasta
8	Lainsäädäntö	Energia-aseiden käyttöä rajoitetaan kansainvälisillä sopimuksilla ja/tai kansallisella lainsäädännöllä	Ei muutoksia nykyiseen lainsäädäntöön tai kansainvälisiin sopimuksiin	

5.1.1. Konservatiivinen skenaario: Energia-aseet rajallisesti käytössä

Konservatiivisessa skenaariossa laser- tai HPM-järjestelmät eivät ole tulleet laajamittaisesti operatiiviseen käyttöön jalkaväen taistelussa. 10-200 kW lasereiden toteutettavuus ja asennettavuus ajoneuvoihin on demonstroitu, mutta järjestelmien SWaP -ominaisuudet ja olosuhteiden vaikutukset asejärjestelmien tehokkuuteen rajoittavat niiden laajamittaista käyttöönottoa. HPM-aseiden osalta asennettavuus ajoneuvoihin on myös demonstroitu, mutta niiden tehokas käyttöetäisyys on niin rajallinen, ettei niitä ole ollut kannattavaa ottaa käyttöön kuin muutamissa tapauksissa.

Konservatiivisessa skenaariossa UAV-järjestelmien lisääntyminen taistelukentillä luo edelleen jalkaväkijoukoille tarpeen kyetä suojaamaan oma toimintansa vihollisen lennokeilta ja vaanivilta ampumatarvikkeilta. Tässä skenaariossa laserasejärjestelmiä käytetään maalla kiinteiden kohteiden suojaamiseen pääasiassa raskaisiin ajoneuvoihin asennettuna, ja niiden käyttö rajoittuu alueille, joissa sään vaikutukset asejärjestelmien teholle ovat mahdollisimman

vähäistä. Jalkaväen taistelun osalta lasereiden käyttö rajoittuu niin ikään ajoneuvoihin asennettujen lasereiden käyttöön joukkojen ja komentopaikkojen suojana, mutta tämän tasoisia lasereita on käytössä vain harvoilla jalkaväkijoukoilla.

Osaltaan tässä skenaariossa energia-aseiden yleistymistä jalkaväen käytössä hidastaa ajoneuvokaluston perustuminen edelleen pääasiassa polttomoottoreille ja akkuteknologian kehityksen hitaus: energia-aseet eivät voi tehokkaasti hyödyntää ajoneuvojen omia sähköjärjestelmiä, ja aseiden vaatimien energiamäärien varastoiminen akkuihin tekee asejärjestelmistä liian kookkaita ja raskaita asennettaviksi pieniin ajoneuvoihin.

Lainsäädännön kannalta tässä skenaariossa tuskin tapahtuu muutoksia, sillä energia-aseiden vähäinen käyttö ei luo tarvetta uusien rajoitteiden asettamiselle.

5.1.2. Keskitien skenaario: Energia-aseiden yleistyminen

Keskitien skenaariossa energia-aseteknologia jatkaa kehittymistään ja energia-aseita aletaan ottamaan käyttöön eri tasoilla, mutta laajamittaista käyttöönottoa ei tapahdu.

Tässä skenaariossa laseraseiden kehitys mahdollistaa kevyiden, 10-50 kW laserasejärjestelmien käyttöönoton erilaisiin ajoneuvoihin asennettuna. Tätä tehokkaammat laseraseet ovat edelleen niin kookkaita ja raskaita, että ne voidaan asentaa pääosin raskaisiin ajoneuvoihin. Matalatehoisia (10-20 kW) laseraseita käytetään myös kannettavissa asejärjestelmissä.

Hybriditeknologian käyttöönotto ajoneuvoissa helpottaa energia-aseiden integrointia ja käyttöönottoa. Suurin osa taisteluajoneuvoista käyttää kuitenkin edelleen polttomoottoritekniikka, mikä hankaloittaa energia-aseiden integrointia ajoneuvojen omiin sähköjärjestelmiin ja rajoittaa energia-aseilla varustettavien ajoneuvojen määrää.

Autonomisten UAV:iden ja vaanivien ampumatarvikkeiden lisääntyminen taistelukentillä lisää jalkaväen tarvetta kyetä suojautumaan niitä vastaan, ja laseraseita käytetään ammus- ja ohjusilmatorjunnan ohella lennokkeja vastaan. Tässä skenaariossa puoliautonomisia UGV:tä käytetään rajallisesti jalkaväen taistelun tukemiseen erityis- ja tukitehtäviin, kuten evakuoointeihin ja täydennyksiin, mutta ne eivät tuo jalkaväen taisteluun mullistavia muutoksia.

HPM-aseiden käyttöönottoa rajoittaa edelleen niiden koko ja lyhyt tehokas kantama. Tässä skenaariossa HPM-aseita on käytössä rajallisesti ja niitä käytetään lähinnä kiinteiden kohteiden suojaamiseen lennokkiparvia vastaan osana muita torjuntajärjestelmiä.

Sään vaikutukset ovat edelleen rajoittava tekijä energia-aseiden laajamittaisessa käyttöönotossa. Vaikka etenkin kevyiden laseraseiden tekninen kehitys mahdollistaa niiden

asentamisen erilaisiin ajoneuvoihin, lasereiden heikko käyttövarmuus erilaisissa olosuhteissa vähentää niiden kysyntää ja rajoittaa niiden käyttöä alueille, jossa sään vaikutukset ovat mahdollisimman pienet.

Tässä skenaariossa on myös mahdollista, että energia-aseiden käyttöä koskevaa lainsäädäntöä tai kansainvälisiä sopimuksia tiukennetaan esimerkiksi laseraseiden sivullisille aiheuttamien riskien vuoksi. Energia-aseiden vähäinen käyttö ei kuitenkaan aiheuta suuria paineita sopimusten tiukentamiselle.

5.1.3. Nopean kehityksen skenaario: Energia-aseiden laajamittainen käyttöönotto

Nopean kehityksen skenaariossa pienten, parveilua ja autonomiaa hyödyntävien lennokkien sekä vaanivien ampumatarvikkeiden yleistymisen taistelukentillä luo jalkaväkijoukoille suuren tarpeen kyetä suojaamaan oma toimintansa tällaisilta järjestelmiltä.

Tässä skenaariossa energia-aseita on saatavissa laajalti operatiiviseen käyttöön. Sääolosuhteet vaikuttavat edelleen etenkin laseraseiden tehoon, mutta adaptiivisen optiikan kehitys mahdollistaa tehokkaampien laseraseiden käytön rajallisesti huonoissakin sääolosuhteissa – sateen vaikutus lasersäteiden tehoon on kuitenkin edelleen merkittävä ongelma. Tämän lisäksi lasereiden heikko kyky vaikuttaa nopeasti useaan kohteeseen tekee lennokkiparvista edelleen haastavan kohteen laserasejärjestelmille, mikä osaltaan tekee HPM-järjestelmistä houkuttelevamman vaihtoehdon.

Vaikka HPM-aseiden käyttöä tässä skenaariossa rajoittaa edelleen aseiden fyysinen koko ja niiden tehokkaan kantaman rajallisuus, lennokkiparvien aiheuttamasta uhasta johtuen HPM-aseiden käyttö yleistyy. Ajoneuvoihin asennettuja HPM-aseita käytetään joukkojen ja kohteiden suojaamiseen yhdessä muiden torjuntajärjestelmien kanssa. Järjestelmien käyttö myös etupainoisesti jalkaväen taistelun tukemiseen on mahdollista, mutta suuren kokonsa ja herkkyytensä takia ne eivät juurikaan sovellu toimimaan vihollisen asevaikutuksen piirissä.

Hybridiajoneuvojen yleistymisen ja laajamittainen käyttöönotto mahdollistaa sen, että energia-aseet voivat käyttää hyväksi ajoneuvojen omia sähköjärjestelmiä. Akkuteknologian kehitys tekee energia-aseiden vaatimista akuista myös pienempiä ja kevyempiä, mikä osaltaan mahdollistaa energia-asejärjestelmien asentamisen entistä kevyemmille alustoille.

Raskaiden tulitukirobottien yleistymisen jalkaväen käytössä mahdollistaa kevyiden laseraseiden liikuttamisen jalkaväen mukana myös paikoissa, jonne taisteluajoneuvoilla ei

päase. Laseraseilla aseistettujen tulitukirobottien järjestelmissä yhdistyvät maalien paikannus, tunnistus ja seuranta sekä laseraseen suuntaaminen kohteeseen.

Tässä skenaariossa on mahdollista, että energia-aseiden käytön yleistymisen seurauksena myös kansainvälisiä sopimuksia tai energia-aseiden käyttöä koskevaa kansallista lainsäädäntöä saatetaan muuttaa. Etenkin laseraseiden käytön aiheuttamat riskit sivullisille saattavat aiheuttaa voimakkaita reaktioita julkisuudessa, minkä seurauksena laseraseiden käyttöä saatetaan haluta rajoittaa lainsäädännöllisesti. Tämä voi osaltaan myös edesauttaa HPM-aseiden yleistymistä.

5.2. Yhteenveto

Tutkimuksen päätutkimuskysymys oli: ”Millaisia käyttömahdollisuuksia energia-aseilla on jalkaväen taistelussa 2030-luvulla?” Tutkimuksen pääkysymykseen pyrittiin vastaamaan alakysymyksillä, jotka ovat

1. Millaista on jalkaväen taistelu 2030-luvulla?
2. Millaisia energia-asejärjestelmiä on kehitteillä ja mikä on arvio niiden kehityksen vaiheesta 2030-luvulla?
3. Mitä vaatimuksia ja rajoituksia energia-aseiden käytöllä on jalkaväen taistelun näkökulmasta?

Ensimmäiseen alakysymykseen vastattiin 2. luvussa. Jalkaväen taisteluun 2030-luvulle mentäessä vaikuttavat niin toimintaympäristön kuin teknologiankin kehitys. Jalkaväkijoukkojen tulee edelleen kyetä toimimaan hyvin erilaisissa toimintaympäristöissä, mutta konfliktit ja taistelut keskittynevät yhä enenevässä määrin rakennetuille alueille ja tilanteet saattavat kehittyä niin nopeasti, ettei siviiliväestöä saada evakuoitua taistelualueelta. Tämä vaatii jalkaväkijoukoilta entistä parempaa tilannekuvaa ja kykyä joustavaan voimankäyttöön epäselvissäkin tilanteissa. Erilaisten sensoreiden ja tietoverkkojen yleistyminen yhä alhaisemmilla tasoilla parantaa jalkaväkijoukkojen tilannetietoisuutta ja sitä kautta vaikuttamiskykyä, kun joukot kykenevät keskittämään erilaisten asejärjestelmien vaikutuksen kohteisiin joustavasti. Merkittävin tekninen muutos taistelukentällä tulevat olemaan autonomisten järjestelmien (UAV, UGV) lisääntyvät kyvyt ja käyttö.

Toiseen alakysymykseen vastattiin 3. luvussa, jossa esiteltiin laser- ja HPM-aseiden keskeiset toimintaperiaatteet ja tarkasteltiin jalkaväen käyttöön mahdollisesti soveltuvien energia-aseohjelmien nykytilannetta. Ajoneuvoihin asennettavia, liikuteltavia 10-50 kW laserasejärjestelmiä on tällä hetkellä TRL-tasolla 6/7 ja yksittäisiä HPM-järjestelmiä on niin ikään TRL-tasolla 6/7. Tällaisten järjestelmien kehittyminen TRL-tasolle 8-9 voi kestää

arvioiden mukaan 6-9 vuotta, eli kyseiset järjestelmät voivat saavuttaa teknologisen kypsyyden 2030-luvulle mentäessä.

Kolmanteen alakysymykseen vastattiin 4. luvussa. Keskeiset rajoitteet energia-aseiden käytölle jalkaväen taistelussa asettavat kansainvälinen lainsäädäntö ja sopimukset sekä energia-aseiden toimintavaatimusten aiheuttamat fyysiset rajoitteet. Kansainvälinen lainsäädäntö kieltää sokaisevien laseraseiden käyttämisen, mikä rajoittaa laseraseiden käyttöä jalkaväkeä vastaan. Kansallinen lainsäädäntö mahdollistaa kuitenkin ionisoimattoman säteilyn käytön (laser- ja mikroaaltosäteily) puolustusvoimien ja Rajavartiolaitoksen toiminnassa tarvittaessa voimankäytön välineenä. Jalkaväen taistelun kannalta energia-aseiden tärkeimmät käyttökohteet lienevät C-UAS ja C-RAM -toiminta.

5.3. Johtopäätökset

Energia-aseiden käyttömahdollisuuksiin vaikuttavat sekä itse energia-aseiden teknologinen kehitys että uhkakuvan kehittyminen. Koska erityyppisillä energia-aseilla voidaan vaikuttaa kohteisiin eri tavalla, uhkakuvan kehittyminen vaikuttaa tullee vaikuttamaan energia-aseiden kysyntään ja sitä kautta kehitykseen ja käyttöönottoon.

Jalkaväkijoukoilla tulee olla kyky erottaa siviili- ja sotilaskohteet toisistaan ja kyky käyttää aseellista voimaa joustavasti epäselvissäkin tilanteissa. Energia-aseet voivat mahdollistaa kohteisiin vaikuttamisen ei-tappavaa voimaa käyttämällä. Lisäksi energia-aseiden käytöstä ei aiheudu samanlaista kimmoke- ja sirpalevaaraa kuin perinteisten ammusaseiden käytöstä, mikä vähentää sivullisille ja muille joukoille aiheutuvia riskejä. Näistä syistä johtuen energia-aseiden käyttäminen voi olla konventionaalisten aseiden käyttöä hyväksyttävämpää epäselvissä tilanteissa ja tilanteissa, joissa aseita joudutaan käyttämään siviiliväestön piirissä.

Toisaalta etenkin rakennetulla alueella erilaiset säteilyä heijastavat pinnat (rakennusten seinät, ikkunat, ajoneuvot) saattavat aiheuttaa sekä laser- että mikroaaltosäteilyn heijastumisen ennalta-arvaamattomalla tavalla ja näin aiheuttaa vaaraa omille joukoille, sivullisille henkilöille sekä suojaamattomille järjestelmille. Tämä saattaa rajoittaa energia-aseiden käyttöä alueille, joissa ei ole säteilyn heijastumisen vaaraa tai heijastumisriski on hallittavissa.

C-UAS -toiminta vaatii laserasejärjestelmiltä ≥ 10 kW tehon, ja C-RAM -toiminta jopa ≥ 100 kW. Myös C-RAM -toimintaan kykenevät asejärjestelmät ovat 2030-luvulla teknisesti mahdollisia toteuttaa, mutta ne ovat todennäköisesti kuitenkin niin kookkaita, että sellaisia asejärjestelmiä tuskin saadaan pitkään aikaan asennettua muualle kuin raskaisiin ajoneuvoihin.

Jalkaväen käyttöön tarkoitettujen laseraseiden tulisi olla teholtaan vähintään noin 20 kW luokkaa, jotta niillä kyetään esimerkiksi C-UAS -toimintaan jalkaväen taistelun välittömään tukemiseen liittyen. 10 kW asejärjestelmiä on jo nyt saatavissa sekä kannettavana versiona että ajoneuvoon asennettavana, mutta lennokkien torjunta kestää niillä suotuisissakin olosuhteissa 5-10 sekuntia per kohde. Arvion mukaan 2030-luvulla 20 kW tehoinen laserasejärjestelmä saattaisi olla käytössä yhtenä jalkaväen taisteluajoneuvojen asejärjestelmänä. Huomioon tulee kuitenkin ottaa ympäröivien olosuhteiden vaikutus laseraseen tehoon: sade, sumu ja pöly heikentää aseiden tehoa, jolloin 20 kW tehoinen järjestelmä ei välttämättä ole riittävä kohteiden torjuntaan käytännöllisellä etäisyydellä vaan sillä kyetään lähinnä häiritsemään tai vaurioittamaan sensoreita.

Laseraseiden vahvuutena on niiden kyky vaikuttaa tarkasti pitkienkin etäisyyksien päähän. Laserasejärjestelmät ovat kuitenkin melko herkkiä ja laserin kohdistaminen pitkille etäisyyksille on haastavaa, joten laseraseen suuntausjärjestelmien tulee olla tarkkoja. Vesisade, pöly, savu ja sumu heikentävät lasereiden tehoa, minkä lisäksi laserin optiikan linseille kertyvä lika voi heikentää aseiden tehoa ja pahimmillaan kuumentuessaan vaurioittaa asejärjestelmää. Näistä syistä johtuen lieneekin syytä pohtia, olisiko tarkoituksenmukaista ottaa käyttöön laseraseita jalkaväen taistelun tukemiseen, jos nämä laseraseet ovat epäsuotuisissa olosuhteissa käyttökelpoisia vain lyhyille (<1 km) etäisyyksille. Voi olla, että tällaisilla etäisyyksillä esimerkiksi ammusilmatorjuntaan kykenevät asejärjestelmät olisivat parempi ratkaisu, etenkin jos samalla asejärjestelmällä kyetään suorittamaan muitakin taistelutehtäviä kuin UAV-torjunta.

Laserasejärjestelmien kehitys on HPM-järjestelmien kehitystä pidemmällä ja laseraseohjelmia on huomattavasti HPM-aseohjelmia useampia, mikä kertoo laseraseteknologian kypsydestä. HPM-aseiden etuna on kuitenkin niiden kyky vaikuttaa useampaan kohteeseen kerralla sekä se, että olosuhteiden vaikutus HPM-aseiden toimintaan on vähäisempää kuin laseraseisiin. Tästä syystä HPM-aseet saattavat soveltua laseraseita paremmin pienten, parveilua hyödyntävien UAV-järjestelmien torjuntaan. Heikkoutena jalkaväen taistelun näkökulmasta on kuitenkin HPM-asejärjestelmien fyysinen koko sekä niiden rajoitettu vaikutusetäisyys: tehokkaaseen vaikutukseen pääsemiseksi HPM-aseet tulisi tuoda melko lähelle kohdetta, mikä ei niiden fyysisen koon vuoksi ole välttämättä toteutettavissa tai järjestelmän herkkyyden takia kannattavaa.

5.4. Luotettavuus

Kirjallisuusselvityksessä käytetty materiaali oli laadultaan ja luotettavuudeltaan hyvin vaihtelevaa. Etenkin tiedot olemassa olevien kaupallisten energia-asejärjestelmien ominaisuuksista ovat pääosin lähtöisin joko järjestelmien valmistajilta itseltään tai aihetta käsittelevistä lehti- tai internetartikkeleista, joten tietojen luotettavuutta on haasteellista varmentaa. Tällaisissa materiaaleissa ei myöskään juurikaan avata järjestelmien teknisiä ominaisuuksia kuten laitteiden käyttämiä taajuuksia, mistä johtuen osan järjestelmien käsittely jää tässä tutkimuksessa hyvin pinnalliseksi. Osaa lähdemateriaaleista taas on niiden turvaluokituksen takia voitu tässä tutkimuksessa käyttää vain rajallisesti.

Suurin osa tutkimuksessa käytetystä energia-aseiden kehittämistä koskevasta tiedosta (etenkin liittyen valtiollisten toimijoiden hankkeisiin) on peräisin Yhdysvaltain Puolustushallinnolta (Department of Defense) ja sen alaisilta toimijoilta tai muilta yhdysvaltalaisilta toimijoilta, sillä nämä tiedot ovat olleet helpoiten saatavissa ja tutkijan tulkittavissa. Esimerkiksi Kiinan ja Venäjän energia-aseohjelmiin ei ole tässä tutkimuksessa kiinnitetty juurikaan huomiota. Tutkijan arvion mukaan on kuitenkin todennäköistä, että Yhdysvaltain ohjelmat kuvaavat kattavasti myös muiden valtioiden energia-aseohjelmien tasoa.

Arviot energia-aseiden nykyisistä TRL-tasoista perustuvat yksittäisistä energia-asejärjestelmistä saataviin tietoihin, ja arviot järjestelmien TRL-9 -tasolle kehittymiseen tarvittavasta ajasta perustuvat aikaisempaan tutkimukseen aiheesta. TRL-tasojen määrittely tehtiin tutkimuksessa perustuen laadullisiin tietoihin eikä määrällistä TRL-laskuria käytetty. Tutkimuksen TRL-arvion epätarkkuudesta ja järjestelmien teknisen kypsymisen ennustamisen epävarmuudesta johtuen on mahdollista, että tutkimuksessa esitetyt arviot järjestelmien kypsymisen aikatauluista eivät välttämättä pidä paikkaansa. Tällainen epävarmuus on kuitenkin odotettavissa tehtäessä tulevaisuutta käsittelevää tutkimusta.

Skenaarioanalyysissä käytetyt skenaariot pyrittiin muodostamaan yhdistelemällä muuttujien kehitysvaihtoehtoja siten, että muodostetut skenaariot kuvaavat erilaisia tulevaisuuksia monipuolisesti – skenaarioita muodostettaessa pyrittiin siis välttämään pelkkien eri nopeudella etenevien lineaaristen kehitysvaihtoehtojen kuvaamista. Skenaarioanalyysiin valitut muuttujat sekä muuttujien kehitysvaihtoehdot muodostettiin tutkimuksen edetessä. Valinnat perustuivat tutkijan arvioon siitä, mitkä tutkimuksessa esille tulleet tekijät vaikuttavat eniten energia-aseiden käyttämiseen ja käyttöönottoon jalkaväen taistelun näkökulmasta tutkimuksen aikajaksolla. Muita käytettyjä muuttujia olisivat voineet olla esimerkiksi *järjestelmien kaupallinen saatavuus, vastatoimien kehitys* tai *muiden asejärjestelmien kehitys*.

5.5. Tutkimuksen rajaukset ja jatkotutkimuksen mahdollisuus

Tässä tutkimuksessa keskityttiin vain liikuteltaviin energia-asejärjestelmiin, joiden toiminta muistuttaa konventionaalisten suora-ammunta-aseiden toimintaa eli niillä kohdistetaan sähkömagneettista säteilyä asejärjestelmästä kohteeseen. Lisäksi rajattiin pois sellaiset HPM-aseet, joiden toiminta perustuu HPM-pulssin muodostamiseen räjähteiden avulla. Tutkimus rajattiin koskemaan myös ainoastaan järjestelmiä, joilla kyetään saamaan aikaan pysyviä vaurioita kohteissa – näin ollen esimerkiksi kohteiden häirintään, sokaisemiseen ja/tai lamauttamiseen suunnitellut järjestelmät jätettiin tutkimuksen ulkopuolelle.

Tutkimuksessa ei otettu kantaa siihen, kuinka kauan uusien teknologioiden ja asejärjestelmien operatiivinen käyttöönotto kestää sen jälkeen, kun teknologiat saavuttavat TRL-9 -tason. Energia-aseiden tapauksessa kyseessä ovat suhteellisen harvojen yhtiöiden kehittämät monimutkaiset asejärjestelmät, joten myös järjestelmien kaupallinen saatavuus tulee olemaan pitkään hyvin rajoitettua.

Tutkimuksessa tarkastellut käynnissä olevat energia-aseohjelmat keskittyivät pitkälti Yhdysvaltojen maavoimien ohjelmiin. Tästä johtuen tutkimuksen ulkopuolelle jäi useita, oletettavasti samankaltaisiin tavoitteisiin pyrkiviä energia-aseohjelmia muualta maailmasta.

Tutkijan suosituksia teknologian seurannan ja käyttötapojen priorisoinnille:

1. UAV-uhan kehittyminen: onko tarve torjua yksittäisiä lennokkeja vai pienten lennokkien parvia? Jos uhkana ovat yksittäiset lennokit, lienee kannattavaa seurata laseraseiden kehitystä ja niiden soveltuvuutta UAV-torjuntaan. Jos uhkana vaikuttavat olevan lennokkiparvet, HPM-aseet kuten Epiruksen Leonidas lienee seurattava järjestelmä.
2. Laseraseiden käytettävyys eri ympäristöissä: Yhdysvaltain maavoimien käyttöön tulevien laseraseiden (AMP-HEL, DE M-SHORAD) seuranta sekä muiden kaupallisten lasertorjuntajärjestelmien käytöstä saatavat havainnot.
3. HPM-järjestelmien kehityksen seuranta: IFPC-HPM -ohjelman ja muiden sen kaltaisten ohjelmien kehityksen seuraaminen sekä muiden kaupallisten HPM-torjuntajärjestelmien käytöstä saatavat havainnot.

Muita tutkittavia asioita voivat olla esimerkiksi:

Laseraseiden soveltuvuus suomalaiseen ympäristöön – miten laserase soveltuu asennettavaksi suomalaiseen jalkaväen taistelujoukkoon?

- Sään ja olosuhteiden vaikutus aseiden tehoon ja vaikutusetäisyyteen
- Vuorokauden- ja vuodenaikojen vaikutus aseiden tehoon
- Laseraseiden asentaminen jalkaväen taistelujoukkoon (ajoneuvon värinä, käytössä oleva energiamäärä, laseraseiden altistuminen vesipinnalle ja kuralle)

Jalkaväen UAV-torjuntakyvyn suorituskykyvaatimusten määrittäminen – mitä suorituskykyjä vaaditaan liikkuvan jalkaväen taistelun kannalta UAV-torjuntaan?

- Uhkakuvan määrittäminen: torjutaanko yksittäisiä lennokkeja vai UAV-parvia
- Torjuntaetäisyyden määrittäminen eri tilanteissa
- Mihin vaikutukseen halutaan päästä – tarvitseeko lennokkeja tuhota vai pelkästään estää niiden toiminta
- Voidaanko riittävään vaikutukseen päästä esimerkiksi RF-häirinnällä vai tarvitaanko *hard kill* -järjestelmiä
- Nykyisten kannettavien UAV-torjuntaan käytettävien (radiotaajuuden) aseiden kartoittaminen ja soveltuvuuden arviointi

KUVAT

- 1 Gartnerin innostuskäyrä
- 2 Milremin Themis -UGV
- 3 Erilaisten energianlähteiden energia-massa- ja energia-tilavuus-suhteita
- 4 Sähkömagneettinen spektri
- 5 Alailmakehän läpinäkyvyys eri aallonpituusalueilla
- 6 Ilmakehän kaasujen absorptiosta johtuva vaimennus eri aallonpituusalueilla
- 7 Laser- ja HPM -aseiden säde
- 8 Stryker-panssariajoneuvo laser- ja HPM -aseilla
- 9 Raytheonin 10kW HELWS -laserase
- 10 Raytheonin Phaser ja AFRL:n THOR -HPM-järjestelmät
- 11 UWB-taajuusalueen pulssin muodostava adapteri M4-kivääriin
- 12 Boeingin Compact Laser Weapon System
- 13 Sadeolosuhteiden vaikutus laseraseen vaikutusaikaan

TAULUKOT

- 1 Esimerkki tulevaisuustaulukosta
- 2 *Technology readiness level* -järjestelmän mukainen asteikko
- 3 Käynnissä olevia Yhdysvaltojen maavoimien DEW-hankkeita
- 4 Laseraseiden tehovaatimuksia
- 5 Tutkimuksen tulevaisuustaulukko

LIITTEET

- 1 Tulevaisuuden trendien erittely

LÄHDELUETTELO

- [1] Lucas, G. (ohjaaja, käsikirjoittaja). *Tähtien sota*. [Elokuva] (*Star Wars*). 1977
- [2] Haapsalo, S. *Pienten sotilaslennokkien kustannustehokas torjunta erittäin lyhyen kantaman ilmatorjunta-aseilla*. Pro Gradu. Helsinki, 2020. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. 69 s.
- [3] Maini, A. *Handbook of Defence Electronics and Optronics: Fundamentals, Technologies and Systems*. Wiley 2018. 1125 s. ISBN: 9781119184706
- [4] Iddon, P. *Is The Iron Beam Laser Defense System A Military And Economic Game-Changer For Israel?* Forbes. [Verkkajulkaisu] 09.06.2022 [Viitattu 10.08.2022] Saatavissa: <https://www.forbes.com/sites/pauliddon/2022/06/09/is-the-iron-beam-laser-defense-system-a-military-and-economic-game-changer-for-israel/?sh=33ff5adb1f5d>
- [5] The New York Times: *Army Works on a Blinding Laser* [Verkkajulkaisu] 18.12.1983. [Viitattu 01.08.2022]. Saatavissa: <https://www.nytimes.com/1983/12/18/us/army-works-on-a-blinding-laser.html>
- [6] *US military sets laser PHASRs to stun*. New Scientist. [Verkkajulkaisu] 07.11.2005. [Viitattu 19.08.2022] Saatavissa: <https://www.newscientist.com/article/dn8275-us-military-sets-laser-phasrs-to-stun/>
- [7] *The Active Denial System: Obstacles and Promise*. The Project on International Peace and Security. [Verkkajulkaisu] 2013. [Viitattu 14.08.2022] Saatavissa: https://www.wm.edu/offices/global-research/_documents/pips/ADS.Report.Final.6.28.2013.Printer.pdf
- [8] Metsänvirta, A. *Lyhyen kantaman ilmatorjuntajärjestelmissä käytettävät teknologiat 2030-luvulla*. Tutkielma. Helsinki, 2013. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. 26 s.
- [9] Pernu, T. *The technological maturity of ground based directed energy air defence systems in 2025-2030*. Diplomityö. Helsinki, 2017. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. 99 s.
- [10] Liakka, A. *Pienten kaupallisten lennokkien torjunta suunnatun energian aseilla*. Pro Gradu. Helsinki, 2022. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. 73 s.
- [11] Moisio, M. & Parviainen, T. *Suunnatun energian aseet 1.0*. AP6595, TLIV. Puolustusvoimien Tutkimuslaitos, 2019. 35 s.
- [12] Parviainen, T., Hartikainen, J., Raerinne, P. & Kaurila, T. *Suunnatun energian aseet 2.0*. AQ15810, TLIV. Lakiala: Puolustusvoimien Tutkimuslaitos, 2020. 23 s.
- [13] Lin, J. & Singer, P. *China's destructive laser rifle has a half-mile range. Explaining the ZKZM 500*. Popular Science. [Verkkajulkaisu] 06.07.2018. [Viitattu 10.08.2022] Saatavissa: <https://www.popsci.com/china-laser-rifle-energy-weapon/>

- [14] Del Monte, L. *War at the Speed of Light: Directed-Energy Weapons and the Future of Twenty-First-Century Warfare*. Potomac Books, 2021.
- [15] *Convention on Certain Conventional Weapons (CCW)– Protocol on Blinding Laser Weapons (Protocol IV)*. UN 1995. Saatavissa: <https://www.un.org/disarmament/the-convention-on-certain-conventional-weapons/>
- [16] *Understanding Gartner’s Hype Cycles*. Gartner. [Verkkojulkaisu] 20.8.2018. [Viitattu 10.8.2022] Saatavissa: <https://www.gartner.com/en/documents/3887767>
- [17] NATO Science & Technology Organization. *Science & Technology Trends 2020-2040 - Exploring the S&T Edge*. [Verkkojulkaisu] 2020. [Viitattu 15.12.2022] Saatavissa: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1131124.pdf>
- [18] *Joint Publication 1-02: Dictionary of Military and Associated Terms*. Yhdysvaltain puolustusministeriö. [Verkkojulkaisu] 15.02.2016. [Viitattu 15.03.2022] Saatavissa: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD1024397>
- [19] *Laser-wielding DE M-SHORAD Stryker defeated mortar rounds in recent tests*. Defense Brief Editorial. [Verkkojulkaisu] 16.05.2022 [Viitattu 14.11.2022] Saatavilla: <https://defbrief.com/2022/05/16/laser-wielding-de-m-shorad-stryker-defeated-mortar-rounds-in-recent-tests/>
- [20] *Epirus, General Dynamics Land Systems unveil integrated counter-electronics system Stryker LEONIDAS*. Epirus. [Verkkojulkaisu] 05.10.2022 [Viitattu 14.11.2022] Saatavilla: <https://www.epirusinc.com/news-item/epirus-general-dynamics-land-systems-unveil-integrated-counter-electronics-system-stryker-leonidas>
- [21] *Space and Missile Defense Symposium and Exposition 2022*. US Army. [Verkkojulkaisu] 10.08.2022 [Viitattu 20.09.2022] Saatavissa: https://smdsymposium.org/wp-content/uploads/2017/08/Wed-1100-Thurgood-SMD-2022_RCCTO-Presentation_20220809_v4.pdf
- [22] *LTV – ADM4S Sky Wiper anti-drone rifle*. Valka. [Verkkojulkaisu, käännetty tsekistä] [viitattu 10.8.2022] Saatavissa: <https://www.valka.cz/LTV-protidronova-puska-EDM4S-Sky-Wiper-prenosne-zarizeni-REB-t249674>
- [23] Gunzinger, M. & Dougherty, C. *Changing the game – The promise of directed-energy weapons*. Center for Strategic and Budgetary Assessments, 2012. Saatavissa: https://csbaonline.org/uploads/documents/CSBA_ChangingTheGame_ereader.pdf
- [24] *Laserlaitteiden käyttö*. LOGVAROM D 7.4, HQ986. Tampere: Puolustusvoimien logistiikkalaitoksen esikunta, 04.12.2020. (12 s.)

- [25] Rantapelkonen, J. & Koistinen, L. *Pohdintoja sotatieteellisistä käsitteistä*. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotataidon laitos, Julkaisusarja 2, 2016. 203 s. ISBN 978-951-25-2820-2.
- [26] Aalto, H., Heikkilä, K., Keski-Pukkila, P., Mäki, M. & Pöllänen, M. *Tulevaisuudentutkimus tutuksi – Perusteita ja menetelmiä*. Tulevaisuudentutkimuksen Verkostoakatemia julkaisuja 1/2022. Tulevaisuuden tutkimuskeskus, Turun yliopisto. 2022. 482 s. ISBN 978-952-249-563-1
- [27] NASA: *Technology Readiness Level*. [Verkkajulkaisu] 28.10.2012 [Viitattu 10.08.2022] Saatavissa: https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology_readiness_level
- [28] *Uusien aseiden ja asejärjestelmien kansainvälisten velvoitteiden mukaisuuden oikeudellinen arviointi puolustusvoimissa*. PVHSMK PEOIKOS 204, HO586. Helsinki: Pääesikunta, Oikeudellinen osasto. 12.2.2019. (21 s.)
- [29] Nielsen, P. *Effects of directed energy weapons*. Washington DC: National Defence University, 1994. 368 s. ISBN 0-945274-24-6.
- [30] Jääskeläinen, M., & Tiilikka, J. *Jalkaväen vuosikirja 2019-2020*. PunaMusta Oy, 2020.
- [31] Maavoimien esikunta. *Jääkärijoukkueen ja -ryhmän käsikirja*. Tampere: Juvenes Print, 2017. 195 s. ISBN 978-951-25-2983-3.
- [32] Maavoimien esikunta. *Jääkärikomppanian käsikirja 2018*. Tampere: Juvenes Print, 2018. 183 s.
- [33] *Finland Record High and Low Temperatures*. Plantmaps.com. [Verkkajulkaisu] [Viitattu 16.01.2023] Saatavissa: <https://www.plantmaps.com/en/fi/climate/extremes/c/finland-record-high-low-temperatures>
- [34] Rantapelkonen, J. *Tuleva sota – Tulevaisuuden sodan tulevaisuus*. Helsinki 2018. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotataidon laitos. 268 s. ISBN 978-951-25-3017-5
- [35] *Kaupunki–maaseutuluokitus päivitetty: Suomen kaupungistumisaste nousut yli 72 prosentin*. Ympäristö.fi [Verkkajulkaisu] 29.5.2020. [Viitattu 14.02.2023] Saatavissa: [https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Elinymparisto_ja_kaavoitus/Yhdyskuntarakenne/Tietoa_yhdyskuntarakenteesta/Kaupunkimaaseutu_luokitus/Kaupunkimaaseutuluokitus_paivitetty_Suom\(57423\)](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Elinymparisto_ja_kaavoitus/Yhdyskuntarakenne/Tietoa_yhdyskuntarakenteesta/Kaupunkimaaseutu_luokitus/Kaupunkimaaseutuluokitus_paivitetty_Suom(57423))
- [36] O’Hanlon, M. *Forecasting change in Military technology,2020-2040*. Foreign Policy at Brookings. [Verkkajulkaisu] Syyskuu 2018. [Viitattu 22.08.2022] Saatavissa: <https://www.brookings.edu/research/forecasting-change-in-military-technology-2020-2040/>
- [37] *Teknologiaennakointi – innovatiiviset kehityskaaret*. 12.9.2017. Puolustusvoimien tutkimuslaitos, Doktriiniosasto. Esitys. 27 s. STIV

- [38] *The U.S. Army Robotic and Autonomous Systems Strategy*. TRADOC, U. A. [Verkkojulkaisu] Maaliskuu 2017. [Viitattu 21.12.2022] Saatavissa: https://www.tradoc.army.mil/portals/14/documents/ras_strategy.pdf.
- [39] *Robotic & Autonomous Systems Strategy v2.0*. Australian Army. [Verkkojulkaisu] Elokuu 2022. [Viitattu 21.12.2022] Saatavissa: <https://researchcentre.army.gov.au/rico/robotic-and-autonomous-systems/robotic-autonomous-systems-ras-strategy>
- [40] *21.55 Miehitämättömät maalla liikkuvat laitteet (UGV)*. Maavoimien tutkimuskeskus, Maasotakoulu. Tutkimusraportti. 2022
- [41] Kosola, J., & Solante, T. *Digitaalinen taistelukenttä - informaatioajan sotakoneen tekniikka*. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitoksen julkaisusarja 1. 2. painos. 2003. 531 s. ISBN: 951-25-1449-4
- [42] Hämäläinen, J., Järviö, P., Kuja-Halkola, S., Silvola, P. & Paunonen, J. *Sähkömagneettisten aseiden teknologiaa*. Riihimäki: Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos, Julkaisuja 17, 2009. 34 s.
- [43] Ekblad, E. *Tulevaisuuden ajoneuvoasenteinen asejärjestelmä: raidetykin integroiminen Leopard 2A4 -taistelupanssarivaunuun*. Kandidaatintutkielma. Helsinki, 2016. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. 30 s.
- [44] Marrone, A. & Muti, K. *The Next Generation Soldier: A System of Systems Approach?* Istituto Affari Internazionali, 2021. ISSN 2280-6164
- [45] *Emerging Military Technologies: Background and Issues for Congress*. Congressional Research Service. [Verkkojulkaisu] 1.11.2022. [Viitattu 12.11.2022] Saatavissa: <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R46458>
- [46] *The THeMIS UGV*. Milrem Robotics. [Verkkojulkaisu] 2022 [Viitattu 15.12.2022] Saatavissa: <https://milremrobotics.com/defence/>
- [47] Castrillo, V., Manco, A., Pascarella, D., Gigante, G. *A Review of Counter-UAS Technologies for Cooperative Defensive Teams of Drones*. Maaliskuu 2022. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/358955209_A_Review_of_Counter-UAS_Technologies_for_Cooperative_Defensive_Teams_of_Drones
- [48] Posti, J. & Saarinen, M. *Taistelijan virranhallintaratkaisut*. STLO16 Sotatalouden seminaarityö. Helsinki, 2021. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. 73 s. STIV
- [49] *Our Energy Problem: Putting the Battery in Context*. Visual Capitalist. [Verkkojulkaisu] 20.07.2016. [Viitattu 19.08.2022] Saatavissa: <https://www.visualcapitalist.com/our-energy-problem-battery-context/>
- [50] *Soldier Lethality*. Stand-To. [Verkkojulkaisu] 22.03.2018 [Viitattu 21.08.2022] Saatavissa: <https://www.army.mil/standto/archive/2018/03/22/>

- [51] Laitinen, V. *Hybriditeknologian hyödyt ja haasteet panssaroiduissa ajoneuvoissa*. Pro Gradu. Helsinki, 2019. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. 75 s.
- [52] *Department of Defense Directed Energy Weapons: Background and Issues for Congress*. Congressional Research Service. [Verkkojulkaisu] 13.09.2022. [Viitattu 12.11.2022] Saatavissa: <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R46925>
- [53] *Sähkömagneettinen säteily*. Opetus.tv [Verkkojulkaisu] 2020. [Viitattu 02.05.2022] Saatavissa: <https://slides.com/opetustv/fy3-1aaltoliike-85-478-480-484-488-567-575>
- [54] *Laser Weapon Systems*. AFRL Directed Energy Directorate. [Verkkojulkaisu] Joulukuu 2016 [Viitattu 24.11.2022] Saatavissa: <https://www.kirtland.af.mil/Portals/52/documents/LaserSystems.pdf>
- [55] *Are Missile Defense Lasers On The Verge Of Reality?* Breaking Defense. [Verkkojulkaisu] 18.02.2015 [Viitattu 20.09.2022] Saatavissa: <https://breakingdefense.com/2015/02/are-missile-defense-lasers-on-the-verge-of-reality/>
- [56] *Navy Shipboard Lasers: Background and Issues for Congress*. Congressional Research Service. [Verkkojulkaisu] 29.08.2022. [Viitattu 22.09.2022] Saatavissa: <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R44175>
- [57] *In Focus - Defense Primer: Directed-Energy Weapons*. Congressional Research Service. [Verkkojulkaisu] 12.09.2022. [Viitattu 22.09.2022] Saatavissa: <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/IF/IF11882>
- [58] *HEL-MD takes out mortars and UAVs with vehicle-mounted laser*. New Atlas. [Verkkojulkaisu] 12.12.2013. [Viitattu 03.01.2023] Saatavissa: <https://newatlas.com/hel-md-vehicle-mounted-laser-test/30116/>
- [59] Atherton, K. *What it's like to fire Raytheon's powerful anti-drone laser*. Popular Science. [Verkkojulkaisu] 31.10.2022. [Viitattu 03.01.2023] Saatavissa: <https://www.popsci.com/technology/firing-raytheon-laser-weapon/>
- [60] *New weapon zaps UAS & other threats*. Raytheon Intelligence & Space. [Verkkojulkaisu] 26.10.2021 [Viitattu 20.09.2022] Saatavissa: <https://www.raytheonintelligenceandspace.com/news/2021/10/26/new-weapon-zaps-uas-other-threats>
- [61] *MRZR D4 Specifications*. Polaris [Verkkojulkaisu] [Viitattu 16.12.2022] Saatavissa: <https://military.polaris.com/en-us/mrzs-d4-military-tan/specs/>
- [62] Daily, J. *AFRL gives warfighters new weapons system*. Air Force Research Laboratory. [Verkkojulkaisu] 06.04.2020 [Viitattu 15.02.2023] <https://afresearchlab.com/news/afrl-gives-warfighters-new-weapons-system/>

- [63] *Phaser High-Power Microwave System*. Raytheon Missiles & Defense. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 15.02.2023]. Saatavissa: <https://www.raytheonmissilesanddefense.com/what-we-do/counter-uas/effectors/phaser-high-power-microwave>
- [64] *US Army selects Epirus' Leonidas for high-power microwave initiative*. Breaking Defense. [Verkkajulkaisu] 23.01.2023 [Viitattu 15.02.2023] Saatavissa: <https://breakingdefense.com/2023/01/us-army-selects-epirus-leonidas-for-high-power-microwave-initiative/>
- [65] *General Dynamics showcases Stryker Leonidas counter swarming drones armored vehicle*. Army Recognition. [Verkkajulkaisu] 12.10.2022 [Viitattu 15.02.2023] Saatavissa: https://www.armyrecognition.com/ausa_2022_news/general_dynamics_showcases_stryker_leonidas_counter_swarming_drones_armored_vehicle.html
- [66] Parviainen, T. DI, tutkija & Moisio, M. FM, tutkija, Puolustusvoimien Tutkimuslaitos, Asetekniikkaosasto. Haastattelu, *Energia-aseiden käyttömahdollisuudet jalkaväen taistelussa 2030-luvulla, Pro Gradu -tiedonhankinta.*, 30.01.2023. Haastattelumuistiinpanot tutkijalla.
- [67] Gazeta.ru. *Rostec told why the "Lancet" is not afraid of laser weapons against drones*. [Verkkajulkaisu, käännetty venäjältä] 30.10.2022 [Viitattu 14.11.2022] Saatavilla: https://m.gazeta.ru/army/news/2022/10/30/18915415.shtml?utm_source=ixbtcom
- [68] *Laser weapons in international humanitarian law: opportunities and challenges*. Finabel. [Verkkajulkaisu] 09.03.2021 [Viitattu 17.08.2022] Saatavissa: <https://finabel.org/laser-weapons-in-international-humanitarian-law-opportunities-and-challenges>
- [69] L 11.5.2007/551. Laki Puolustusvoimista
- [70] L 9.11. 859/2018. Säteilylaki
- [71] A 22.11. 1045/2018. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoimattoman säteilyn väestölle aiheuttaman altistuksen rajoittamisesta
- [72] *Radio- ja tutkalaitteiden säteilyturvallisuuustoiminta (NIR) PVLOGL:SSA*. PVLOGLHSMK RADIO- JA TUTKALAITTEIDEN SÄTEILYTURVALLISUUSTOIMINTA (NIR) PVLOGL:SSA, HM875. Tampere: Puolustusvoimien logistiikkalaitoksen esikunta, tekninen osasto. (11 s.)
- [73] Tatum, J. *High-Power Microwave Directed Energy Weapons: A Model and Simulation Toolbox*. Defence Systems Information Analysis Center. [Verkkajulkaisu] 2014 [Viitattu 18.12.2022] Saatavissa: <https://dsiac.org/articles/high-power-microwave-directed-energy-weapons-a-model-and-simulation-toolbox/>
- [74] James E. Burke: *UWB Radiating Using Explosive Pulse Power from M4 Rifle*. U.S. Army Research, Development and Engineering Command. [Verkkajulkaisu] 2015. [Viitattu 03.01.2023] Saatavissa: https://ndiastorage.blob.core.usgovcloudapi.net/ndia/2015/armament/tues17331_Burke.pdf

- [75] *U.S. Marines Have Started Testing Its Drone-Killing Laser Weapon.* Popular Mechanics. [Verkkajulkaisu] 21.06.2019. [Viitattu 25.01.2023] Saatavissa: <https://www.popularmechanics.com/military/research/a28120435/laser-weapon-claws/>
- [76] *Directed energy.* Boeing. [Verkkajulkaisu, viitattu 17.08.2022] Saatavissa: <https://www.boeing.com/defense/missile-defense/directed-energy/index.page>
- [77] Sinkkonen, J. *PATRIA 6×6.* Suomen Sotilas. [Verkkajulkaisu] 30.01.2022 [Viitattu 21.09.2022] Saatavilla: <https://suomensotilas.fi/2022/01/30/patria-6x6/>
- [78] *Laserluokat.* Säteilyturvakeskus. [Verkkajulkaisu]. 18.12.2019. [Viitattu 10.8.2022]. Saatavissa: <https://www.stuk.fi/aiheet/laserit/laserluokat>.
- [79] *Vastatykistötutkan rajoitettu tekninen hyväksyntä testaus- ja kokeilukäyttöön.* MATTEKH-JÄRJK VASTATYKISTÖTUTKAN RAJOITETTU TEKINEN HYVÄKSYNTÄ TESTAUS- JA KOKEILUKÄYTTÖÖN, HR879. Tampere: Järjestelmäkeskus Maajärjestelmäosasto. 08.11.2021
- [80] Fussman, C. *High Energy Laser Propagation In Various Atmospheric Conditions Utilizing A New, Accelerated Scaling Code.* Tutkielma. Monterey, Kalifornia, 2014. Naval Postgraduate School. 91 s.

TULEVAISUUDEN TRENDIEN ERITTELY

Taulukko A. Lähteissä esiintyvät tulevaisuuden trendit

	NATO Science & Technology Organization: Science & Technology Trends 2020-2040	Brookings Institute: Forecasting change in Military technology, 2020-2040	Tuleva sota – Tulevaisuuden sodan tulevaisuus	PVTUTKL: Teknologiaennakointi - innovatiiviset kehityskaaret
Aikajänne	2020-2040	2020-2040	2020-2040	2020-2035+
	Data	Sensorit	Taistelutilan digitalisaatio	Miehittämättömät ilma-alukset
	Keinoäly	Kemialliset sensorit	Sosiaalinen media aseena	Miehittämättömät merijärjestelmät
	Autonomia	Biologiset sensorit	Kyberaseet	Miehittämättömät maalavetit
	Kvanttitekniologiat	Optiset, IR- ja UV -sensorit	Avaruuden hyödyntäminen	Kehittyvät tietoliikennejärjestelmät
	Avaruustekniologiat	Tutka- ja radiosensorit	Miehittämättömät järjestelmät	Hypersooniset asejärjestelmät
	Hypersooniset aseet	Ääni, sonar- ja liikesensorit	Keinoälypohjainen analyysi	Laser-asejärjestelmät
	Biotekniologia & ihmisen parantelu	Magneettinen havaitseminen	Ainetta lisäävä valmistus	Raidetykki
	Uuudet materiaalit ja valmistaminen	Hiukkassäteet (sensoreina)	Autonomisia piirteitä omaavat järjestelmät, parveilevat robotit	TVM-kykyjen kehittyminen
		Tietokoneet ja kommunikaatio	Kaikkialla olevat ja kaikkialle näkevät sensorit	Päätöksentekoa tukevien järjestelmien kehitys
		Tietokoneiden komponentit	Täsmäaseiden pienentyminen	Avaruuden hyödyntäminen
		Tietokoneiden ohjelmistot	Esineiden internet – älykkäät esineet	Taistelijan suorituskyvyn kehittyminen
		Hyökkäykselliset kyberoperaatiot	Suunnatun energian aseet	Informaatioympäristön kehittyminen
		Järjestelmien järjestelmä/Esineiden internet (IoT)	Tehostettu ja sekoitettu todellisuus	
		Radioyhteydet	Uudet materiaalit	
		Laseryhteydet	Keinoälyn mahdollistama autonomia	
		Keinoäly/Iso data	Adaptiivinen naamiointi	
		Kvanttilaskenta	Hypersooniset aseet, raidetykki	
		Projektiilit, liikkuminen ja alustat	Kvanttilaskenta	
		Robottiikka ja autonomiset järjestelmät	Neurobiologia ja synteettinen biologia	
		Ohjukset	Nanotekniologia	
		Räjähteet		
		Polttoaineet		
		Suihkumoottorit		
		Polttomoottorit		
		Sähkömoottorit		
		Raketit		
		Aukset		
		Panssarointi		
		Häivetekniikka		
		Satelliitit		
		Muut ase- ja avaintekniologiat		
		Radiotaajuiset aseet		
		Ei-tappavat aseet		
		Biologiset aseet		
		Kemialliset aseet		
		Muut joukkotuhoaseet		
		Hiukkassäteet (aseina)		
		Sähköiset aseet, raidetykit		
		Laserit		
		Nanomateriaalit		
		3d-tulostus/materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät		
		Ihmisten parantelun laitteet ja aineet		

Taulukko B. Tulevaisuuden trendit järjesteltynä aihealueittain

Tiedustelu, valvonta ja maalittaminen	Robotiikka ja autonomia	Tiedon käsittely ja välittäminen	Asejärjestelmien kehitys	Ihmisen suorituskykyjen parantelu	Uudet materiaalit ja valmistusmenetelmät
Avaruusteknologiat	Miehittämättömät ilmalukset	Data	Hypersooniset aseet	Bioteknologia & ihmisen parantelu	Uudet materiaalit ja valmistaminen
Sensorit	Miehittämättömät merijärjestelmät	Keinoäly	Laserit	Ihmisten parantelun laitteet ja aineet	Nanomateriaalit
Kemialliset sensorit	Miehittämättömät maalavetit	Tietokoneiden komponentit	Sähköiset aseet, raidetykit	Neurobiologia ja synteettinen biologia	3d-tulostus/materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät
Biologiset sensorit	Autonomiaa piirteitä omaavat järjestelmät, parveilevat robotit	Tietokoneiden ohjelmistot	Hypersooniset asejärjestelmät	Tehostettu ja sekoitettu todellisuus	Häivetekniikka
Optiset, IR- ja UV -sensorit	Keinoälyn mahdollistama autonomia	Järjestelmien järjestelmä/Esineiden internet (IoT)	Raidetykki	Taistelijan suorituskyvyn kehittyminen	Ainetta lisäävä valmistus
Tutka- ja radiosensorit	Autonomia	Keinoäly/Iso data	Radiotaajuiset aseet		Adaptiivinen naamiointi
Ääni, sonar- ja liikesensorit	Robotiikka ja autonomiset järjestelmät	Kvanttilaskenta	Täsmäaseiden pienentyminen		
Magneettinen havaitseminen		Sosiaalinen media aseena	Suunnatun energian aseet		
Huikkassäteet (sensoreina)		Kyberaseet	Huikkassäteet (aseina)		
Kaikkialla olevat ja kaikkialle näkevät sensorit		Esineiden internet – älykkäät esineet			
TVM-kykyjen kehittyminen		Kehittyvät tietoliikennejärjestelmät			
Avaruuden hyödyntäminen		Päätöksentekoa tukevien järjestelmien kehitys			
Satelliitit		Informaatioympäristön kehittyminen			