

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

**PIENTEN KAUPALLISTEN LENNOKKIEN TORJUNTA SUUNNATUN
ENERGIAN ASEILLA**

Pro Gradu

Yliluutnantti
Aaro Liakka

Sotatieteiden maisterikurssi 10
Maasotalinja

Maaliskuu 2022

Kurssi Sotatieteiden maisterikurssi 10	Linja Maasotalinja
Tekijä Yliluutnantti Aaro Liakka	
Opinnäytetyön nimi Pienten kaupallisten lennokkien torjunta suunnatun energian aseilla	
Oppiaine, johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka Maanpuolustuskorkeakoulun kirjasto
Aika Maaliskuu 2022	Tekstisivuja 73 Liitesivuja 8
TIIVISTELMÄ	
<p>Kaupallisten lennokkien käyttö sotilaskohteiden tiedusteluun ja jopa terrori-iskujen tekoon on lisääntynyt maailmalla viime vuosina, ja Suomessakin on havaittu tuntemattomia lennokkeja sotilasalueiden läheisyydessä. Suomessa on reagoitu nousevaan trendiin muun muassa päivittämällä Puolustusvoimista annettuun lakiin lisää toimivaltuuksia lennokkeja vastaan. Vuonna 2020 uudistetulla lailla puolustusvoimista on annettu oikeus puuttua lennokkien kulkuun aseellisesti myös normaalioloissa.</p> <p>Suunnatun energian aseilla tarkoitetaan aseita, jotka kohdistavat suuren energiamäärän haluttuun kohteeseen aiheuttaen kohteen vaurioitumisen väliaikaisesti tai lopullisesti. Aseet voivat toimia periaatteessa millä vain aallonpituusalueella, mutta yleisimmät ja pisimmälle kehitetyt suunnatun energian aseet perustuvat suurteholaserin sekä -mikroaallon käyttöön.</p> <p>Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten suunnatun energian aseet soveltuvat kiinteän kohteen suojaukseen pienten kaupallisten lennokkien muodostamaa uhkaa vastaan normaalioloissa. Tässä tutkimuksessa normaaliolot on määritelty siten, että puolustustilalakia ei ole otettu käyttöön eivätkä valmiuslain poikkeusoloja koskevat pykälät ole toteutuneet. Lennokeilla tässä tutkimuksessa tarkoitetaan miehittämättömiä ilma-aluksia riippumatta siitä, ovatko ne kiinteä- vai pyöriväsiipisiä.</p> <p>Tutkimuksessa käytettiin laadullisia sekä määrällisiä tutkimusmenetelmiä. Tutkimusmenetelminä käytettiin kirjallisuusselvitystä, tapaustutkimusta sekä matemaattista analyysiä. Kirjallisuusselvityksellä selvitettiin suunnatun energian aseiden teknologisen kehityksen nykytilanne, normaaliolojen asettamat rajoitteet sekä kehittyneimmät suunnatun energian aseet. Matemaattisella analyysillä selvitettiin lennokkien aiheuttaman tiedustelu-uhan vaikutusalue sekä lennokkien torjuntaan tarvittava energiamäärä. Tapaustutkimusta käytettiin kiinteän kohteen ja torjunnan vaikutuksen kuvaamiseen. Tutkimuksessa käytettiin esimerkkilennokkeina yleisimpiä tai parhaiten uhan mukaiseen tehtävään soveltuvia lennokkeja eri hintaluokista. Suojattavaksi kohteeksi tutkimukseen valittiin Santahamina (aluemaali) sekä Maanpuolustuskorkeakoulun päärakennus (pistemaali).</p> <p>Tutkimuksessa selvisi, että suunnatun energian aseet soveltuvat lennokkien torjuntaan normaalioloissa, mutta niiden käyttötapoja ja tehokkaan säteen aiheuttamia riskejä sivullisille on vielä tutkittava ennen käyttöönottoa. Seuraavien tutkimusten mahdollisina aiheina nousivat esille muun muassa lennokkien muodostaman uhan väistäminen ilman aseellista vaikuttamista, suunnatun energian aseiden käyttö taktisesta näkökulmasta, sotilaallisten lennokkien torjunta suunnatun energian aseilla sekä suunnatun energian aseiden käyttömahdollisuudet maavoimien taistelun tukena nykyisten lyhyen kantaman ilmatorjuntaohjusrjestelmien rinnalla.</p>	
AVAINSANAT	
Lennokit, miehittämättömät ilma-alukset, laseraseet, laserit, mikroaaltoaseet, suunnatun energian aseet, ilmatorjunta, kohteen suojaaminen, lennokkien torjunta, CUAS, HEL, HPM, DEW	

SISÄLLYS

1.	JOHDANTO	1
1.1.	Aihealueen esittely.....	1
1.2.	Tutkimustilanne	2
1.3.	Tutkimustehtävä.....	3
1.4.	Näkökulmat ja rajaukset	4
1.5.	Tutkimusmenetelmät.....	6
1.6.	Lähdemateriaalin esittely	8
2.	SUUNNATUN ENERGIAN TEKNOLOGIAT	11
2.1.	Sähkömagneettinen spektri	11
2.2.	Suunnatun energian aseet (Directed Energy Weapons, DEW)	13
2.3.	Suurteholaser (High Energy Laser, HEL)	15
2.3.1.	Laseraseiden nykyhetki ja tulevaisuuden näkymät	20
2.4.	Suurtehomikroaalto (High Power Microwave, HPM)	27
2.4.1.	Mikroaaltoaseiden nykyhetki ja tulevaisuuden näkymät	30
3.	TOIMINTAYMPÄRISTÖ.....	34
3.1.	Kiinteä kohde.....	34
3.2.	Pienet miehittämättömät ilma-alukset.....	36
3.3.	Normaaliolojen aiheuttamat rajoitteet.....	38
3.3.1.	Lainsäädäntö	38
3.3.2.	Suunnatun energian aseiden vaikutus henkilöstölle	40
4.	Kiinteän kohteen suojaaminen	42
4.1.	Tutkimuksen esimerkkilennokit.....	42
4.2.	Kiinteää kohdetta vastaan muodostuvat uhat	46
4.2.1.	Tiedustelu-uhka	48
4.2.2.	Epäsuora uhka.....	53
4.2.3.	Aseellinen uhka.....	54
4.3.	Kiinteän kohteen suojaaminen suunnatun energian aseilla	56
4.3.1.	Kiinteän kohteen suojaaminen laseraseella.....	56
4.3.2.	Kiinteän kohteen suojaaminen mikroaaltoaseella	61
5.	POHDINTA	63
5.1.	Johtopäätökset.....	63
5.2.	Tutkimuksen luotettavuuden arviointi	70
5.3.	Esitykset jatkotutkimuksista	72

KUVAT

LÄHTEET

LIITTEET

PIENTEN KAUPALLISTEN MIEHITTÄMÄTTÖMIEN ILMA-ALUSTEN TORJUNTA SUUNNATUN ENERGIAN ASEILLA

1. JOHDANTO

1.1. Aihealueen esittely

“We cannot expect success fighting tomorrow’s conflicts with yesterday’s weapons or equipment.” [1]

Miehittämättömien ilma-alusten torjunta on puolustusvoimille ajankohtainen suorituskyky, joten aiheeseen liittyvät tutkimukset ovat tärkeitä koko puolustusjärjestelmän kannalta. Erilaisista miehittämättömistä ilma-aluksista on tehty havaintoja Puolustusvoimien harjoituksissa sekä sotilasalueiden välittömässä läheisyydessä [2]. Tämän johdosta on tarpeen tutkia miehittämättömien ilma-alusten torjuntaa sotilasalueiden lähistöllä normaali- ja poikkeusoloissa. Pienet kaupalliset lennokit muodostavat uudenlaisen uhan Puolustusvoimille, sillä lennättäjillä ei välttämättä ole sotilaallista agendaa tai vieraan valtion tukea taustalla, vaan esimerkiksi jokin järjestö voi haluta estää tai häiritä Puolustusvoimien toimintaa omista syistään. Tällöin tarvitsemme keinon puuttua lennätystoimintaan pienimmällä mahdollisella voimalla mutta kuitenkin tehokkaasti. Aki Torniaisen Poliisiammattikorkeakoululle kirjoittamasta opinnäytetyöstä käy ilmi, että poliisi kamppailee samanlaisten kysymysten äärellä [3], joten tällä tutkimuksella on merkitystä myös Suomen sisäisten turvallisuushkien ratkonnan kannalta.

Puolustusvoimista annettuun lakiin on lisätty mahdollisuuksia voimakeinojen käyttöön miehittämättömien ilma-alusten torjunnassa 26.6.2020. Samassa yhteydessä on kuitenkin rajoitettu käytettävien voimakeinojen voimakkuutta siten, että niistä aiheutuu mahdollisimman pieni riski sivullisille tai esimerkiksi viestintäjärjestelmille. [4, § 15] Tässä tutkimuksessa keskitytään nimenomaan pieniin kaupallisiin miehittämättömiin ilma-aluksiin, sillä niitä on helposti saatavilla ja jopa ammattitasaiseen kuvaukseen soveltuvat multikopterit ovat hintansa puolesta lähes kenen tahansa hankittavissa. Kaupallisia lennokkeja on käytetty viime vuosina monenlaisissa yhteyksissä, poliittisesta häirinnästä aina terrori-iskuihin asti [5].

Tällä hetkellä miehittämättömien ilma-alusten torjuntaan voidaan käyttää esimerkiksi erilaisia kineettisiä aseita, elektronista häirintää tai lennättäjän etsintää ja kiinniottoa. Lennättäjän etsintä on kuitenkin vaikeaa, etenkin jos lennokki lentää ennakkoon ohjelmoitua reittiä pitkin eikä sillä ole jatkuvaa yhteyttä lennättäjään. [6, s. 20-24] Kineettisten aseiden käyttö on puolestaan monessa tilanteessa mahdotonta, esimerkiksi asutuskeskuksissa tai varuskunnan yläpuolella. Lisäksi Puolustusvoimilla olevat asejärjestelmät ovat lennokkientorjuntatarkoitukseen usein liian tulivoimaisia ja niillä on laajat vaara-alueet, rajaten niiden käytön lähinnä ampumakenttäalueille. Vesitykki olisi edullinen ja luotettava tapa häiritä tai pudottaa lennokki, mutta sen ongelmana on vaatimaton kantama ja huono pakkasenkestävyys [6, s. 20].

Suurimpia kysymyksiä vaikuttaisi olevan se, miten edullinen lennokki voidaan torjua mahdollisimman hyvällä hinta-laatu -suhteella. Samankaltainen tilanne on nähtävissä esimerkiksi Israelissa, Hamasin ampuessa sadoittain halpoja raketteja ja Israelin Iron Dome -järjestelmän torjuessa raketit ohjuksilla, joiden kappalehinta on 50 000-100 000\$ [7]. Lennokkeja ei kuitenkaan ole kustannustehokasta torjua kalliilla torjuntaohjuksilla, joten suunnatun energian aseiden käyttömahdollisuuksien selvittäminen on taloudellisenkin näkökulman puolesta kannattavaa [8, s. 55].

1.2. Tutkimustilanne

Tutkijan tavoitteena on käyttää mahdollisimman tuoretta tutkimustietoa teknologian kehittyessä ja vanhentuessa nopeasti. Puhtaasti järjestelmien toimintaperiaatteisiin ja niiden teoriaa avaavia teoksia sen sijaan on hyödynnetty pidemmältä aikaväliltä, sillä sähkömagneettinen spektri ei ole uusi ilmiö ja siihen liittyvästä fysiikasta on kirjoittanut esimerkiksi P.E. Nielsen jo vuonna 1994 [9].

Maanpuolustuskorkeakoululla on tutkittu lennokkien torjuntaa viime vuosina useissa tutkimuksissa eri tutkintotasoilla. Esimerkiksi Haapasalo, Kullberg, Torri ja Liakka ovat sivunneet omissa kandidaatin- tai maisterintutkielmissaan lennokkien torjuntaa, pysyen kuitenkin kineettisen vaikuttamisen keinoissa tai taktisessa tarkastelussa [5; 8; 10; 11]. Maanpuolustuskorkeakoululla on tutkittu myös sähkömagneettiseen vaikuttamiseen perustuvia asejärjestelmiä. Kytö ja Lehtinen ovat tutkineet omissa opinnäytetöissään pelkästään laseraseiden käyttöä ilmapuolustuksen osana, mutta kapteeni Tuomas Pernu käsittelee omassa Yleisesikuntaupseerikurssin diplomityössään ilmatorjuntaa sähkömagneettisin asein, ottaen kantaa niin laseriin, kuin mikroaltoaaseisiinkin. Pernun tutkimus kuitenkin käsittelee sodan tai kriisin aikaista ilmatorjuntaa, jolloin kaikki lait eivät vaikuta aseiden käyttöön mahdollistaen käyttöperiaatteiden olevan samankaltaisia kuin perinteisillä asejärjestelmilläkin. [12; 13; 14]

Puolustusvoimien tutkimuslaitoksella on tutkittu miehittämättömien ilma-alusten torjuntaa ja suunnatun energian aseita viimeisten kolmen vuoden aikana useasti. Etenkin Mikko Moision ja Tomi Parviaisen kirjoittamat raportit suunnatun energian aseista 2019 ja 2020 ovat antaneet tälle tutkimukselle pohjatietoa, vaikka raportit ovatkin turvaluokiteltuja, joten niitä hyödynnetään tässä tutkimuksessa vain rajallisesti [15; 16]. Aiemmin tehdyt tutkimukset ja etenkin tutkimuksen lisääntynyt intensiteetti osoittavat aiheelle olevan kysyntää ja sen herättävän paljon mielenkiintoa sekä Suomessa että maailmalla. Suomen ulkopuolellakin on tutkittu ja kehitetty suunnatun energian asejärjestelmiä paljon, erityisesti Yhdysvalloissa, Venäjällä ja Kiinassa.

1.3. Tutkimustehtävä

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää suunnatun energian aseiden käyttömahdollisuuksia pienten kaupallisten lennokkien torjunnassa normaalioloissa. Tutkimusongelmaa lähestytään seuraavilla tutkimuskysymyksillä:

Päätutkimuskysymys:

Miten suunnatun energian aseet soveltuvat kiinteän kohteen suojaamiseen pienten kaupallisten lennokkien muodostamaa uhkaa vastaan normaalioloissa?

Alatutkimuskysymykset:

1. Mitä ovat suunnatun energian aseet ja mitkä ovat niiden toimintaperiaatteet?
2. Mitä uhkia pienistä kaupallisista lennokeista muodostuu?
3. Miten lennokka torjutaan suunnatun energian aseilla?
4. Mitä rajoitteita suunnatun energian aseiden käyttöön liittyy normaaliolojen toimintaympäristössä?

1.4. Näkökulmat ja rajaukset

Tutkimuksessa käsitellään suunnatun energian aseita, koska sähkömagneettisen spektrin hallitseminen on keskeisessä asemassa nykyaikaista sodankäyntiä [17, s. i]. Laser-aseen kehitystyö on alkanut jo 1960-luvulla ja testejä on järjestelmillä tehty siitä alkaen [18]. Tutkimuksessa tutkitaan lisäksi mikroaaltoaseiden käyttökelpoisuutta, sillä niitä on laserin tapaan kehitelty paljon ja mikroaaltoihin perustuvia järjestelmiä on jo olemassa. [19, s. 7] Esimerkiksi Raytheonin valmistama väestönhallintaan käytettävä Active Denial System (ADS) on jo käytössä ainakin Yhdysvaltain ilmavoimilla sekä joillakin poliisipiireillä ja vankiloilla [20]. Näiden teknologioiden tutkimisen tekee mielekkääksi se, että niiden operatiivisesta käytöstä on toistaiseksi hyvin vähän tietoa, mutta prototyypiksi asti rakennettuja järjestelmiä on useilla eri valmistajilla. Raytheonin edustajan mukaan etenkin laseraseiden kehitys on jo niin pitkällä, että seuraavan viiden vuoden aikana niitä tullaan asentamaan tukikohtien ja muiden kiinteiden kohteiden suojaamiseen, etenkin lennokkiuhkaa vastaan. [21]

Tutkimuksen asejärjestelmiksi on rajattu suurtehomikroaalto (high power microwave, HPM) sekä suurteholaser (high energy laser, HEL). Tässä tutkimuksessa on päädytty tämänkaltaiseen jakoon, sillä Puolustusvoimien tutkimuslaitoksen tekemässä tutkimuksessa Moisio ja Parviainen jakavat suunnatun energian aseet kahteen luokkaan, mikroaaltoaseisiin ja laseraseisiin [15, s. 3].

Tämän tutkimuksen järjestelmien lisäksi suunnattuun energiaan perustuvia teknologioita ovat esimerkiksi sähkömagneettinen pulssi (electromagnetic pulse, EMP), suurtehoradiotaajuudet (high power radio frequency, HPRF) sekä erilaiset ääniaseet. Mikroaaltoaseet voidaan joissakin tapauksissa sisällyttää sähkömagneettisten pulssien alle, tässä tutkimuksessa EMP:llä tarkoitetaan ydinräjähdyksellä tuotettavaa sähkömagneettista pulssia. Ydinräjähdyksellä tuotetusta sähkömagneettisesta pulssista voidaan käyttää myös termejä NEMP (Nuclear Electromagnetic Pulse) tai HEMP (High altitude Electromagnetic Pulse) riippuen pulssin muodostamismekanismista [19, s. 10]. HPRF-aseet on tässä tutkimuksessa sisällytetty mikroaaltoaseisiin (HPM), sillä ne on useissa lähteissä rinnastettu vahvasti toisiinsa. Esimerkiksi George Baker käyttää termiä High power radiofrequency weapons (HPRF) synonyyminä sähkömagneettisille aseille [22], samoin Pernu omassa tutkimuksessaan käsittelee HPRF-aseita ja HPM-aseita yhtenä kokonaisuutena. [12, s. 30]

Tämän tutkimuksen toimintaympäristönä on kiinteä kohde, jota vastaan kohdistuu kaupallisten miehittämättömien ilma-alusten aiheuttama uhka. Kiinteäksi kohteeksi on valittu Santahaminan varuskuntasaari. Aluemaaliksi luettavan Santahaminan lisäksi tässä tutkimuksessa on suojattavana kohteena pistemaali, Maanpuolustuskorkeakoulun päärakennus. Santahaminassa on suuri määrä asiantuntijoita ja tulevia ammattisotilaita, joten saari on potentiaalinen kohde lennokeilla toteutettavalle vaikuttamiselle. Santahaminaan vaikuttamalla saavutettaisi lisäksi suuri medianäkyvyys, sillä saari sijaitsee pääkaupunki Helsingissä. Näistä syistä tässä tutkimuksessa kiinteäksi kohteeksi on rajattu Santahamina ja saarella sijaitseva Maanpuolustuskorkeakoulu.

Koska kaupallisilla lennokeilla voidaan toimia ilman suurten joukkojen siirtelyä, niiden käytöstä ei välttämättä saada ennakkovaroitusta. Puolustusvoimilla on kuitenkin oltava kyky torjua lennokkien muodostama uhka myös ilman poikkeusolojen julistamista, joten tämä tutkimus on rajattu koskemaan normaaliolojen toimintaa. Normaalioloilla tarkoitetaan aikaa, jolloin puolustustilalakia ei ole asetettu voimaan, eivätkä valmiuslain 3. §:n määritelmät poikkeusoloista [23] ole toteutuneet.

Tutkimus on rajattu koskemaan kaupallisia lennokkeja, koska normaaliolojen toimintaympäristössä ne muodostavat todennäköisemmän uhan tutkimuksessa esitellyille kiinteille kohteille. Kaupallisten lennokkien muokkaaminen alkuperäisestä poikkeaviin käyttötarkoituksiin on kuitenkin yksinkertaista eikä vaadi suuria resursseja. Tutkimuksessa otetaan myös huomioon lennokkeihin lisätty hyötykuorma, jonka avulla kaupallisten lennokkien tuhovoimaa tai muita ominaisuuksia voidaan muokata. Lennokkien luokittelu voidaan toteuttaa luvussa 3.2 esiteltyjen taulukoiden avulla. Tässä tutkimuksessa sovelletaan taulukoita siten, että uhan muodostavat lennokit ovat NATO-standardin mukaisesti luokan 1 lennokkeja, eli massaa niillä on alle 150 kg. Kuitenkin kaupalliset lennokit hyvin harvoin ovat näin painavia, joten tutkimuksen rajaus on tarkennettu koskemaan vain micro- ja mini -alaluokkien lennokkeja, massaltaan siis 200g - 20kg.

Puolustusvoimista säädetyn lain mukaan Puolustusvoimilla on oikeus puuttua Puolustusvoimien pysyvässä tai tilapäisessä käytössä olevan alueen yläpuolisessa ilmatilassa olevan lennokin kulkuun [4, § 15a]. Tämän tutkimuksen näkökulma on varuskunnassa tai puolustusvoimista säädetyn lain tarkoittavalla alueella sekä alueen ympäristössä tapahtuva lennokkien torjunta.

Tutkimuksessa käytetään termejä lennokki ja lennokkien torjunta tekstin yksinkertaistamiseksi. Termeillä tarkoitetaan kaikkia miehittämättömiä ilma-aluksia, riippumatta ohjausmekanismista tai voimalinjasta. Tutkimuksen tuloksia voidaan soveltaa myös laajemmin käsittämään koko miehittämättömien lentolaitteiden kirjon ja niiden torjunnan (engl. Countering Unmanned Aerial System). Miehittämättömillä lentolaitteilla tarkoitetaan kaikkia ilman miehistöä lentäviä järjestelmiä, kuten ohjukset, multikopterit, kiinteäsiipiset lennokit tai muut laitteet.

Tutkijan oma mielenkiinto aihetta kohtaan rajaa tutkimuksen pieniin kaupallisiin lennokeihin ja normaaliolojen toimintaympäristöön. Aiheen ajankohtaisuus ja huoli torjunnan toteuttamisesta heräsi tutkijan palvellessa Yhdistyneiden Kansakuntien Libanonin operaatiossa suomalaisessa jääkärikompaniassa. Tutkijan keskustellessa ranskalaisessa patterissa palvelleen ilma-torjuntajaoksen johtajan kanssa kävi ilmi, että kaupallisten lennokkien muodostama uhka ja niiden torjunta on kansainvälisestikin merkittävä haaste puolustusjärjestelmille.

1.5. Tutkimusmenetelmät

Tutkimus toteutetaan pääosin laadullisena, mutta siinä on myös määrällinen näkökulma. Laadullisina tutkimusmenetelminä tutkimuksessa käytetään kirjallisuusselvitystä sekä sovellettua tapaustutkimusta (case study). Alatutkimuskysymyksiin 1, 3 ja 4 selvitetään vastaukset kirjallisuusselvityksen avulla. Kirjallisuusselvityksen avulla luodaan tutkijalle kuva suunnatun energian aseiden tämän hetkisestä tilanteesta tutkimuksen ja teknologioiden kehityksen suhteen. Päättötutkimuskysymykseen ja alatutkimuskysymykseen 2 selvitetään vastaukset matemaattisen analyysin ja tapaustutkimuksen avulla.

Määrällisellä tutkimuksella tarkoitetaan selittävää tutkimusta, jossa tutkimusongelmaan haetaan ratkaisua tilastojen ja numeroiden avulla. Määrällisissä tutkimusmenetelmissä painottuu objektiivisuus ja riippumattomuus tutkijan mielipiteistä tai elämäkokemuksesta. Laadullinen tutkimus on puolestaan luonteeltaan ymmärtävää tutkimusta, jonka avulla pyritään syventämään ja analysoimaan tietoa määrällistä tutkimusta syvällisemmin. Puhtaasti laadullisissa tutkimuksissa tutkijan omat kokemukset ja näkökulmat tuovat tutkimukselle subjektiivisen otteen. [24]

Rantapelkosen ja Koistisen mukaan kirjallisuusselvitys on usein opinnäytetöissä tärkeä esivaihe, jonka avulla tutkija selvittää viimeisimmän tutkimustiedon ja teknisten ratkaisujen kehityksen. Kirjallisuusselvityksen tarkoituksena on referoida aiempia tutkimuksia ja raportteja, pyrkien löytämään viimeisintä saatavilla olevaa tietoa mahdollisimman luotettavista lähteistä. [24]

Tapaustutkimus tarkoittaa tutkimusmenetelmää, jossa pyritään luomaan monipuolinen kuva jostakin tapauksesta tai ilmiöstä. Tapaustutkimuksessa tutkimusasetelma perustuu yhteen tai useampaan yksittäiseen tapaukseen, joiden perusteella tehdään johtopäätöksiä laajemmasta ilmiöstä. Tapaustutkimusta voidaan tehdä fakthanäkökulman kautta, jolloin selvitetään, miten asiat ovat ja miten ne muuttuvat tapauksen aikana. Toinen vaihtoehto on lähestyä tapausta konstruktionistisesta näkökulmasta, jolloin tutkija keskittyy toimintaan ja vuorovaikutukseen liittyviin ilmiöihin. [25] Tässä tutkimuksessa tapaustutkimuksella selvitetään kiinteän kohteen suojaamiseen liittyviä ilmiöitä. Tapauksiksi tässä tutkimuksessa on valittu Santahamina ja Maanpuolustuskorkeakoulun päärakennus, sillä ne ovat saman ilmiön eri näkökulmat (piste- ja aluemaali).

Tässä tutkimuksessa käytetään tutkimusmenetelmänä kirjallisuusselvityksen ja tapaustutkimuksen lisäksi määrällistä matemaattista analyysiä. Vaikka matemaattisella analyysillä tarkoitetaan usein raja-arvoihin ja jatkuvuuteen liittyvää laskentaa, termillä voidaan kuvata tutkimusongelman ratkaisemista matemaattisia menetelmiä käyttämällä yleisesti [24, s. 71]. Tässä tutkimuksessa matemaattisella analyysillä tarkoitetaan lennokkien suorituskyvyn ja niiden tuhoutumiseen tarvittavien energiamäärien arvioimista matemaattisia menetelmiä hyödyntämällä.

Tutkimuksen luvun 2 kirjoittamisen vaatima tiedonkeruu toteutetaan kirjallisuusselvityksen avulla. Luvussa 2 käsitellään suunnatun energian aseiden toimintaperiaatteet ja annetaan esimerkkejä maailmalla kehitetyistä laser- sekä mikroaaltoasejärjestelmistä. Tällä luvulla vastataan tutkimuskysymykseen 1 ja osittain tutkimuskysymykseen 2. Luvussa 3 vastataan tutkimuskysymyksiin 3 ja 4 edelleen kirjallisuusselvityksen keinoin. Tässä luvussa selvitetään tutkimuksen toimintaympäristöön liittyviä ilmiöitä, kuten lennokkien muodostamia uhkia sekä normaaliolojen vaikutusta torjuntatapahtumaan. Luvussa 4 vastataan päätutkimuskysymykseen sekä alatutkimuskysymykseen 2 käyttäen tutkimusmenetelminä kirjallisuusselvitystä, tapaustutkimusta sekä matemaattista analyysiä. Kirjallisuusselvityksen avulla tutkitaan tutkimuksessa esimerkkinä käytettyjen lennokkien ominaisuuksia ja perehdytään lennokkien muodostamiin uhkiin. Tapaustutkimuksen avulla selvitetään kiinteän kohteen suojaamista lennokkiuhkaa vastaan esimerkkitapausten avulla. Matemaattisella analyysillä selvitetään lennokkien kykyä tiedustella kohteita sekä lennokeissa käytettävien materiaalien tuhoamiseen tarvittavia energiamääriä. Luku 5 on johtopäätösluku, jossa analysoidaan tutkimuksen tuloksia ja muodostetaan vastaus päätutkimuskysymykseen. Viidennessä luvussa arvioidaan tutkimuksen luotettavuutta ja esitetään jatkotutkimustarpeita.

1.6.Lähdemateriaalin esittely

Lähdemateriaalina on käytetty pääasiassa aiemmin tehtyjä tutkimuksia ja alan kirjallisuutta. Opinnäytetöitä aiheeseen liittyen on toteutettu Maanpuolustuskorkeakoululla kaikilla tutkintotasoilla, mutta lisäksi tutkimuksia ja kenttäkokeita on suoritettu ainakin Puolustusvoimien tutkimuslaitoksella, Maavoimien tutkimuskeskuksessa ja Viestikoelaitoksella. Ulkomailla on tehty tutkimuksia ja kokeita suunnatun energian aseisiin liittyen ainakin 1960-luvulta alkaen, ja raportteja on löydettävissä internetlähteistä, muun muassa Yhdysvaltain Puolustusministeriön kotisivuilta, mutta myös eri yliopistot ovat julkaisseet artikkeleita aiheesta. Tutkimusten ja tieteellisten julkaisujen lisäksi lähteenä käytetään erilaisia aikakauslehtien artikkeleja, sekä kirjallislähteitä. Tutkimuksen tekemiseen tutkija hyödyntää Maanpuolustuskorkeakoululla ja muissa yliopistoissa julkaistua menetelmäkirjallisuutta.

Opinnäytetöitä tutkintotasoittain:

Sotatieteiden kandidaatin tutkielmia:

Tutkimusta varten on perehdytty Maanpuolustuskorkeakoulun kirjaston opinnäytetyö -tietokantaan. Aiheeseen liittyen on tehty joitakin kandidaatin tutkielmia, mutta niitä on käytetty tässä työssä lähteenä vain rajoitetusti. Kandidaatin tutkielmien aiheiden perusteella tutkija on voinut päätellä suunnatun energian aseiden tutkimuksen suuntaviivoja ja kehitystä. Tärkeimpiä tämän tason lähteitä ovat Kytön ja Lehtisen kirjoittamat tutkielmat [13; 14].

Pro Gradu -tutkielmia:

Pro Gradu -tutkielmia käytettiin työssä lähteenä laajasti, näistä käytetyimmät aiheeseen liittyvät työt ovat kirjoittaneet Haapasalo, Kullberg, ja Nurmio [5; 8; 26].

Esiupseerikurssin tutkielmia:

Esiupseerikurssin tutkielmia tästä aiheesta ei ole vielä kirjoitettu yhtä paljon kuin Pro Gradu -tasoisia töitä, mutta niitäkin on joitakin. Tämän tutkimuksen aiheeseen liittyvä läheisesti Kapteeni Metsävirran tutkimus, tässä työssä sitä on hyödynnetty vain lähdemateriaalin etsintään [27].

Diplomitöitä (yleisesikuntaupseerikurssi):

Suoraan aiheeseen liittyviä yleisesikuntaupseerikurssin diplomitöitä on tehty vain vähän, mutta kapteeni Pernun tutkimus suunnatun energian ilmatorjunta-aseista osuu todella lähelle tämän tutkimuksen aihealuetta [12].

Puolustusvoimien tutkimuksia:

Puolustusvoimissa on tehty tutkimustyötä suunnatun energian aseista eri näkökulmista ja tutkimustyötä ollaan todennäköisesti jatkamassa tulevaisuudessakin. Tutkimuksia on tehty niin Puolustusvoimien Tutkimuslaitoksella ja Järjestelmäkeskuksella kuin puolustushaarojen tutkimuskeskuksissakin. Tähän työhön on valittu näistä tehdyistä tutkimuksista tuoreimpia tai ajankohdaisimpia [15; 16; 19; 28].

Muita tutkimusraportteja:

Muita, pääsääntöisesti yhdysvaltalaisia tutkimuksia on käytetty työssä lähteenä mahdollisimman laajasti niiltä osin, kuin ne ovat julkisia kanavia myöten saavutettavissa. Muutamia esimerkkejä näistä tutkimuksista ovat Wallingin, Salvadorin ja Mattiksen kirjoittamat raportit [1; 29; 30].

Kirjallisuutta ja julkaisuja:

Tutkimuksen tekemiseen on käytetty lukuisia kirjoja ja internetlähteitä, joista merkittävimpinä nostettakoon Bakerin, Nielsenin ja Parkerin kirjoittamat teokset suunnatun energian aseiden perusteista [9; 22; 31]. Lisäksi Jyrki Kosola on kirjoittanut tai ollut mukana monen kirjan tekemisessä, hänen teoksistaan on käytetty Digitaalinen Taistelukenttä -kirjaa [32]. Internet-lähteistä valtaosa on kevyitä artikkeleita tai julkaisuja, eivätkä siis ole varsinaisia tutkimusraportteja tai tieteellisiä artikkeleita. Näistä lähteistä on mainitsemisen arvoisia ovat kuitenkin Kaushalin ja Elliksen kirjoittamat artikkelit laserista sekä suunnatun energian aseista [33; 34].

Menetelmäkirjallisuutta:

Tutkija käytti tutkimusmenetelmien valitsemisen tukena Jormakan, Lappalaisen ja Rantapelkonen kirjoittamia tekstejä, joissa oli koottu nimenomaan sotatieteelliseen tutkimukseen liittyviä yksityiskohtia [24; 35; 36]. Maanpuolustuskorkeakoulun tutkimusmenetelmäkirjallisuuden lisäksi tutkija perehtyi muun muassa Ari Salmisen Vaasan yliopistolle kirjoittamaan julkaisuun [37].

Edellä mainittujen lähteiden lisäksi tutkimuksessa käytettiin useita eritasoisia internet- ja kirjallisuuslähteitä, joista valtaosaa tutkija käytti oman sivistyksensä ja pohjatietojen kartuttamiseen. Luotettavimpia lähteitä sotilaallisista aiheista ja käytännön kokeista ovat Puolustusvoimien tuottamat tutkimukset. Kuitenkin fysiikkaa ja sähkömagneettiikkaa käsittelevistä lähteistä yliopistojen ja tieteellisesti tunnustettujen julkaisijoiden tuottamat kirjat ja artikkelit ovat käytökelpoisia ja uskottavia lähteitä.

2. SUUNNATUN ENERGIAN TEKNOLOGIAT

Tässä luvussa käsitellään suunnatun energian aseiden historiaa ja teknisiä ominaisuuksia. Aseiden säteenmuodostustapoja ja tarkkoja teknisiä yksityiskohtia ei kuitenkaan käsitellä, vaan tutkimuksessa painotetaan torjuntatapahtumaan ja aseiden vaikutusmekanismeihin liittyviin ilmiöihin. Luvussa esitellään lyhyesti eräitä maailmalla käytössä olevia tai kehityksensä osalta pitkällä olevia suunnatun energian aseita.

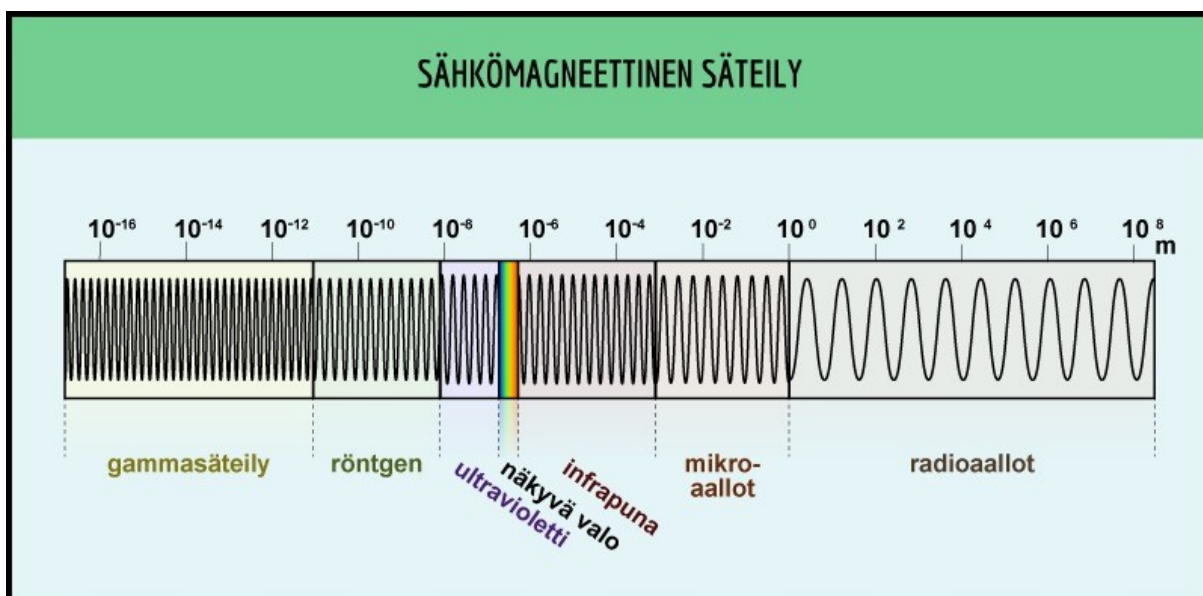
2.1. Sähkömagneettinen spektri

Fyysikko James Clerk Maxwell keksi miten sähkömagneettisia aaltoja voidaan kuvata matemaattisesti 1860-luvulla. Hän totesi aaltojen etenevän valon nopeudella ja osoitti, kuinka niitä esiintyy kaikilla eri taajuuksalueilla. Hänen oletuksensa oli, että valo itsekin on sähkömagneettinen aalto. Hieman myöhemmin, vuonna 1879, saksalainen fyysikko Heinrich Hertz kykeni rautalangasta tehdystä lenkistä ja käämistä koostuvan laitteen avulla osoittamaan Maxwellin väitteet todeksi. [31, s. 198]

Sähkömagneettinen spektri tarkoittaa kaikkien sähkömagneettisten aaltojen kokonaisuutta. Sähkömagneettisia aaltoja esiintyy aina erittäin lyhyestä aallonpituudesta erittäin pitkiin aallonpituuksiin asti. Sähkömagneettiset aallot ovat energiaa, jonka suuruuteen aallonpituus vaikuttaa siten, että mitä pienempi aallonpituus on, sitä suurempi on taajuus ($1/s = 1 \text{ Hz}$), jolloin myös energiaa on enemmän. Pienimpiä tunnettuja aallonpituuksia on gammasäteillä, joiden aallonpituus on vain 0,01nm, kun taas pisimpiä aallonpituuksia edustavat radioaallot, joiden pituudet voivat olla jopa kilometrejä. [31, s. 199]

Lähes kaikille sähkömagneettisen spektrin aallonpituuksille on keksitty jonkinlaista sotilaallista käyttöä, mutta varsinaiseen tuho vaikutukseen ei näihin perustuvilla teknologioilla ole vielä kyetty. Ensimmäiset käyttötarkoitukset liittyvät kommunikaatioon, jossa on hyödynnetty radioaaltoja jo 1800-luvulta alkaen. Ensimmäisessä ja etenkin toisessa maailmansodassa käytettiin menestyksekkäästi tutkia, joiden käyttö perustuu niin ikään radioaaltoihin. Mikroaaltoja ei ole vielä käytetty suuressa mittakaavassa sotilaallisiin tarkoituksiin, mutta niihin perustuvia teknologioita on kehitelty jo vuosia. Infrapunasäteilyllä on saavutettu merkittävä pimeätoimintaa helpottava kyky, kun pimeänäkölaitteet ovat yleistyneet. Näkyvän valon aallonpituuksilla puolestaan toimivat laseriin perustuvat järjestelmät, jotka ovat toistaiseksi keskittyneet enemmänkin maalinosoitukseen kuin kohteiden tuhoamiseen. Luonnollisesti myös röntgensäteily on pelastanut sotilaiden henkiä sairaalaolosuhteissa. [31, s. 200] Edellä mainittujen lisäksi näkyvään valoon perustuva tiedonsiirto on mahdollistanut nopeammat johtamisyhteydet sekä suuremmat tiedonsiirtokapasiteetit, kun valokuitu on saatu mukaan joukkojen kalustoon.

Edellä lueteltujen, tarkoituksellisen sähkömagneettisten aaltojen hyödyntämisen lisäksi taistelutukentällä on valtavat määrät erilaista tahatonta tai ympäristön aiheuttamaa säteilyä. Kaikki kappaleet säteilevät ympärilleen niin sanottua mustan kappaleen säteilyä, jonka lisäksi avaruudesta saapuu koko spektrin mukaista säteilyä. Lisäksi ihmiset ja eläimet sekä ihmisten rakentamat laitteet lähettävät ympärilleen jonkinlaista tahatonta säteilyä, joka on yleisimmin lämpösäteilyä tai esimerkiksi näyttöpäätteiden hajasäteilyä. Tahaton säteily, kuten kaikki muukin säteily, myös heijastuu kaikista luonnossa olevista kappaleista. Näiden tahattomien ja tahallisten säteilyjen, sekä niiden heijastumien avulla elektronisella tiedustelulla voidaan selvittää vihollisen sijainti ja joukon vahvuus hyvinkin tarkasti. [32, s. 40-41]



Kuva 1. Sähkömagneettinen spektri [38]

Perinteisen tutka- ja radiolaitteiston rinnalle on tullut suunnatun energian aseita, joiden vaikutus voi perustua eri aallonpituuksilla toimiviin säteilyihin, kuten laser-, mikroaalto tai radioaalto-säteilyyn. Mikroaaltoihin perustuvia HPM (High Power Microwave) -järjestelmiä voidaan käyttää esimerkiksi väestönhallinnassa perustuen orgaanisen pintakudoksen nopeaan lämmittämiseen ja kivun tuottamiseen säteilyn kohteeksi joutuneessa henkilössä. Mikroaaltoaseiden käytössä väestönhallintaan liittyy vahvoja eettisiä haasteita, ja voivat ne olla laillakin kielletty, riippuen alueesta. Elektroniikkaa sisältävien laitteiden tuhoamiseen tarkoitettujen mikroaaltoaseiden vaikutusmekanismi on samankaltainen kuin sähkömagneettisella pulssilla. Laitetta kohti ammutut pulssit aiheuttavat laitteen elektroniikkaan hetkellisesti suuria virtapiikkejä, jotka tuhoavat tai vaurioittavat herkkiä elektronisia osia laitteen sisällä. [19, s. 7-8]

2.2. Suunnatun energian aseet (Directed Energy Weapons, DEW)

On olemassa lukuisia erilaisia energiamuotoja, joista osa on helpommin ja osa vaikeammin hyödynnettävissä. Muutamia yleisiä muotoja ovat: muodonmuutos-, lämpö-, ääni-, sähköinen-, kemiallinen- ja ydinenergia. [31, s. 40] Suunnatun energian aseissa tuhovaikutus perustuu siihen, että varastoitu energia siirretään kohteeseen, jossa se muuttuu muotoaan, pääasiassa lämmöksi. Energia voidaan varastoida periaatteessa missä tahansa muodossa, mutta käytännöllisimpiä vaihtoehtoja lienevät dieselöljy (esimerkiksi sota-aluksella), kemialliset aineet (esimerkiksi lentokoneessa tai säiliöautossa) tai sähköisenä energiana akkuihin varastoituneena. Lisäksi tehokas tapa tuottaa energiaa asejärjestelmien käyttöön on ydinreaktori, joita on käytössä esimerkiksi ydinvoimalla toimivissa sota-aluksissa.

Energiaa kiinnostavampi tieto on useissa tapauksissa energian määrä aikayksikköä kohden. Tällöin puhutaan tehosta, teho lasketaan kaavalla

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (1)$$

jossa E on energian määrä systeemissä ja t on tapahtumaan kulunut aika. Tehon yksikkö on J/s, eli watti (W). [31, s. 40]

Suunnatun energian aseiden toimintaa voidaan tarkastella kolmen vaiheen kautta, jotka ovat 1. Aallon laukaisu, 2. Aallon eteneminen sekä 3. Vaikutus kohteessa. Aseen vaikuttavuutta eri toiminnan vaiheissa voidaan kuvata esimerkiksi seuraavilla tavoilla:

Aallon laukaisu. Suunnatun energian aseiden laukaisuun liittyvä teho ilmoitetaan yleisesti efektiivisen säteilytehon (ERP, Effective Radiated Power) avulla. Efektiivinen säteilyteho kuvaa aseelta lähtevää tehoa järjestelmän sisäisten häviöiden ja antennin suuntaavuuden vaikutuksen jälkeen. Säteilytehon yksikkö on watti (W). [22]

Aallon eteneminen. Kun sähkömagneettinen säteily kulkee väliaineessa (esimerkiksi ilmassa) kohti kohdetta säteilyn suunta, voimakkuus, aallonpituus ja taajuus voivat muuttua johtuen sironnasta, heijastumisesta, taitumisesta ja absorptiosta. [22] Mikäli väliaine olisi homogeenista, säteilyaallot etenisivät suoraviivaisesti muuttamatta suuntaansa. Mutta koska ilmakehä on heterogeeninen väliaine, jokaisessa kahden väliaineen rajapinnassa sähkömagneettinen aalto heijastuu ja taituu, jolloin aallon suunta muuttuu hieman ja intensiteetti halutun kohteen suunnalla pienenee. Aallon edetessä osa sen sisältämästä energiasta siirtyy väliaineessa oleviin hiukkasiin muina energianmuotoina (kuten lämpönä), eli absorboituu väliaineeseen. Tämän johdosta sähkömagneettisen aallon ja väliaineen välinen vuorovaikutus aiheuttaa sirontaa, kun väliaineen hiukkasiin varautunut energia purkautuu ja palaa alkuperäiseen aaltoon. Tämä puolestaan aiheuttaa varsinaisen aallon suunnassa eteneviä toisioaaltoja, joilla on eri polarisaatio ja taajuus kuin alkuperäisellä aallolla. Näin aallon intensiteetti pienenee sen edetessä väliaineessa kohti kohdetta. Intensiteetin pienenemistä kutsutaan vaimenemiseksi. Vaimenemista tapahtuu edellä mainituilla tavoilla väliaineesta riippuen, sekä aallon levitessä etäisyyden kasvaessa suuremmalle alueelle pienentäen pinta-alaa kohti osuvaa tehoa. [39, s. 14-17]

Aallon intensiteetti, eli tehotiheys kertoo säteilyn tehon pinta-alaa kohden. Sähkömagneettisten aseiden tapauksessa säteilykuvio voi olla pallomainen tai se voi olla suunnattu, jolloin aaltokuva on käytännössä lieriön tai kartion muotoinen. Sähkömagneettisen aallon intensiteetti pienenee kääntäen verrannollisesti etäisyyden neliöön. Intensiteetin ja etäisyyden välinen suhde voidaan siis esittää yhtälöllä

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2} \quad (2)$$

jossa I_2 tarkoittaa aallon intensiteettiä etäisyyden r_2 päässä säteilylähteestä ja I_1 tarkoittaa aallon intensiteettiä etäisyyden r_1 päässä säteilylähteestä. [39, s. 10]

Intensiteetti lasketaan kaavalla

$$I = \frac{P}{A} \quad (3)$$

jossa P on teho ja A on säteilykuvion pinta-ala. Koska teholla tarkoitetaan energiaa aikayksikköä kohden, voidaan intensiteetin kaava esittää myös muodossa

$$I = \frac{P}{A} = \frac{E}{At} \quad (4)$$

jossa E on energia (joule) ja t on aika (sekunti). [40, s. 1064]

Suunnatun energian aseisiin pyritään suunnittelemaan nimensä mukaisesti suuntaavuutta. Suuntaavuuteen vaikuttaa suuntakeilan avaruuskulma ja se vaikuttaa luonnollisesti aseiden intensiteettiin ja tehon määrään kohteessa. Laseraseissa kulmaa voidaan säädellä linssien ja niiden polttovälien avulla. [39, s. 10]

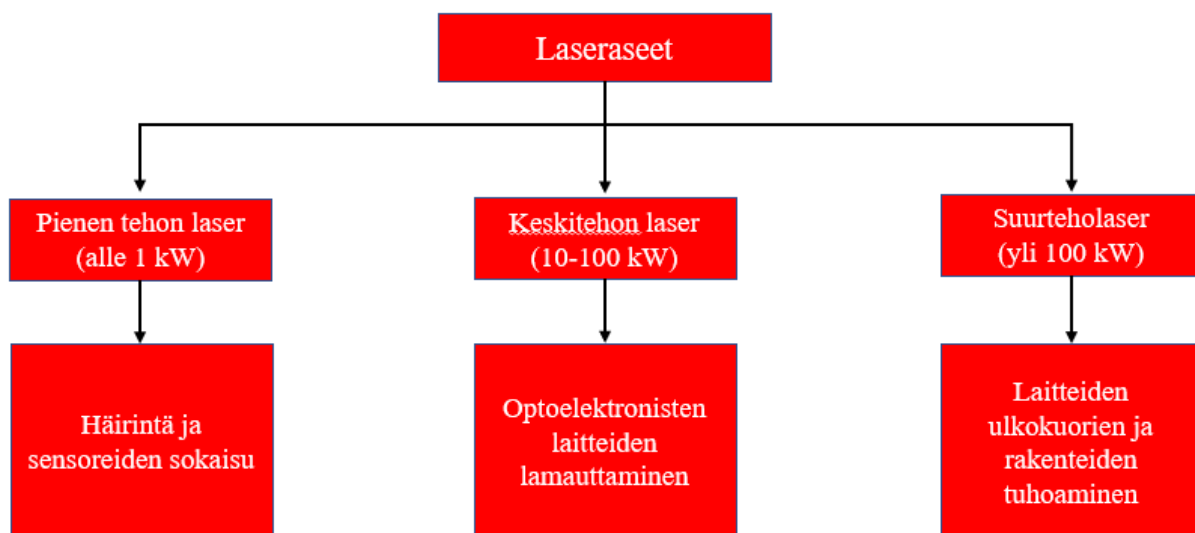
Vaikutus kohteessa. Osuman aikaiset sironta ja taittuminen voidaan mieltää hukkaan menneenä energiana, sillä ne pienentävät säteilyn vaikutusta halutussa paikassa. Absorptio puolestaan on tutkimuksen tilanteessa haluttu vaikutus, sillä se tarkoittaa käytännössä kohteen imemää energiaa. Suuritehoisen sähkömagneettisen aallon vaikutus kohteessa riippuu intensiteetistä ja vaikutusajasta sekä aseiden ja kohteen sensorien käyttämistä aallonpituuksista ja taajuuksista. [22] Asejärjestelmästä riippuen, vaikutus kohteessa vaihtelee laseraseen polttavasta, leikkaavasta ja höyrystävästä vaikutuksesta mikroaaltoaseiden aiheuttamaan laitteen elektroniikan vaurioitumiseen.

2.3. Suurteholaser (High Energy Laser, HEL)

Laser (Light Amplifications by Stimulated Emission of Radiation) on näkyvän valon aallonpituudella toimiva, sähkömagneettinen aalto. Kuitenkin erona muihin valonlähteisiin, laserilla on yksilöllisiä ominaisuuksia, joiden ansiosta valo on kollimoitua, yksiväristä ja koherenttia. [41] Kollimoidulla sähkömagneettisella aallolla tarkoitetaan sitä, että säteilyllä ei ole merkittävää hajontaa, ainakaan lähikenttää tarkastellessa. Näin säteily pysyy tavallista valoa paremmin koossa, joten energia- tai tehohäviöt ovat paljon pienemmät [32, s. 314]. Laser-säteilyn taajuuskaista on huomattavasti muita valonlähteitä kapeampi, jolloin laser ilmeneekin yksivärisenä valona. Lasersäteiden aallonpituus voi kuitenkin joissakin tapauksissa olla näkyvän valon aallonpituusalueen ulkopuolellakin, esimerkiksi röntgen- tai infrapunäsäteilyyn perustuvia lasereita voidaan rakentaa [31, s. 287]. Sähkömagneettisen aallon koherentiudella tarkoitetaan sitä, että kaikki aallon osa-aallot ovat samansuuntaisia ja niiden taajuus sekä aallonpituus ovat yhteneväisiä. [31, s. 23]

Laseraseiden käyttöön suunnattuja kokeita suoritettiin Kaliforniassa Hughesin tutkimuslaboratoriossa jo vuonna 1960. Vasta 50 vuotta myöhemmin ne on saatu todelliseen käyttöön. [42] Suurteholasera voidaan käyttää energian siirtämiseen monessa eri käyttötarkoituksessa, kuten valaisemiseen, tiedon siirtämiseen ja jopa satelliittien akkujen lataamiseen. Laseriin perustuvia sovelluksia on jo asennettu erilaisille alustoille, yksi kiinnostavimmista on jo 1980-luvulla Yhdysvalloissa toteutettu Boeing 747-mallin lentokoneeseen asennettu lasertykki. Tykki perustui kemialliseen laseriin, joka vaati paljon polttoainetta eikä mallista koskaan toteutettu enempää kuin yksi prototyyppi. [43]

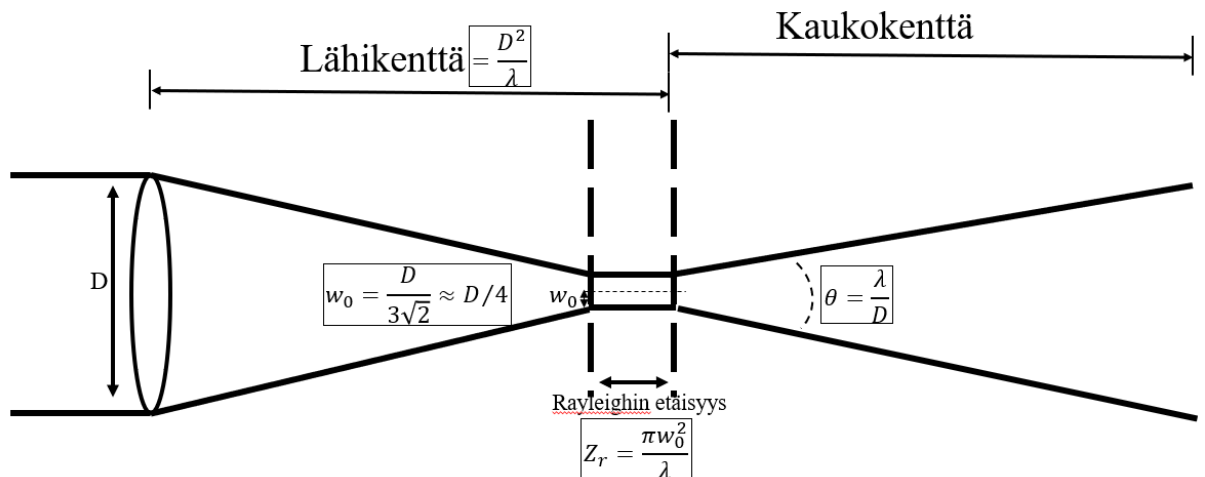
Laseraseita voidaan luokitella esimerkiksi tehon suhteen, mutta myös aallonpituuden tai toimintaperiaatteen mukainen jaottelu on mahdollista. Tehon mukaan laseraseet luokitellaan pienen (low), keski- (medium) ja suuren (high) tehon laserista, kaikilla edellä mainituilla on omat käyttötarkoituksensa, joita on havainnollistettu kuvassa 2. Pienitehoiseksi laseriksi luetaan alle 1 kW:n laseraseet, joita voidaan käyttää maalinosoitukseen, asejärjestelmien käytön simuloimiseen, sensorien tai viestintäjärjestelmien häirintään tai ihmisen sokaisemiseen. Keskitehoiset laserit ovat paljon tehokkaampia, mutta tuottavat kuitenkin vielä alle 100 kW tehoa. Näitä voidaan käyttää esimerkiksi optoelektronisten laitteiden tuhoamiseen. Suurteholaserit (high energy laser, HEL) ovat yli 100 kW:n tehoisia ja niitä on suunniteltu käytettävän ilmatorjuntaan sekä maa- tai pintakohteiden tuhoamiseen ilmasta käsin. [33]



Kuva 2. Laser-aseiden luokittelu energian mukaan [33]

Suurteholaserin tuho vaikutus perustuu säteen absorboitumiseen kohteeseen ja sitä kautta kohteen lämpötilan nostamiseen. Laseraseen vaikutus voi olla yksinkertaisimmillaan optisen laitteen väliaikainen sokaiseminen. Tehokkaimmillaan laserase sulattaa tai höyrystää kohteen pintamateriaalia ja aiheuttaa sisäisiä rakenteenmuutoksia, jotka puolestaan aiheuttavat muutoksia esimerkiksi lennokin aerodynamiikkaan aiheuttaen lennokin putoamisen. Lisäksi heikosti suojatut, mutta herkäät, elektroniset osat lennokin sisällä voivat kärsiä vaurioita suuren äkillisen energiamäärän takia [33]. Puolustusvoimien tutkimuslaitoksen raportin mukaan esimerkiksi 10 kW:n tehoisella ja 17 mm levyisellä lasersäteellä kaupallisen DJI Phantom 3 -nelikopterin tuhoamiseen tarvittiin 5-10 sekuntia. [16, s. 17] Tämä tutkimus on kuitenkin toteutettu staattisessa tilanteessa, jolloin lennokki ei ole yrittänyt väistää lasersädettä. Mikäli laseraseella aiotaan torjua liikkuva lennokki, on sillä oltava huomattavasti enemmän tehoa, jotta lennokki tuhoutuisi nopeammin. Tästä huolimatta asejärjestelmässä on oltava hyvin tarkka ja nopea kohteenseurantajärjestelmä, jotta lasersäde osuisi lennokkiin riittävän kauan lennokin liikehinnästä huolimatta.

Laseraseen tehokkuus perustuu säteen fokuusoimiseen, eli kohdistamiseen. Lasersäde pyritään kohdistamaan siten, että lasersäde osuu kokonaisuudessaan mahdollisimman pienelle alueelle. Lasersäteelle on ominaista se, että säteen intensiteetti on kohdistuspisteessä suurempi kuin aivan aseensa vieressä. Etäisyyttä, jolla laseraseen intensiteetti on suurimmillaan, kutsutaan Rayleighin etäisyydeksi ja sen laskukaava on esitetty kuvassa 3. Laseraseen kannalta optimaalinen alue on toimia lähikentällä, jolloin intensiteetti on suurimmillaan. Mikäli vaikuttaminen tehdään vasta kaukokentän alueella, säteen intensiteetti pienenee suhteessa etäisyyden neliöön ja suuri osa käytetystä tehosta menee hukkaan. Intensiteetin pieneneminen johtuu lasersäteen divergenssin suurenemisesta kaukokentässä, kuten kuvasta 3 on nähtävissä. [9, s. 101-106]



Kuva 3. Laseraseen lähi- ja kaukokenttä. Kaavassa Z_r on Rayleighin etäisyys, w_0 tarkoittaa kohdistetun säteen keskipisteen ja ulkoreunan välistä etäisyyttä (sädettä) ja λ tarkoittaa laserin

aallonpituutta. Säde tulisi kohdistaa kokoon, jossa lasersäteen säde w_0 on noin $\frac{1}{4}$ asean aukon koosta D .

Laserit voidaan luokitella tehon lisäksi myös toimintaperiaatteiden mukaisesti. Seuraavat kappalet esittelevät erilaisia lasersäteen muodostamisen tapoja.

Kiinteäainelaser (Solid State Laser, SSL)

Kiinteäainelaser muodostetaan jotakin kiinteää kappaletta, kuten kristallia tai lasia, hyödyntäen. Kaikkien aikojen ensimmäiset laserit olivat kiinteäaine-tyyppisiä lasereita. kiinteäainelaserit voidaan jakaa pienempiin luokkiin, joita ovat watti-luokka, irtolaser, kuitulaser ja levyaser. Näistä watti-luokan laserit ovat yleisimpiä siviili- ja sotilaskäytössä, esimerkiksi etäisyydenmittauksessa ja lasertutkissa. Irtolaserin etuna on sen kyky tuottaa yli 100 kW:n teho, sekä mahdollisuus niputtaa useita irtolasereita yhteen vielä suuremman tehon aikaan saamiseksi. Kuitulaser sisältää pitkiä optisia kuituja, joiden avulla lasersäde muodostetaan. Yhdellä kuitulaserilla voidaan tuottaa noin 10 kW:n teho, mutta niitäkin voidaan koota yhteen suuremman tehon saavuttamiseksi. Irtolaser vaatii paljon tilaa, kun taas kuitulaser mahtuu paljon pienempään tilaan. Levyaser puolestaan käyttää väliaineena erittäin ohutta levyä. Levy- ja kuitulaserit ovat keskenään hyvin samankaltaisia. [12, s. 24] Kiinteäainelaserien hyötyjä ovat niiden pieneen kokoon suhteutettuna suuri teho sekä se, ettei niiden käyttöön liity myrkyllisten kemikaalien käyttöä. Haittapuolina puolestaan hyvälaatuisen säteen muodostamisen vaikeus, rajallinen mahdollisuus tehon nostamiseen (tällä hetkellä megawattien tehoja ei voida saavuttaa) sekä tarve tehokkaalle jäähdytykselle. [44, s. 15]

Väri- ja nestelaser (Dye/Liquid Laser)

Dye Laser, eli värilaser käyttää orgaanista väriainetta aktiivisena lasermateriaalina. Värilaseria voidaan kutsua myös nestelaseriksi, vaikka termit eivät tarkoitaakaan täysin samaa asiaa. Nestelaserissa käytetään vain nestemäisiä väliaineita, kun taas värilaserin lasermateriaali voi olla myös kiinteässä muodossa. [12, s. 24] Väriaineita on satoja erilaisia ja niitä voidaan organisoida sarjaan, mahdollistaen aallonpituuden säätämisen välillä 0,32 – 1,2 mikrometriä. Väriainelaserit voidaan luokitella kolmeen tyyppiin: pulssitettuihin, jatkuvatoimisiin sekä muotolukittuihin. Muotolukittu laser tarkoittaa sitä, että sitä pumpataan toisella laserilla. Etuna väriainelaserissa on se, että niitä voidaan käyttää koko näkyvän spektrin alueella. [32, s. 318]

Kaasulaser (Gas Laser)

Gas Laser, eli kaasulaserissa käytetään erilaisia kaasuja lasermateriaalina lasersäteen muodostamiseen. Kaasulaserin ja kemiallisten lasereiden ongelma on, että ne vaativat valtavia polttoainevarastoja, jolloin laitteen massa nousee liian suureksi. Näiden lasereiden hyvä puoli on puolestaan siinä, että ne ovat ainoita lasertyyppisiä, joilla on saavutettu jopa 1 megawatin tehoja. Suuren kokonsa vuoksi kaasu- ja kemiallisten lasereiden kehityksestä sotilaskäyttöön on pitkälti luovuttu. Kuitenkin, vaikka kaasulasereiden kehitykseen ei tällä hetkellä panosteta, on kuitenkin yksi kaasulasertyyppi, jolla on olemassa potentiaalia ja jota on viime aikoina kehitetty. Se on nousemassa yhdeksi mahdolliseksi sotilaalliseksi suorituskyvyksi muiden joukkoon. Tämä lasertyyppi on metallihöyrylaser, jolla on mahdollista saada aikaiseksi suuria tehoja kuitenkin pitäen laitteen koon kohtuullisena. [12, s. 24-25] Kaasulasereissa energian pumppaus voidaan toteuttaa optisella pumppauksella käyttäen salamalamppua tai toista laseria, toisaalta se voidaan toteuttaa myös kemiallisella reaktiolla. [32, s. 317]

Kemiallinen laser (Chemical Laser)

Kemiallisissa lasereissa pumppausenergia toteutetaan kemiallisella reaktiolla. Kemialliset laserit luokitellaan osaksi kaasulasereita, koska lasermateriaali on niissä useimmiten kaasumaisena, kuten hiilimonoksidilaserissa (CO) tai happilaserissa ($I_2:O_2$). [32, p. 318] Kemiallisen laserin etuina ovat mahdollisuus saavuttaa erittäin suuri teho (jopa megawatteja), pitkälle kehittynyt tekniikka ja hyvälaatuinen lasersäde. Haittapuolina ovat kemialliseen reaktioon tarvittavien tuotteiden myrkyllisyys, järjestelmien suuri koko ja paino sekä ammuttavien laukausten määrään riippuvuus polttoaineesta. [44, s. 14]

Vapaan elektronin laser (Free Electron Laser, FEL)

Vapaan elektronin laser on potentiaalinen lasertyyppi tulevaisuudessa kehitettäviin asejärjestelmiin. Tällä hetkellä tekniikka on vielä kehittymätöntä ja laitteet ovat suuria ja painavia. Mutta tekniikka mahdollistaa suuret tehot ja tarjoaa mahdollisuuden käyttää eri aallonpituuksista säteilyä samalla laitteella. [12, s. 25] Vapaan elektronin laserin toiminta perustuu elektronien kiihdyttämiseen magneettikentässä, saaden elektronit säteilemään valoa. [44, s. 14]

Puolijohdelaser (diodilaser)

Puolijohdelaserit ovat pieniä laitteita, joissa on kuitenkin kokoon suhteutettuina paljon tehoa. Niiden toiminta perustuu useisiin puolijohdemateriaalikerroksiin, joiden keskellä on yksi aktii-

vinen laservahvistuksesta vastaava kerros. Nämä laserit toimivat 0,1 – 1,55 mikrometrin aallonpituuksilla. [32, s. 317] Puolijohdelaserit kuuluvat tyypillisesti matalan energian lasereihin, jolloin niiden teho riittää korkeintaan lennokin häirintään, mutta ei tuhoamiseen.

2.3.1. Laseraseiden nykyhetki ja tulevaisuuden näkymät

Suurteholaserin käyttöön perustuvia asejärjestelmiä suunnitellaan kiihtyvällä tahdilla ympäri maailmaa, tässä luvussa esitellään muutamia tuotteita, joiden kerrotaan olevan jo testi- tai jopa jonkinlaisessa palveluskäytössä. Laseraseita on valmisteilla esimerkiksi Yhdysvalloissa (Lockheed Martin, Northrop Grumman Corp, Raytheon), Israelissa (Rafael), Euroopan puolustusjärjestössä (EDA) (The Tactical Advanced Laser Optical System, TALOS), Iso-Britanniassa (Defence Science & Technology Laboratory). [45] Lisäksi Intian ilmavoimat on jättänyt tietopyynnön lennokkientorjuntajärjestelmästä [46] ja Venäjällä on ollut Peresvet-järjestelmä käytössä jo vuodesta 2019 alkaen [47].

Raytheon: Directed Energy-Maneuver Short-Range Air Defense (DE M-SHORAD)

DE M -SHORAD on Yhdysvaltain maavoimien projekti, joka on aloitettu vuonna 2020 ja siihen liittyvä ensimmäinen toimiva prototyyppi on ollut testattavana Fort Sill:n sotilastukikohdassa Oklahomassa kesän 2021 aikana. Prototyyppi on panssaroidun Striker-taistelujoneuvon alustalle rakennettu 50 kilowatin tehoinen laserase, joka on tarkoitettu erityisesti lennokkien torjuntaan. Järjestelmän kerrotaan lisäksi kykenevän torjumaan myös ohjuksia ja jopa räjäyttämään tykistön ammuksen ilmassa tai muuttaen sen lentorataa niin, ettei se osu kohteeseensa. Järjestelmän tehoa kytetään julkisten tietojen perusteella säätämään halutun vaikutuksen mukaiseksi, sillä ase on lämmitettävä kohdetta vaikuttaen sen aerodynaamisiin ominaisuuksiin, sokaisten sensoreita, ylikuumentaa moottoreita tai räjäyttämällä kohteen polttoaineen, akut tai räjähtävän hyötykuorman. Järjestelmästä ei ole kerrottu julkisuuteen juuri mitään teknisiä tietoja sen tehon lisäksi, joten sen kyvykkyyttä tämän tutkimuksen tarkoitamaan käyttöön on vaikea arvioida. Kenraaliluutnantti Neil Thurgood kuitenkin toteaa järjestelmän olevan ensimmäinen taistelukelpoinen ja liikkuva laseriin perustuva asejärjestelmä Yhdysvaltain maavoimilla, joten prototyyppi vaikuttaa lupaavalta ja mielenkiintoiselta. Maavoimilla on suunnitella rakentaa ensimmäinen, neljällä laserilla varustetusta Stryker-ajoneuvosta koostuva, joukkue jo vuoden 2022 aikana. [48; 49] Asejärjestelmän valmistaa Raytheon Intelligence and Space, joka on vahvistanut, että se on saanut 123 miljoonan dollarin arvoisen tilauksen, joka tullaan toimittamaan vuonna 2022. Järjestelmän kerrotaan sisältävän laserin lisäksi kohteen seurantalaitteen, jonka toiminta perustuu elektro-optiseen- ja infrapunasensoriin, sekä Ku720-tutkan. [50]



Kuva 4. DE M-SHORAD [50]

Rafael: Drone Dome

Israelilainen Rafael tunnetaan erityisesti Iron Dome -järjestelmästänsä, joka on rakennettu Israelin ylle ja jonka tehtävä on tuhota maahan kohdistuvat raketti-iskut ilmatorjuntaohjuksilla. Järjestelmä onkin toiminut onnistuneesti jo kymmenen vuoden ajan toteuttaen valmistajan mukaan yli 2500 torjuntaa 90 prosentin osumavarmuudella. [51] Rafael on kehittänyt Iron Domea vastaavan järjestelmän, Drone Domen, joka on tarkoitettu käytettäväksi lennokkeja ja muita pieniä ilmamaaleja vastaan. Drone Dome on valmistajan mukaan jo operatiivisessa käytössä ympäri maailman. Ison-Britannian puolustusministeriö on ostanut useita järjestelmiä jo joitakin vuosia sitten, suojaten niillä esimerkiksi vuoden 2021 G7-maiden huippukokouksen 11.-13.6. [52] Drone Domen kerrotaan tarjoavan monipuolisia ja modulaarisia torjuntamenetelmiä. Se sisältää laitteistoa niin tiedusteluun, häirintään kuin suoraan vaikuttamiseenkin, joten se mahdollistaa toimimisen kriisin eri vaiheissa lakien ja yleisen ilmapiirin mukaisesti. Rafael ilmoittaa järjestelmän kykenevän etsimään pienikokoisen maalin (0,002 m²) jopa 3500 metrin etäisyydeltä. Järjestelmä voidaan rakentaa kiinteäksi tai liikuteltavaksi yksiköksi ja sen käyttöön riittää yksi operaattori maalin havaitsemisesta aina vaikutukseen saakka. Järjestelmälle luvataan täysi 360 asteen kattavuus, nopealla reaktioajalla ja pienillä sivullisille aiheutuneilla vahingoilla. [53; 54] Tutkijan tiedossa ei ole Britannian ja Israelin lisäksi muita maita, joihin järjestelmää olisi myyty, vaikka valmistaja onkin ilmoittanut järjestelmän olevan jo laajasti operatiivisessa käytössä.



Kuva 5. DRONE DOME™ [53]

Lockheed Martin: HELIOS

Lockheed Martinilla on käynnissä useita laseraseiden kehittelyyn liittyviä tutkimuksia ja projekteja. Esimerkkeinä mainittakoon Yhdysvaltain ilmavoimien toimeksiantona rakennettu ATHENA-järjestelmän (The Advanced Test High Energy Asset) prototyyppi, jolla on suoritettu onnistuneita testiammuntoja jo vuonna 2019. [55; 56] Toinen, yhä varhaisessa prototyyppivaiheessa oleva järjestelmä on lentokoneeseen asennettava Tactical Airborne Laser Weapon System (TALWS), jonka tarkoituksena on suojata lentokoneita ilmatorjunta- tai ilmataisteluoohjuksia vastaan. Lisäksi Lockheed Martin kehittää Yhdysvaltain maavoimille erittäin tehokasta pitkän kantaman laserasetta, jonka teho on ainakin 300 kilowattia. [57]

Edellä mainittujen lisäksi yhtiö on kehittänyt HELIOS-järjestelmää (High Energy Laser With Integrated Optical-dazzler and Surveillance), jonka luvataan olevan monipuolisempi kuin vain pelkästään laserase. HELIOS sisältää kyvykkyudet niin tiedusteluun, häirintään kuin tuhoamiseenkin. Vuonna 2021 HELIOS on integroitu Arleigh Burke -luokan hävittäjän Aegis-taistelujärjestelmään ja sillä on ammuttu testiammunnat maasijoitteisesti jo vuonna 2020. Aseessa on vähintään 60 kilowatin kiinteäainelaser ja sillä voidaan sokaista sensoreita ja tarvittaessa polttaa reikä lennokin tai muun kohteen runkoon ja näin ollen tuhota kohde. Alussijoitteinen järjestelmä hyödyntää aluksen polttoainetta energianlähteenään, joten sillä voidaan tulittaa niin kauan, kuin aluksen moottori on käynnissä. [58]



Kuva 6. HELIOS [59]

Distributed Gain High Energy Laser Weapon System

General Atomics Electromagnetic Systems (GA-EMS) ja Boeing kehittävät yhdessä 300 kilowatin laserasetta Yhdysvaltain maavoimille. Suunnittelun tavoitteena on saada aikaiseksi prototyyppi, jossa voidaan kokeilla erilaisia ratkaisuja kahden yhtiön välisellä yhteistyöllä eikä se todennäköisesti sellaisenaan ole tulossa operatiiviseen käyttöön. [60; 61]

Venäjän laseraseet: Peresvet, Sokol-Eshelon, Kalina

Venäjän armeijan pääesikunnan päällikkö Valery Gerasimov on kertonut julkisuuteen, että Venäjällä on ollut suurteholaseriin perustuva asejärjestelmä käytössä jo vuodesta 2019 alkaen. Monissa maissa ja medioissa väitettä on epäilty propagandaksi, mutta Eurasian Times -lehden mukaan Venäjällä on maailman ensimmäinen palveluskäytössä oleva laserase. [47] Venäläisen Avia-Pro -julkaisun mukaan Peresvet on ollut kokeilukäytössä Syyrian sodassa ja järjestelmällä olisi jopa pudotettu israelilainen tiedustelulennokki 27.3.2020 ilman ennakkovaroitusta. Venäjän puolustusministeriö ei ole kuitenkaan kertonut tehneensä testejä Peresvetillä kyseisenä päivänä. [62] Jerusalem Post -lehden mukaan Israelin puolustusvoimat ei kommentoi ulkomaalaisista lähteistä peräisin olevaan uutiseen mitään [63]. Tutkija Bart Hendrickx on kirjoittanut The Space Review -verkkolehden artikkelin, jossa hän pohtii Peresvetin käyttötarkoitusta. Hänen mukaansa järjestelmän teho ei todennäköisesti riitä suurempien kohteiden tuhoamiseen, vaan se voisikin olla tarkoitettu ensisijaisesti tiedustelusatelliittien sensorien sokaisuun, jolloin Venäjän mannertenvälisten ohjusten siirrot voidaan tehdä salassa. Satelliittikuvien perusteella onkin nähtävissä, että Peresvet -lavetteja on sijoitettu samoihin tukikohtiin, kuin suurimmat ohjukset. Venäjä ei ole julkaissut järjestelmästä juuri mitään teknisiä tietoja tai käyttötarkoitusta, joten Hendrickx perustaa arvionsa julkisista lähteistä koottuihin tietoihin. [64]



Kuva 7. Peresvet [64]

Peresvetin lisäksi Venäjä on kehittänyt lentokoneeseen asennettavaa laserasetta, joka on tarkoitettu satelliittientorjuntaan ja sitä kutsutaan Sokol-Esheloniksi. Myös Peresvetistä ollaan kehittämässä lentokoneasenteista versiota, mutta Sokol-Eshelon on täysin oma projektinsa, joka on alkanut jo vuonna 2002. Järjestelmän alustaksi on valittu Iljushin IL-76MD -kuljetuskone, joka on alun perin rakennettu edellisen laseraseprojektin (Ladoga) tarpeisiin. Vaikka kuljetuskoneeseen sijoitettu laserjärjestelmä onkin hyvin samankaltainen Yhdysvaltalaisen YAL-1 -projektin kanssa (projekti keskeytetty vuonna 2011), sen käyttötarkoitukset ovat erilaiset, totesi pääsuunnittelija Aleksandr Ignatyev vuonna 2014. YAL-1 oli tarkoitettu ohjusten tai muiden kohteiden tuhoamiseen, kun taas Sokol-Eshelon on suunniteltu tiedusteluun ja kohteiden sokaisuun, jolloin sen toteuttamat tehtävät voidaan toteuttaa pienempitehoisilla lasereilla. Sokol-Eshelon on luovutettu puolustusministeriölle vuonna 2015, mutta palveluskäyttöön konetyyppiä ei ole vielä saatu. [64]



Kuva 8. Sokol-Eshelon [65]

Edellä mainittujen lisäksi Venäjällä on rakennettu kiinteästi asennettavaa laserasetta, joka on niin ikään tarkoitettu satelliittien sokaisemiseen. Tämä projekti on nimeltään Kalina. Projektista ei tiedetä paljoa, mutta lähteiden mukaan sen tarkoitus on satelliittien tiedustelu ja paikantaminen. Todennäköisesti sillä on kuitenkin myös jonkinlainen kyky satelliittien häirintään tai sensorien sokaisemiseen. [64]

2.4. Suurtehomikroaalto (High Power Microwave, HPM)

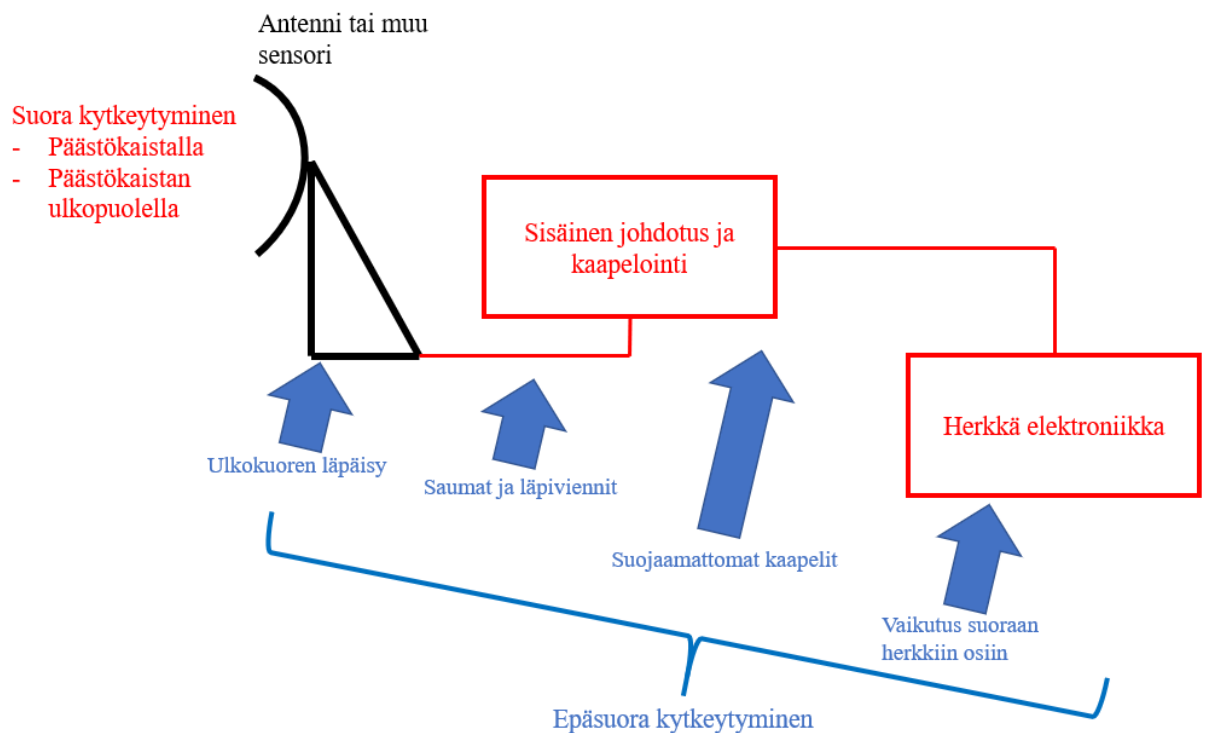
Suurtehomikroaaltoista käytetään usein myös termiä HPRF, eli High Power Radio Frequency. Termin käyttö johtuu siitä, että mikroaalloilla tarkoitetaan SHF- (Super-High Frequency) ja EHF-alueilla (Extremely-High Frequency) toimivia radioaaltoja. Mikroaallot ulottuvat 300 GHz:iin asti, jolloin aallonpituus on enää 1 millimetri. Tämän korkeammilla taajuuksilla toimivat sähkömagneettiset aallot luokitellaan optiseen säteilyyn ja luokittelussa käytetään apuna aallonpituuksia niiden ollessa helpommin käsiteltävissä. Pienimmillään mikroaaltojen taajuus on SHF- alueella, eli 3-30GHz. [32, s. 64]

Mikroaaltoaseita voidaan käyttää kahdella kytkeytymistavalla, Front Door Coupling ja Back Door Coupling. Tässä tutkimuksessa näistä käytetään termejä suora ja epäsuora kytkeytyminen. Suoralla kytkeytymisellä vaikutetaan lennokin optiikkaan tai antenneihin, jolloin säteen energia etenee laitteen johdotuksia pitkin herkempiin osiin, vaurioittaen lopulta laitteen komponentteja. Suora kytkeytyminen toimii pienemmällä energiamäärällä, mutta sen haittapuolena on tarve tietää lennokin sensoreiden aallonpituus ja taajuus. Toisaalta mikäli nämä ovat tiedossa ja ase toimii oikeilla parametreilla, suoralla kytkeytymisellä vaikutettaessa laitteen elektroniikka tuhoutuu varmemmin kuin epäsuoralla kytkeytymisellä. Suoran kytkeytymisen tehokkuus perustuu siihen, että kohdejärjestelmän oma antenni toimii asejärjestelmän signaalille eräänlaisena vahvistimena lisäten pulssin vaikutusta. [22]

Suoralla kytkeytymisellä voidaan vaikuttaa kohteen päästökaistalla (in-band) tai päästökaistan ulkopuolella (out-of-band). Päästökaistalla toimitaan silloin, kun kohde on optimoitu vastaanottamaan mikroaaltoaseen kanssa samalla taajuudella toimivaa säteilyä. Lennokin tapauksessa kyseeseen voisi tulla esimerkiksi ohjaussäteen vastaanotin, mutta yleisesti menetelmä toimii tutkia tai tietoliikennelaitteistoa, kuten linkkejä, vastaan. Päästökaistalla vaikuttaminen perustuu siihen, että ase on asetettu samalle taajuudelle kuin vastaanottava antenni (kohteen päästökaista). Koska antenni on erityisen herkkä vastaanottamaan juuri kyseistä säteilyä, se vahvistaa aseensa lähettämää säteilyä tehostaen tuho vaikutusta. Säde lamauttaa kohteen virtapiirejä, tai jos teho on riittävän suuri, jopa polttaa kohteen johdotuksia ja komponentteja. [9, s. 244-249]

Kun toimitaan päästökaistan ulkopuolella kohteen taajuutta tai aallonpituutta ei ole tiedossa tai sitä ei voida aseeseen asettaa. Tällöin vaikutetaan edelleen suoralla kytkeytymisellä, mutta tehoa tarvitaan enemmän kuin päästökaistalle vaikutettaessa, sillä kohteen antenni ei ole aseenn käyttämälle taajuudelle yhtä herkkä. Vaikutus on samankaltainen kuin vaikkapa salamaniskun aiheuttaman virtapiikin aiheuttama laitteiston hajoaminen. Luonnollisesti salamaa vastaavaa energiamäärää ei ole mahdollista, tai edes tarpeellista käyttää, koska sähkömagneettinen pulssi on lähetetty suoraan kohteeseen. Salaman vaikutus puolestaan leviää huomattavasti suuremmalle alueelle. [9, s. 250]

Epäsuora kytkeytyminen perustuu energian absorboitumiseen lennokin runkoa tai komponentteja pitkin sen herkempiin osiin, hyödyntäen kuitenkin läpivientejä tai mahdollisia rungon saumakohtia. Epäsuora kytkeytyminen vaatii suoraan kytkeytymistä suuremman energiamäärän, sillä siinä vaikutetaan suoraan kohteen komponentteihin, mutta ei voida hyödyntää kohteen antennia vahvistavana elementtinä. [22]

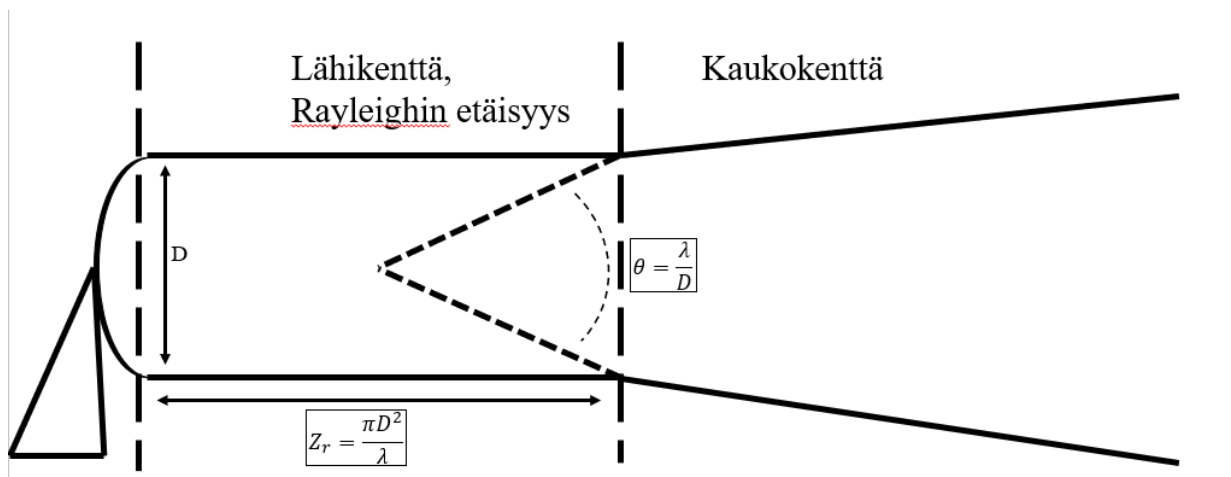


Kuva 9. Suunnatun energian aseiden vaikutusmenetelmät

Mikäli mikroaallolla pyritään vaikuttamaan epäsuorasti, kohteen on oltava käytännössä suojaton. Suojautuminen ei välttämättä edellytä edes tarkoitukseen kehiteltyä HPM-suojaa, vaan jo yksinkertainen metallilevy pysäyttää mikroaallon etenemisen. Epäsuoraan kytkeytymiseen tarvitaankin usein jonkinlainen aukko tai läpivienti, jonka kautta mikroaallolla päästään vaikuttamaan kohteessa oleviin sähköjohtoihin ja virtapiireihin. [9, s. 250]

Torjuttaessa pieniä kaupallisia lennokkeja voidaan käyttää joko suoraa tai epäsuoraa kytkeytymistä, sillä kohteen ohut ja usein muovista valmistettu ulkokuori ei tarjoa minkäänlaista suojaa sähkömagneettista pulssia vastaan. Suoran kytkeytymisen kannalta on hyvä, että suuri osa kaupallisista lennokeista toimii samalla taajuusalueella. Lisäksi on mahdollista selvittää nämä taajuudet julkisista lähteistä ja rakentaa ase toimimaan kohdejärjestelmän taajuudella. Haasteeksi tässä muodostuu se, että kaikkia mikroaaltoaseiden parametrejä ei voida muuttaa jälkeenpäin. Esimerkiksi se, onko ase laajakaistainen vai toimiiko se pistetaajuudella, on mahdollista säätää vain pulssinmuodostusmenetelmää vaihtamalla. Tämä taas edellyttää koko laitteen toimintaperiaatteen vaihtamista. [15, s. 8]

Kuten laseraseet, myös mikroaaltoaseet toimivat lähi-, sekä kaukokentässä. Suurimpana erona laseraseeseen lienee se, että mikroaaltoaseen säteily pysyy kollimoituneena koko lähikentän matkan. Tässä tapauksessa säteen intensiteetti säilyy siis samana antennista Rayleighin etäisyyden päähän, jonka jälkeen säde taittuu ja divergenssi kasvaa matkan pidentyessä. Koska aseista pyritään tekemään mahdollisimman energiataloudellisia, on edullisinta vaikuttaa kohteeseen lähikenttää hyödyntämällä. [9, s. 213] Kuvassa 10 on periaatteellinen esitys mikroaaltoaseen säteen etenemisestä lähi- ja kaukokentässä.



Kuva 10. Mikroaaltoaseen lähi- ja kaukokenttä. Kuvassa D tarkoittaa lähettävän antennin halkaisijaa, Z_r tarkoittaa Rayleighin etäisyyttä, λ tarkoittaa mikroaaltosäteiden aallonpituutta ja θ divergenssiä.

2.4.1. Mikroaaltoaseiden nykyhetki ja tulevaisuuden näkymät

Tässä luvussa esitellään viimeisimpiä mikroaaltoaseita, jotka ovat edenneet julkisuuteen joko suunnitelman tai prototyypin asteella. Erilaisia mikroaaltoon perustuvia ohjusjärjestelmiä on myös kehitteillä, esimerkiksi Boeingin valmistama CHAMP (Counter-Electronics High Power Microwave Advanced Missile Project). CHAMP perustuu risteilyohjuksiin, joissa on hyötykuormana elektroniikkaa tuhoava mikroaaltoase. [66] Ohjuksia ei tarkastella tässä tutkimuksessa tämän enempää sen ollessa enemmän hyökkäyksellinen, kuin kohteen suojaamiseen tarkoitettu ase.

THOR

THOR (Tactical High Power Microwave Operational Responder) on Yhdysvaltain ilmavoimille valmistettu prototyyppi, jolla on suoritettu testejä Afrikassa joulukuussa 2020. Ilmavoimien johtavan tutkijan Richard Josephin mukaan laite toimi testeissä erinomaisesti. THOR on tarkoitettu kiinteiden tukikohtien suojaamiseen lennokkiparvien hyökkäyksiä vastaan. Laite asennetaan merikontteihin, joten se on kohtuullisen helposti siirrettävissä tukikohdasta toiseen. [67] Järjestelmästä julkaistujen videoiden ja uutisartikkeleiden perusteella THOR lähettää niin voimakkaita suurtehomikroaaltopulsseja, että kohteena olevan järjestelmän elektroniikka tuhoutuu ja lennokit putoavat. Valmistajan mukaan THOR on onnistunut testeissä pudottamaan satoja lennokkeja kerrallaan tai ainakin lyhyen ajan sisällä. [68]

Yhdysvaltain Puolustusministeriö on lisäksi tilannut Ilmavoimien tutkimuslaitokselta (The Air Force Research Laboratory) uuden, lennokkiparvien torjuntaan tarkoitetun, suorituskyvyn. Uuteen järjestelmään tähtäävä hanke on nimeltään Mjöltnir ja sen on määrä tuottaa suorituskyky, joka on vähintään samalla tasolla kuin THOR. [69] Ilmavoimien tutkimuslaitoksen tiedotteen mukaan tavoitteena on saada prototyyppi valmiiksi vuoteen 2023 mennessä [70].



Kuva 11. THOR [70]

EPIRUS: Leonidas

Nuori Yhdysvaltalaisyritys, Epirus, on kehittänyt prototyypin suurtehomikroaaltoaseesta, jolle se on antanut nimeksi Leonidas. Uusi ase on rakennettu tavallisen kaksiakselisen perävaunun päälle, joten se on huomattavasti kevyempi ja helpommin liikuteltava kuin esimerkiksi THOR. Lisäksi Leonidaksen käyttöönotto on valmistajan mukaan yksinkertaista eikä vie kuin joitakin minuutteja. Tästäkään järjestelmästä valmistaja ei ilmoita tarkkoja teknisiä yksityiskohtia, kuten tehoa tai tehokasta kantamaa. Järjestelmää kuitenkin testattiin hyvällä menestyksellä vuonna 2021 Yhdysvaltalaisen viranomaisten ja median läsnäollessa, testien perusteella Leonidas kykeni pudottamaan koko 66 lennokin muodostaman parven kerralla. Lisäksi järjestelmällä on mahdollista tuhota yksittäisiä lennokkeja pienelle alueelle kohdistetulla säteellä. Valmistaja mainostaa tuotensa olevan tehokas ensisijaisesti lennokkiparvien torjuntaan, mutta korostaa myös mahdollisuutta tarkkoihin yksittäisiin pudotuksiin. [71; 72] Epirus on lisäksi yhdistänyt voimansa General Dynamicsin kanssa ja yritykset suunnittelevat yhdessä täydennystä Yhdysvaltain maavoimien lennokkien torjuntakykyyn. Stryker – taisteluajoneuvon alustalle rakennetun DE M-SHORAD -laseraseen lisäksi maavoimat on tilannut vastaavanlaisen kokoonpanon, mutta laseraseen tilalle asennetaan Leonidas-järjestelmä. Tavoitteena on saavuttaa kyky tuhota yksittäisiä lennokkiuhkia laserilla ja lennokkiparvien hyökkäyksiä mikroaalloilla. [73; 74]

Järjestelmän tiedoista tai testeistä julkaistusta videosta ei selviä, perustuuko laitteen toiminta suoraan vai epäsuoraan kytkeytymiseen tai toimiiko se päästökaistalla vai sen ulkopuolella. Videolla nähdään lennokkien putoavan hallitsemattomasti maahan säteen laukaisun jälkeen, mutta siitä ei käy ilmi, johtuuko lennokkien putoaminen niiden sisäisen elektroniikan vaurioitumisesta, ohjaussignaalin katkaisemisesta, lennättäjän tekemästä toimenpiteestä vai jostakin muusta tapahtumasta. Järjestelmän pieni koko rajoittaa sekä sen tehoa että mahdollisuutta varastoida energiaa useampaa laukausta varten. Toisaalta videolta ei selviä myöskään lennokkien etäisyys aseesta, joten sen perusteella ei voida tehdä varmaa päätelmää aseiden toimintatavoista. Järjestelmän suorituskykyyn onkin syytä suhtautua varauksella, sillä järjestelmän toiminnasta ei ole saatavilla muuta näyttöä kuin järjestelmää valmistavan yrityksen oma mainosvideo.



Kuva 12. Leonidas [72]

Raytheon: Phaser

Kuten aikaisemmatkin mikroaaltoaseet, myös Raytheonin valmistama Phaser on suunniteltu toimimaan lennokkiparvien muodostamaa uhkaa vastaan, mutta sillä voidaan tuhota myös yksittäinen lennokki. [75] Yhdysvaltain ilmavoimat maksoi 2019 16,2 miljoonaa dollaria Phaserin prototyypistä. Phaserin toiminta perustuu lennokkien häirintään tai niiden elektroniikan vaurioittamiseen mikroaaltopulsseilla ja se kykenee torjumaan kokonaisen lennokkiparven keralla. Laite on rakennettu 6 metrin pituiseen konttiin ja se on liikutettavissa kuorma-autolla tai lentokoneella toiminta-alueelle. [76]



Kuva 13. Phaser [75]

3. TOIMINTAYMPÄRISTÖ

Tämä luku käsittelee tutkimuksessa käsiteltävän ilmiön mukaista toimintaympäristöä ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Muuttumattomana ja olosuhteista riippumattomana osana toimintaympäristöä esitellään kiinteä kohde ja sen erityispiirteet. Muuttuvat tai tilanneriippuvaiset elementit toimintaympäristössä ovat lennokit sekä normaaliolojen aiheuttamat rajoitteet ja mahdollisuudet. Suuri osa normaaliolojen aiheuttamista rajoitteista on voimassa myös kriisitilanteessa tai sodan aikana, mutta esimerkiksi voimassa oleviin lakeihin voi tulla muutoksia ja sotatilanteessa turvallisuusasioissa lennokin torjunnan aiheuttamat riskit ovat pienempiä kuin torjumatta jättämisen aiheuttamat riskit Puolustusvoimien henkilöstölle ja kalustolle.

3.1. Kiinteä kohde

Ensimmäinen suojattava kohde on Santahaminan saarella sijaitseva Maanpuolustuskorkeakoulun päärakennus, joka on merkitty kuvaan 14 punaisella tähdellä. Maanpuolustuskorkeakoulun päärakennus valittiin tämän tutkimuksen kohteeksi, sillä se on selkeä yksittäinen kohde, johon vaikuttamiseen lennokit olisivat erityisen käyttökelpoisia. Rakennus sijaitsee peitteisellä saarella, joten siihen ei ole suoraa näkyvyyttä mistään suunnasta saaren ulkopuolelta. Näin tiedustelua, tai muuta vaikuttamista olisi vaikea suunnata kohteelle saapumatta itse saarelle tai toimimatta ilmasta käsin. Santahaminaan on vain yksi maayhteys Hevossalmen sillan kautta ja kyseinen silta on vartioituna kaikkina aikoina.



Kuva 14. Maanpuolustuskorkeakoulun päärakennus

3.2. Pienet miehittämättömät ilma-alukset

Miehittämättömien ilma-alusten luokitteluun on monia taulukoita ja määritelmiä, riippuen luokittelun tarkoituksesta. Eri luokittelujärjestelmät poikkeavat toisistaan lähinnä nimeämisperiaatteiden osalta, mutta myös kriteeristö vaihtelee hieman, erityisesti lentoonläh- tömassojen osalta. Suomen ilmailulaissa on määritelty miehittämätön ilma-alus seuraavasti: ”ilma-alus, joka toimii tai jonka on tarkoitus toimia itsenäisesti tai jota voidaan kauko-ohjata ilman ilma-aluksessa olevaa ohjaajaa” [77, § 2]. Tämän lisäksi Liikenne- ja viestintäviraston Traficom in mukaan miehittämättömät ilma-alukset on usein varusteltu jotain tiettyä tehtävää, kuten valo- kuvaamista, varten. Sen sijaan Traficom in mukaan lennokilla tarkoitetaan ”harrastus- ja urhei- lutarkoituksessa käytettäviä, ilman ohjaajaa ilmassa liikkuvia laitteita. Lennokit voivat olla joko kauko-ohjattuja tai autonomisia.” [78] Edellä mainitut määritelmät ovat laiveita, joten tässä tut- kimuksessa käytetään termiä lennokki kuvaamaan sekä Traficom in tarkoittamia miehittämättö- miä ilma-aluksia, että lennokkeja.

Euroopan Unionin alueella astui 31.12.2020 voimaan uusi droneasetus, joka velvoittaa lennät- täjät rekisteröitymään dronetoimijarekisteriin ja suorittamaan verkkotentti laitetta lennättääk- seen. Rekisteröinnistä on vapautettu vain alle 250 grammaa painavat lennokit sekä alle 1 kg painavat siimalennokit. Euroopan Unionin asetuksen yhteydessä on luotu taulukon 1 mukainen lennokkien luokittelu. [79] Tämän luokittelun mukaiset A3-luokan lennokit vastaavat Suomen sotilasilmailumääräysten luokittelun mukaista luokan 1 sotilaslentolaitetta, joiden lentoonläh- tömassa saa olla enintään 25 kg. [80]

Taulukko 1. EU:n lennokkiluokittelu [79]

Kategoria	Avoim A1	Avoim A2	Avoim A3
CE-merkinnät	C0 ja C1	C2	C2, C3 ja C4
Maksimipaino	900 grammaa	4 kg	25 kg
Rajoitukset	Lentäminen sallittu yksittäisten ihmisten yli, mutta ei ihmisjoukkojen päällä UAS-ilmatilavyöhykkeet tulee huomioida	Lentäminen sallittu turvallisella etäisyydellä ihmisistä UAS-ilmatilavyöhykkeet tulee huomioida	Lentäminen sallittu kaukana ihmisistä ja asutuksesta UAS-ilmatilavyöhykkeet tulee huomioida
Koulutusvaatimus	Yli 250 gramman laitteen kauko-ohjaajan tulee olla suorittanut verkkotentti	Verkkotentti ja valvottu lisäteoriakoe	Verkkotentti

Usein lennokkien kokoluokista puhuttaessa viitataan Naton (North Atlantic Treaty Organization) luokitteluun, joka on kuvattu taulukkoon 2. On huomattavaa, että lennokit on jaettu vain kolmeen pääluokkaan, jolloin luokkien sisälle mahtuu valtava määrä erilaisia lennokkeja. Luokka 1 sisältää niin paljon kaupallisia ja sotilaallisia lennokkeja, että se on jaettu lisäksi neljään pienempään alaluokkaan. Taulukossa 2 on Naton luokittelun lisäksi Iso-Britannian sotilas-ilmailuviranomaisen Military Aviation Authority (MAA) luokittelu, jossa noudatetaan Naton luokittelun mukaisia painorajoja. [81, s. 18]

Taulukko 2. NATO:n ja Iso-Britannian sotilasilmailuviranomaisen lennokkiluokittelu [81, s. 18]

Lento- lähtöpaino	Naton luokittelu	Yleinen luokittelu	MAA:n luokittelu
<200g	Luokka I <150kg	Nano	Luokka I(a)
200g – 20kg		Micro <2kg	Luokka I(b)
		Mini 2kg - 20kg	Luokka I(c)
20kg – 150kg		Pieni >20kg	Luokka I(d)
>150kg	Luokka II 150kg – 600kg	Taktinen >150kg	Luokka II
>600kg	Luokka III >600kg	Male*/Hale**/Strike***	Luokka III
*Medium-altitude long endurance - Keskikorkealla lentävä, operatiivisen tai strategisen tason lennokka ** High-altitude long endurance – Korkealla lentävä, operatiivisen tai strategisen tason lennokka *** Aseistettu ja taistelukykyinen lennokka			

Suomessa kaikkea radiotaajuuksien käyttöä ohjaa ja valvoo Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. Myös radio-ohjattujen lennokkien ja niiden kauko-ohjainten sisältämät lähettimet ja vastaanottimet luetaan radiolaitteiksi, jolloin niissä on käytettävä Traficomien määrittämiä taajuuksia. Lennokkeja lennätettäessä tarvitaan radiotaajuuksia ohjaussignaalin lähettämiseen ja vastaanottamiseen sekä hyötykuorman (yleisimmin kamera) käyttämiseen. Taulukkoon 3 on kirjattu lennokokäytössä olevat lailliset radiotaajuudet. Taulukon 3 mukaiset taajuudet ovat käytössä ainakin kaikissa Suomessa myytävissä lennokeissa, mutta kyseiset taajuudet ovat myös kansainvälisesti vapaita taajuuksia. On huomioitava, että luvanvaraisia taajuuksia käytettäessä on lupaa anoessa esitettävä hyväksyttävä käyttötarkoitus ja tällöinkin lupa on määräaikainen. [82]

Taulukko 3. Käytössä olevat radiotaajuudet [82]

	Lupavapaat taajuudet			Luvanvaraiset taajuudet
Kauko-ohjaus	2400,000 - 2483,500 MHz	5470,000 - 5725,000 MHz	5725,000 - 5875,000 MHz	5030 - 5091 MHz
Hyötykuorma	2400,000 - 2483,500 MHz	5470,000 - 5725,000 MHz	5725,000 - 5875,000 MHz	1320 MHz (vain videokuvalle)

Koska tutkimus käsittelee kaupallisia lennokkeja, Traficomien säädökset vaikuttavat lennokkien käytettävissä oleviin taajuuksiin. Kaikki tähän tutkimukseen valikoidut lennokit toimivat laillisilla taajuusalueilla eikä tutkimuksessa oteta huomioon mahdollisia lennokkien taajuusalueisiin tehtyjä muutostöitä. Koska lähes kaikki muut radiotaajuudet on määritelty johonkin muuhun käyttöön kuin lennokeille, ei olisi todennäköisesti edes mielekäästä siirtyä muille taajuusalueille. Muita taajuuksia käytettäessä saavuttaisi mahdollisen suojan puolustajan signaalitiedustelulta ja mahdollistaisi häirinnän väistämisen tai vaikeuttaisi ohjaussignaalin kaappaamista. Myös mikroaaltoaseen suoran kytkeytymisen väistäminen voi onnistua, mikäli käytettävä taajuus on riittävän kaukana aseiden käyttämästä taajuudesta. Mutta muuhun käyttöön tarkoitettujen radio-taajuuksien käyttäminen voi aiheuttaa häiriöitä ohjaussignaaliin, vaikeuttaen lennokin hallintaa.

3.3. Normaaliolojen aiheuttamat rajoitteet

3.3.1. Lainsäädäntö

Puolustusvoimista säädetyssä laissa mahdollistetaan lennokkien torjunta Puolustusvoimien alueen ulkopuolellakin, mikäli on todennäköistä, että lennokki vaarantaa maanpuolustusta tai aiheuttaa vaaraa Puolustusvoimien palveluksessa olevien turvallisuudelle [4, § 15]. Muussa tapauksessa torjuntaan täytyy saada virka-apua Poliisilta, Rajavartiolaitokselta tai Tullilta, riippuen alueesta ja rikosepäilyn laadusta. Lisäksi ilmailulain 11. §:n mukaan valtioneuvoston asetuksella tai liikenne- ja viestintäministeriön päätöksellä voidaan rajoittaa ilmailua tärkeiden kohteiden ja alueiden yläpuolella [77].

Suomessa säteilyn käyttöä valvoo sekä ohjeistaa Säteilyturvakeskus ja rajoittaa säteilylaki. Säteilylain rajoitetaan ionisoivan ja ionisoimattoman säteilyn altistusta. Tarkemmat raja-arvot löytyvät Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksesta 1045/2018, jossa kuitenkin todetaan, että raja-arvot ja rajoitukset eivät koske poliisin, rajavartiolaitoksen tai puolustusvoimien virkatehtävien hoitamiseen, rajaturvallisuuteen tai maanpuolustukseen liittyvän laitteiston käyttöä [83]. Säteilylain 161. §:n mukaan lyhytaikainen altistus optiselle säteilylle ei saa aiheuttaa kudovaurioita ja pitkäaikaisten terveyshaittojen on oltava mahdollisimman vähäisiä. Kuitenkin saman lain 175. §:ssä todetaan, että ”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.” Näin ollen, vaikka säteilyä valvotaan ja rajoitetaan tarkasti, on puolustusvoimilla kuitenkin jo nykyisellä lainsäädännöllä oikeus käyttää myös suurteholaseria tai -mikroaaltoa, mikäli se liittyy maanpuolustukseen. Lennokkien torjunta varuskunta-alueella suunnatun energian aseilla on siis Suomen lainsäädännön mukaan täysin mahdollista. [84]

Kansainvälisen humanitaarisen oikeuden (International Humanitarian Law) mukaan laseraseen käyttö on kiellettyä, mikäli ase on suunniteltu käytettäväksi ihmistä vastaan ja se aiheuttaa pysyvän sokeutumisen tai muulla tavalla kohtuutonta kärsimystä. Humanitaarinen oikeus ei kuitenkaan suoraan kiellä laseraseiden käyttöä yleisesti. Samalla tavalla asiaan suhtautuu kansainvälinen aselainsäädäntö (International Weapon Law), jonka mukaan pysyvään sokeuttamiseen tarkoitetut aseet on kielletty. Kumpikaan laki ei kuitenkaan kiellä käyttämästä asejärjestelmiä, joka kykenee sokeuttamaan tai aiheuttamaan muuta vahinkoa henkilöstölle, kunhan se ei ole aseeseen suunniteltu käyttötarkoitus. Tilapäiseen sokaisuun tarkoitetut laseraseet on sallittu aselainsäädännön mukaan. [85]

Mikäli joudutaan käyttämään sotilaallista voimaa lennokkia vastaan, on tärkeää huomioida laki puolustusvoimista ja siinä määritetyt rajoitteet. Koska lain mukaan lennokkien torjunnan aiheuttamat uhkat sivullisille on minimoitava [4, § 15], tarkastellaan seuraavassa luvussa suunnatun energian aseiden vaarallisuutta henkilöitä tai laitteita kohtaan.

3.3.2. Suunnatun energian aseiden vaikutus henkilöstölle

Suurten tehojen kohdistamisella yhteen pisteeseen, aiheutuu aina jonkinlainen riski sivullisten terveydelle. Säteilyturvakeskus on luokitellut Suomessa myytävät laserit niiden tehojen mukaisesti luokkiin taulukon 4 mukaisesti. Luokkiin 1-3B on määritelty suurin sallittu teho, joka on korkeimmillaan 500mW. Jo näinkin matalatehoiset laserit voivat olla silmälle vaarallisia, mutta käytännössä riskit ovat pieniä, koska silmän sulkeutumisrefleksi riittää suojaamaan silmää. Lisäksi osassa näiden luokkien lasereista sädettä on tarkoituksella levitetty, jolloin silmään ei kohdistu koko laserin teho. Luokan 4 lasereiden suurimmalle sallitulle teholle ei ole asetettu rajoitteita ja tähän luokkaan kuuluvat esimerkiksi laserkirurgiassa ja metallinleikkauksessa käytettävät suurteholaserit. [86]

Taulukko 4. Laserien turvallisuusluokittelu [86]

Laserluokka	Suurin sallittu teho	Käyttötarkoitus	Vaarallisuus
1	0,39mW	Lelut, tulostimet, CD- ja DVD-soittimet*	Vaaraton
1M	500mW**	Langaton tiedonsiirto	
1C	***	Ihon kosmeettinen käsittely	Ihovauriot mahdollisia
2	1mW	Viivakoodin lukijat	Silmävauriot mahdollisia
2M	500mW	Taso- tai suuntauslaserit	Silmävauriot mahdollisia
3R	5mW	Rakentamisen mittauksiin käytettävät laserit	Pysyvät silmävauriot mahdollisia
3B	500mW	Erilaiset tutkimukset	Silmävaurioita
4	Ei ylärajaa	Laserkirurgia, metallin leikkaus, yleisoesitykset	Silmä- ja ihovaurioita jopa hajaheijastuksesta

*Laser on suljetussa järjestelmässä, joten teho voi olla ylemmän luokan laserien mukaista.
 ** Säde on levinnyt tai sitä on levitetty optisesti. Altistumisrajat silmään tai iholle eivät ylity, vaikka tehoa onkin enemmän kuin luokan 1 lasereissa.
 *** Voivat sisältää suuritehoisen (luokan 3B tai 4) laserin, mutta laitteet on suunniteltu silmäturvallisiksi ja toimimaan vain suorassa kosketuksessa (contact).

Lennoikkien torjuntaan käytettävät laserit ovat luokan 4 lasereita, koska niissä on oltava käytännössä vähintään 10 kW tehoa. Lisäksi sotilaskäyttöön suunnitelluissa lasereissa säde on kohdistettu pieneen pisteeseen, jolloin se on erityisen vaarallinen silmälle. Näin tehokkaat laserit ovat silmien lisäksi vaarallisia myös iholle, sillä ne voivat aiheuttaa kudonvaurioita ja palovammoja jo lyhyenkin altistuksen seurauksena, jopa heijastuksena [86].

Suurtehomikroaaltoaseet aiheuttavat laserin tapaan haittaa sivullisille suuren tehonsa takia. Vuonna 2011 koillis-Aasiassa raportoitiin kuuden Yhdysvaltalaisotilaan saaneen terveydellisiä oireita, joiden epäiltiin johtuvan partion ajoneuvoon asennetusta häirintälähtimestä, jonka tarkoitus on estää tienvarsipommien laukaisu. Kyseisiä laukaisunestolaitteita on olemassa useilla valmistajilla, mutta niiden toimintaperiaatteet ovat hyvin samankaltaisia ja ne ovat pohjimmiltaan yksinkertaisia laitteita. Laitteet ovat ajoneuvoasenteisia ja ne sisältävät jonkinlaisen lähtimen ja antennin. Laite säteilee radio- tai mikroaaltotaajuudella olevaa sähkömagneettista säteilyä, joka muodostaa ajoneuvon ympärille ikään kuin kuplan, joka estää esimerkiksi matkapuhelinten toiminnan säteen vaikutusalueella. Säteilyllä estetään tienvarsipommien langaton laukaisu. Vaikka laitteiden tarkat tekniset tiedot ovat salaisia, niiden kantaman kerrotaan olevan noin 5 metriä. Näin ollen voidaan olettaa, että ne toimivat kohtuullisen matalalla teholla ja energiamäärällä. Kuuden sotilaan ryhmä raportoi kärsineensä partiotehtävänsä aikana pahoinvoinnista ja päänsärystä, lisäksi kahdella sotilaalla ilmeni tehtävän jälkeen selittämätöntä nenäverenvuotoa. Oireiden epäillään johtuneen viallisesta laukaisunestolaitteesta, joka on jostain syystä säteillyt ajoneuvoon sisälle. Oireet alkoivat noin puolen tunnin kuluttua siitä, kun laitteisto oli kytketty toimintaan. Huomionarvoista tapauksessa on se, että kukaan sotilaista ei ollut huomannut minkäänlaisia epätavanomaisia tuntemuksia, joista olisivat voineet päätellä altistuneensa vioittuneesta laukaisunestolaitteesta tulleelle säteilylle. [87]

Edellä kuvatussa tapauksessa säteilyn aiheuttamat vaikutukset olivat ohimeneviä, joten ne todennäköisesti eivät olisi kovin pitkäkestoisia myöskään lennokintorjuntaan tarkoitettulla asejärjestelmällä. Laukaisunestolaite oli ollut päällä koko tehtävän ajan, joten altistus oli pitkäkestoinen ja säteilyn määrä näin ollen suuri. Lennokin torjuntaan tarkoitettavalla aseella on oltava pidempi kantama, eli sen tehon on oltava suurempi. Mutta vastaavasti lennokin torjuntaa varten laitteen ei tarvitse säteillä kymmeniä minutteja kerrallaan, sitä käytetään vain torjunnan ajan. Näin ollen altistusaika on huomattavasti laukaisunestolaitetta lyhyempi, joten voidaan olettaa terveysvaikutusten olevan samankaltaisia. Lennokin torjunta-ase on oletettavasti suunnattavissa ja keskitettävissä haluttuun kohteeseen, jolloin sen aiheuttama hajasäteily ympäristöön on pienempää kuin ympärisäteilevällä häirintälähtimellä.

4. Kiinteän kohteen suojaaminen

Ilmatorjuntaoppaassa määritellään suojaaminen seuraavasti: ”Estetään ilmamaalien toiminta suojaattavaksi valittua toimintoa tai kohdetta vastaan aloittamalla tuli suurimmalta tehokkaalta ampumaetäisyydeltä.” [88, s. 36] Ilmatorjuntaoppaassa suojaamisella tarkoitetaan ilmatorjuntajoukoille käskettävää tehtävää, mutta tämän tutkimuksen viitekehyksessä määritelmää voidaan käyttää selventämään haluttua loppuasetelmaa suunnatun energian aseiden käytön jälkeen. Tämän tutkimuksen tarkoitus on selvittää miten suunnatun energian aseet soveltuvat kohteen suojaukseen.

Tutkimusongelmaan haetaan vastausta selvittämällä kahden erilaisen kohteen suojausmahdollisuuksia, joista toinen on Maanpuolustuskorkeakoulun päärakennus Santahaminassa ja toinen on koko Santahaminan varuskuntasaari. Kohteista mahdollisesti löytyviä kriittisiä suojaattavia yksityiskohtia ei ole tarkoitus tässä tutkimuksessa nostaa esille, vaan kohteita käytetään vain suurina kokonaisuuksina esimerkin omaisesti. Kohteen suojaamisen katsotaan onnistuneen, kun kaikki alueelle pyrkivät lennokit on pysäytetty ennen kuin ne ehtivät muodostaa uhkaa suojaattavalle kohteelle.

4.1. Tutkimuksen esimerkkilennokit



Kuva 16. DJI Air 2S [120]

Techradar-lehti arvioi DJI Air 2S -lennokin vuoden 2021 parhaaksi lennökkimalliksi [89]. Air 2S edustaa tässä tutkimuksessa NATO-luokittelun mukaista Micro-alaluokkaa sekä EU:n luokittelun A2-luokkaa ja lennokki onkin pienen kokonsa puolesta (vain 595 grammaa) hyvin käyttökelpoinen salassa tehtävään tiedusteluun. Kyseinen lennökkimalli on myös suomalaisen Verkkokauppa.com:n suosituin A2-luokan lennokki, joten se on hyvä esimerkki yleisesti käytössä olevasta pyöriväsiipisestä lennokista [90].



Kuva 17. DJI Matrice 300 RTK [91]

Matrice 300 RTK edustaa tutkimuksessa suuria multikopteri-tyylisiä lennokkeja. Tämä lennokki kuuluu EU:n dronesäädösten mukaan luokkaan A3, eli vastaavasti NATO-luokittelun mukaisesti se sisältyy Mini-kokoluokan lennokkeihin. Verkkokauppa.com:n ylivoimaisesti suosituin A3-luokan lennokki on tämän lennokin vanhempi malli Matrice 600 Pro, joskaan tämän luokan lennokeissa valikoimaa on A2-luokkaa huomattavasti vähemmän [92]. Kuitenkin Matrice 600 Pro on jo verrattain vanha malli, joten tähän tutkimukseen on otettu mukaan uudistettu Matrice 300 RTK. Tähän lennokkiin on mahdollista asentaa DJI:n omaa tuotantoa olevia, heidän uusinta kamerateknologiaansa edustavia kameroita. Lennokkiin voidaan asentaa esimerkiksi FLIR-lämpökamera.



Kuva 18. Parrot Disco [119]

Ranskalaisen Parrotin valmistama Disco on verkkokauppa Amazonin suosituimpia kiinteäsiipisiä kuvauslennokkeja [93]. Disco on luokiteltu leluksi eikä se kykene kantamaan lainkaan hyötykuormaa, mutta kameroidensa takia vastaavat lennokit voivat muodostaa uhan Puolustusvoimille. Tämä lennokkimalli kuuluu A2-luokan lennokkeihin. Parrot Disco -lennokkia ei enää valmisteta, mutta se on siitä huolimatta yksi suosituimmista myynnissä olevista kiinteäsiipisistä lennokeista omassa hintaluokassaan [94].



Kuva 19. Quantum Trinity F90+ [95]

Tutkimuksen ehdottomasti kallein ja täysin ammattimaiseen kartoittamiseen suunniteltu lennokka on A3-luokan lennokka Quantum Trinity F90+. Trinity F90+:n lentoonlähtöpaino on 5kg sisältäen hyötykuormaa 700g [96]. Tämä lennokka on suunniteltu kartoitustyöhön, joten sillä on pitkä lentoaika, siihen on saatavissa hyviä kameroita ja se voi nousta ja laskeutua ilman kiitotietä. Nämä ominaisuudet tekevät lennokista potentiaalisen myös tiedustelutarkoituksiin.

Taulukossa 5 on esitelty kaikkien luvussa esiteltyjen lennokkien tärkeimmät ominaisuudet. Taulukon tiedot perustuvat valmistajien ilmoittamiin lukemiin, joten erityisesti suorituskykyä kuvaaviin tietoihin on suhtauduttava varauksella. Suomen haastavissa sääolosuhteissa esimerkiksi lentomatkat voivat vaihdella ilmoitetuista hyvinkin paljon, etenkin kylmällä säällä.

Taulukko 5. Lennokkien ominaisuudet [96; 97; 98; 99; 100; 101]

	Suurin lentonopeus	Suurin etäisyys ohjaimesta	Lentomatka/-aika
Air2S	19 m/s	12 km	18,5 km / 31 min
Matrice 300 RTK	23 m/s	15 km	30 km / 43 min
Disco	22 m/s	2 km	45min
Trinity F90+	20m/s	7,5 km	100km/90min
	Pimeänäkökyky	Hyötykuorma	Ohjaussignaalin taajuus
Air2S	Ei	Ei	2,4GHz/5,8GHz
Matrice 300 RTK	Erillisellä kameralla	2,7 kg	5.725-5.850GHz/2.4-2.4835GHz
Disco	Ei	Ei	2.4GHz/5GHz
Trinity F90+	IR-kamera	700g	2.4GHz
	Massa	Kamera	Tiedonsiirtotaajuus
Air2S	595g	5472 x 3648 / 20 MP	2.4GHz
Matrice 300 RTK	6,3 kg	Zenmuse P1 50mm 45MP: 8192 x 5460	5.725-5.850GHz/2.4-2.4835GHz
Disco	750g	4096 x 3320 / 14 MP	2.4GHz/5GHz
Trinity F90+	4300g	Sony RX1R II: 7952 x 5304 / 42 MP	2.4GHz
	Lentokorkeus	Sensorin korkeus/leveys	Linssin polttoväli
Air2S	5000 m	1" = 8,8/13,2 mm	22 mm
Matrice 300 RTK	7000 m	24/35,9 mm	50 mm
Disco	Ei tiedossa	1/2,3" = 4,55/6,17 mm	1,8 mm
Trinity F90+	4500 m	24/35,9 mm	35 mm
	Koko (P x L x K)		
Air2S	Taitettuna: 180x97x77 Lentovalmiina: 183x253x77		
Matrice 300 RTK	Taitettuna: 430x420x430 Lentovalmiina: 810x670x430		
Disco	580x1150x120		
Trinity F90+	1480x2394x270		

4.2. Kiinteää kohdetta vastaan muodostuvat uhat

Lennokki tarvitsee lennättäjän sekä jonkinlaisen maa-aseman, josta lennokkia voidaan ohjata ja sen tuottamaa kuvaa seurata. Lennättäjä muodostaa uhkan toiminnalle vain välillisesti lennokin kautta, mutta suunnatun energian aseiden käyttöä lennättäjää vastaan ei ole selvitetty tässä tutkimuksessa. Lisäksi moderneja lennokkeja ei tarvitse lennättää aktiivisesti, vaan se voi lentää autonomisesti ennalta määritellyjä reittipisteitä seuraten [102, s. 5]. On huomioitava, että sotilasalueen yläpuolella lentävä lennokki ei aina ole liikkeellä vihamielisen tahon käskemällä tiedustelutehtävällä, vaan se voi olla alueella puhtaasti lennättäjän uteliaisuudesta tai tietämättömyydestä johtuen. Jos tällainen vahingossa alueelle eksynyt lennokki ammutaan ilmatorjuntaohjuksella alas, se on taloudellisesti ja julkisuuskuvan kannalta epäedullista. Nämä niin sanotusti harmittomatkin lennokit voivat kuitenkin aiheuttaa merkittävää vaaraa puolustusvoimille ja henkilöstölle, mikäli ne lentävät lentokieltoalueella. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom valvoo lennokkien käyttöä ja voi perustaa miehittämättömältä ilmailulta kiellettyjä UAS-ilmatilavyöhykkeitä ilmailulain 11. §:n osoittamille alueille, kuten Puolustusvoimien käytössä oleville alueille [77, § 11a]. Esimerkiksi lennokin riistäytyminen lennättäjän hallinnasta voi aiheuttaa sen syöksyn henkilöstön tai kaluston päälle, aiheuttaen vahinkoja. Lisäksi maavoimien helikoptereille aiheutuu vaaraa, mikäli ne törmäävät lennokkiin tai eivät uskalla lentää alueelle, jolla sellaisia ei pitäisi lentää ollenkaan. Vastaava ongelma on ollut useilla kaupallisilla lentokentillä, kun lennokki on lentänyt kentän alueella aiheuttaen vaurioita koneisiin tai häiriten lentoliikennettä [5, s. 14]. Edellä mainituista uhista voidaan puhua epäsuorina uhkina, sillä ne muodostuvat lennättäjän tarkoituseristä ja alueesta riippumatta.

Tarkoituksellisia tai suunniteltuja uhkia, eli suoria uhkia, ovat esimerkiksi tahallinen päälleajo tai lennokkiin kiinnitetyn hyötykuorman käyttö henkilöstön tai materiaalin vahingoittamiseen. Tällaisessa tarkoituksessa lennätettyjä lennokkeja on käytetty esimerkiksi lähi-idässä, jossa ISIS -järjestö on kiinnittänyt lennokkeihin kotitekoisia pommeja ja sen jälkeen lennättänyt lennokin väkijoukkoon tai muun kohteen lähelle ja räjäyttänyt pommin etäyhteydellä [5, s. 10]. Pommin lisäksi kaupallisia lennokkeja voidaan käyttää myös aselavettina erityyppisille aseille. Tämä asettaa vaatimuksia torjuntajärjestelmälle, sillä torjunta on kyettävä toteuttamaan jo hyvinkin kaukaa. [5, s. 16]

Lennokeja voidaan käyttää myös tietoverkkojen häirintään tai sotilaspoliisien kuormittamiseen, kun näiden on etsittävä lennättäjää lennokkihavainnon perusteella. Erittäin merkittävä uhka muodostuu kuitenkin lennokkien toteuttamasta tiedustelusta. Monissa lennokeissa on heti kaupasta ulos tuotuna tarkat kamerat ja niihin voidaan kiinnittää haluttuja laitteita, joilla voidaan tiedustella esimerkiksi radioverkkoja [5, s. 36]. Kameroissa käytettyjen optiikoiden ja kennojen ominaisuuksia rajoittaa luonnollisesti se, että niistä on tehtävä mahdollisimman pieniä ja kevyitä, jolloin lennokeissa ei voida käyttää kaikkein valovoimaisimpia kameroita. Kameroilla toteutettu visuaalinen tiedustelu on kenties kuitenkin yleisempää ja helpompaa. Tarkoituksena tällä tiedustelulla voi olla, perinteisen kohteen tiedustelun lisäksi, kerätä tietoa siitä, miten lennokki havaitaan ja mitä toimenpiteitä havainnointi aiheuttaa. Lennokeiden kehittyessä niistä tulee autonomisempia ja ne eivät välttämättä tarvitse jatkuvia ohjauskomentoja. Yksi mahdollinen uhkaskenaario voisi olla esimerkiksi varuskunnan yläpuolella itsenäisesti kaarteleva lennokki tai lennokkiparvi, johon olisi syötetty kasvojentunnistusohjelmaan tiettyjen avainhenkilöiden kasvot. Tällaiseen lennokkiin voidaan ohjelmoida toimenpiteet sen tunnistettua halutun henkilön. Se voi ottaa valokuvia, seurata henkilöä ja ilmoittaa olinpaikka tai vaikkapa toteuttaa pommi-isku henkilöä vastaan. Erityisen vaarallisia kaupallisista lennokeista tekee se, että ne ovat lähes kenen tahansa saatavilla ja niitä on mahdollista muokata halutunlaiseksi helposti ja edullisesti. [5]



Kuva 20. Lennokeiden äärikantamat

Tutkimuksen esimerkkilennokeista Trinity F90+ voi lentää jopa 90 minuutin ajan, mutta sen on kuitenkin pysyttävä 7,5 km päässä ohjaimesta. Sen sijaan Matrice 300 RTK:n suurin etäisyys ohjaimesta on jopa 15 km, joten sillä voidaan suorittaa tehtäviä tämän tutkimuksen lennokeista pisimmältä etäisyydeltä. Kuvaan 20 on piirretty kaaret, joiden sisäpuolelta lennättämisen on tapahduttava eri lennokkimalleilla. Kuvassa on havainnollistettu suuria etäisyyksiä ja lukuisia lennätyspaikkoja, joita kantaman sisäpuolella on. Matrice 300 RTK:n ja Air 2S:n osalta suurin mahdollinen lennätys-etäisyys ei tosin mahdollista sen paluuta lennätyspaikalle tehtävän suorittamisen jälkeen, sillä niiden koko kantama on käytetty pelkästään kohteelle lentämiseen ja sieltä poistumiseen eikä tehtävän suorittamiseen jää aikaa. Mikäli lennokka aiotaan uhrata kohteella, eikä sen ole tarkoituskaan palata, se voidaan kuitenkin lennättää kohteelle äärikantaman puitteissa.

Tässä tutkimuksessa luokitellaan lennokkien muodostamat uhat kolmeen luokkaan, joita ovat:

1. Tiedustelu päivä- tai yökameralla, 2. Epäsuorat uhat ja 3. Aseellinen vaikuttaminen.

4.2.1. Tiedustelu-uhka

Lennokeilla suoritetaan tiedustelua joko niihin kiinteästi asennetuilla sensoreilla tai lisäämällä niihin erilaisia sensoreita hyötykuormaksi. Esimerkkilennokeista hyötykuormaa on mahdollista lisätä vain kahteen ammattikäyttöön suunniteltuun lennokkiin, DJI:n Matrice 600 Pro- sekä Quantumin Trinity F90+ -malleihin. On kuitenkin huomioitava myös se, että kumpaankaan näistä lennokeista ei ole asennettu kiinteitä kameroita, eli mikäli mukaan halutaan sensori, ei lennokkiin juuri muuta hyötykuormaa saada mukaan.

Lennokkien tiedustelukyvyn määrittämiseen käytetään maanmittauksessakin hyödynnettyä GSD-laskentatapaa (Ground Sample Distance, maastopikselikoko). GSD:hen vaikuttavat kuvausetäisyys ja kameran ominaisuudet. GSD:llä tarkoitetaan kuvassa olevan yksittäisen pikselin kokoa luonnossa, esimerkiksi GSD-arvo 1 cm/px tarkoittaa, että kuvassa oleva yksi pikseli vastaa luonnossa 1 cm kokoista aluetta. [103] Toinen, yleisesti tiedustelussa ja ilmakuvauksessa käytettävien kameroiden tarkkuutta kuvaava mitta-asteikko on NIIRS (National Image Interpretability Rating Scales). Asteikko on 10-portainen (0-9), jossa 0 tarkoittaa tulkitsemiskelvotonta ja 9 tarkoittaa parasta mahdollista laatua ja tarkkuutta. NIIRS-asteikkoa käytetään kuvien luokittelussa ja se kuvaa kuvan luotettavuutta ja laatua. NIIRS asteikko on luonteeltaan subjektiivinen, eli tiedusteluun tai kuvien tulkintaan erikoistuneet henkilöt luokittelevat näkemänsä kuvan oikean luokan alle, mahdollistaen kuvan tarkemman tulkinnan tiedustelutarkoituksessa. Federation of American Scientists (FAS) on luonut taulukon, jonka avulla voidaan luokitella kuvat laskennallisesti oikeaan NIIRS-luokkaan GSD-arvon perusteella. [104]

Nykyaikaisissa kameroissa ei yleensä käytetä neliön muotoista kuvasuhdetta, vaan se on useimmiten 16:9 tai 4:3 (vaakapikselit:pystypikselit). Koska kuva on suorakaiteen muotoinen, on kameran GSD laskettava erikseen vaaka- ja pystysuunnassa. Laskemiseen tarvitaan seuraavia kaavoja:

$$GSD_k = \frac{\text{Lentokorkeus} \times \text{Sensorin korkeus}}{\text{Linssin polttoväli} \times \text{Kuvan korkeus}} \quad (5)$$

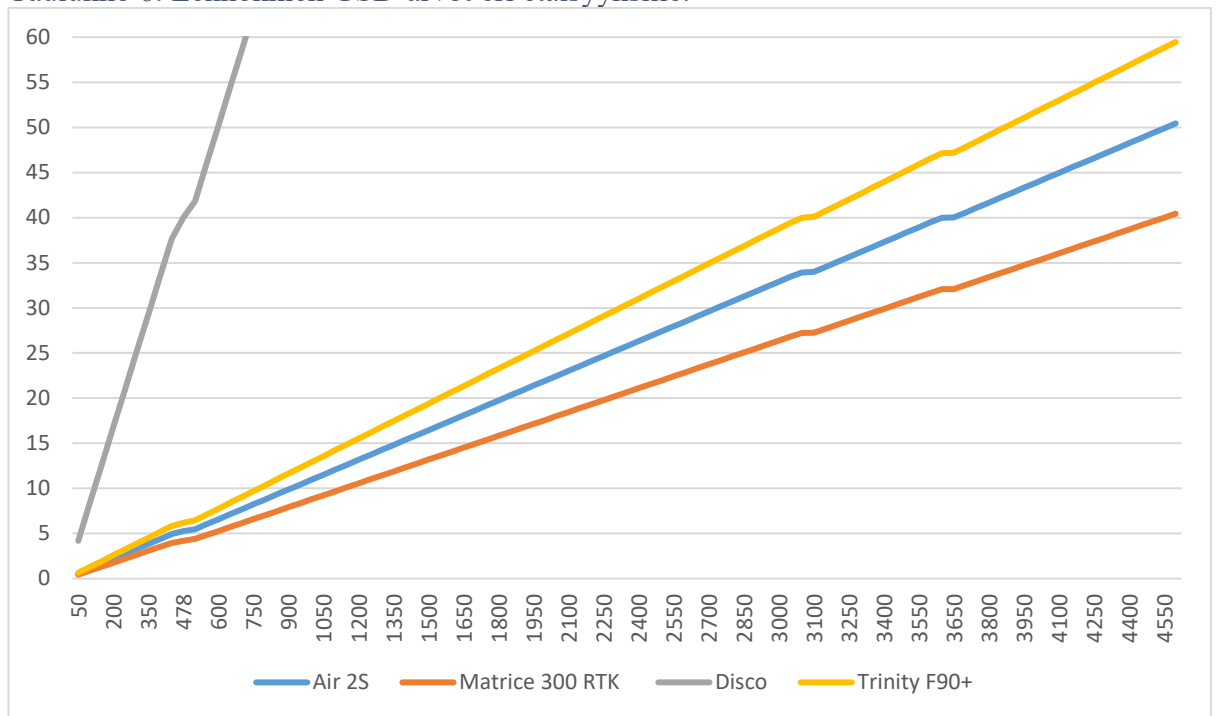
$$GSD_l = \frac{\text{Lentokorkeus} \times \text{Sensorin leveys}}{\text{Linssin polttoväli} \times \text{Kuvan leveys}} \quad (6)$$

Jossa GSD_k = Korkeussuuntainen GSD ja GSD_l = Leveyssuuntainen GSD

Kahdesta GSD-arvosta huonompi (eli suurempi arvo) on se, jota käytetään kuvaamaan lennokin tarkkuutta. [103]

Esimerkkilennokkien GSD-arvot on laskettu liitteen 1 excel-laskentataulukon avulla ja niistä on muodostettu taulukossa 6 näkyvä kuvaaja, joka havainnollistaa lennokkien kuvaamien kuvien tarkkuutta eri etäisyyksiltä. Tämän tutkimuksen liitteeseen 2 on GSD – NIIRS -vertailutaulukko, jonka perusteella lennokkien tuottaman kuvan tarkkuus on voitu mallintaa laskennallisesti. Koska suomalaisissa varuskunnissa oleva kalusto on löydettävissä julkisista lähteistä [105], oletettiin tässä tutkimuksessa tarkoitettun tiedustelun painopisteenä olevan yksityiskohdian tiedustelun, jolloin tarkkuudeksi ei riitä esimerkiksi automallin tunnistaminen. Näin ollen kuvan tarkkuuden on oltava vähintään tasoa NIIRS 7 (GSD alle 40 cm), jonka perusteella on laskettu suurimmat mahdolliset kuvausetäisyydet eri lennokkimalleille. Taulukon yksinkertaistamiseksi lennokeista on huomioitu vain niiden valokuvien ottamisen tarkkuus, sen ollessa kaikissa tapauksissa parempi kuin videokuvassa. Osa lennokeista kykenee kantamaan erilaista hyötykuormaa (DJI Matrice 300 RTK ja Quantum Trinity F90+), jolloin niiden tiedustelukykyä voidaan muokata suurestikin esimerkiksi valonvahvistimilla tai lämpökameroilla. Näihin lennokeihin on valittu valikoiman parhaisiin kuuluvat päiväkamerat, jotka on esitetty taulukossa 5. Matrice 300 RTK -lennokkiin on mahdollista erilaisten gimbaalien avulla kiinnittää myös tavallinen järjestelmäkamera laajentaen sensorivalikoimaa huomattavasti.

Taulukko 6. Lennokkien GSD-arvot eri etäisyyksille.



Laskennallisesti suurimmat tiedusteluetäisyydet saavutettiin DJI Matrice 300 RTK -mallin lennokilla, joka oli varustettu DJI:n omalla Zenmuse P1-kameralla 50 mm:n polttovälillä. Tällä yhdistelmällä tiedustelu on toteutettavissa jopa 4550 metrin etäisyydeltä. Odotetusti vertailtavista lennokeista huonoimman tuloksen saavutti Parrot Disco vain 478 metrin etäisyydellään. DJI Air 2S ja Quantum Trinity F90+ sijoituivat edellä mainittujen lennokkien väliin 3648 ja 3094 metrin tiedusteluetäisyyksillään. Nämä arvot ovat puhtaasti laskennallisia ja ne ottavat huomioon vain lennokissa olevan sensorin suorituskyvyn. Näihin lukemiin lennokit pääsevät vain kirkkaalla ja tuulettomalla säällä, jolloin sensorin on mahdollista pysyä paikoillaan, sen linssi ei huuru tai jäädy ja kohde näkyy selkeästi. Lennokkien muodostama tiedustelu-uhka ulottuu siis teoriassa taulukon osoittaman matkan päähän suojattavasta kohteesta kaikkiin suuntiin, myös suoraan ylöspäin.

Mikäli lennokilla halutaan esimerkiksi saada tyyppitunnistusta kalustosta tai tunnistaa henkilöitä tiedusteltavalta alueelta, on yläviistosta suoritettu kuvauslento varmin tapa toteuttaa tehtävä. Kuten Sampo Nurmio on omassa kenttäkokeessaan saanut selville, suoraan ylhäältä päin otetuista kuvista on vaikea tunnistaa henkilöitä tai kalustoa, sen sijaan hieman kauempaakin otettujen kuvien analysointi oli helpompaa, mikäli kuva otettiin sivusuunnalta, hieman yläviistosta. Toisaalta Nurmio toteaa kuitenkin kuvien tulkinnan vaikeusasteen olevan kiinni siitä, mitä halutaan saada aikaiseksi. [26, s. 66] Tiedustelua suorittava henkilö on todennäköisesti harjoitellut myös ylhäältä suoritettavaa kuvaamista ja kuvien tulkintaa. Lisäksi hänellä voi olla muitakin lähteitä, joiden avulla voi toteuttaa tunnistamisia, ja hän toteuttaa tiedustelua juuri sillä lentoprofiililla kuin hän kokee tarvitsevänsä. Näin ollen puolustajan on valmistauduttava siihen, että vihamielinen tiedustelija käyttää tiedustelukalustonsa koko suorituskykyä hyväkseen ja kuvaa myös äärikantamilta tarvittaessa.

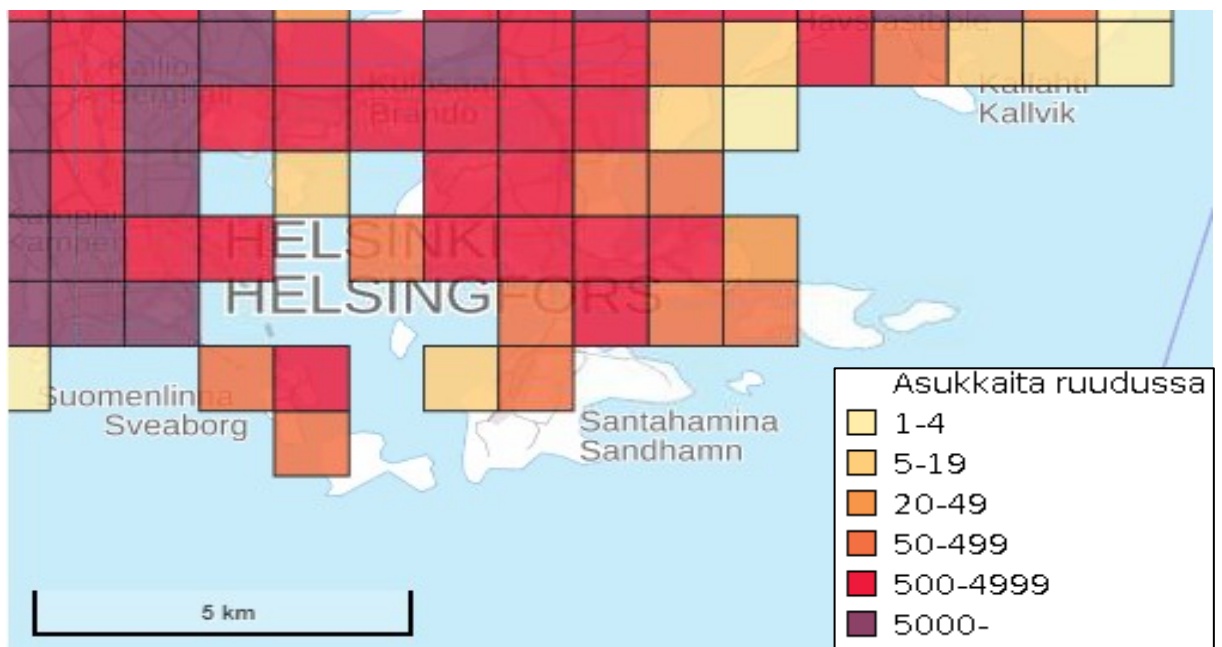
Tutkimuksessa suoritettujen laskelmien perusteella tiedustelu-uhka voi alkaa jopa 4550 metrin etäisyydeltä suojattavasta kohteesta. Näin pitkä tiedusteluetäisyys vaatii kuitenkin kookkaita ja kalliita, ammattikäyttöön suunniteltuja välineitä. Lisäksi kuvausmatkaan vaikuttavat sääolosuhteet ja suojaisan lennätyspaikan löytyminen lähialueelta. Kiinteäsiipiset lennokit ovat vaativampia lennätyspaikan ja laskeutumisalueen suhteen, esimerkiksi tässä tutkimuksessa mukana olevan Parrot Discon käyttöohjeen mukaan se tarvitsee laskeutumiseen vähintään 80 metrin levyisen ympyränmuotoisen alueen tai vähintään 50 metriä pitkän kiitotien, riippuen laskeutumistyylistä [101]. Käyttöohjeissa ei ole kuitenkaan eritelty, kuinka suuren alueen lennokit aidosti tarvitsee ja minkälaiset turvarajat tarvittavan alueen ympärille on muodostettu. Mikäli laitteella tiedustellaan Puolustusvoimien kohdetta ja rikotaan näin lakia, on oletettavaa, että lennättäjä ei muutenkaan noudata kaikkia turvallisuusrajoituksia ja saattaa lennättää pienemmältäkin alueelta.

Pyöriväsiipiset lennokit mahdollistavat useimmissa tapauksissa pystysuoran nousun ja laskeutumisen, joten niitä käyttämällä on helpompaa löytää huomaamattomampi lennätyspaikka. On kuitenkin myös poikkeuksia tästä säännöstä, sillä esimerkiksi Trinity F90+ on kiinteäsiipinen lennokki, joka voi nousta ja laskeutua pystysuoraan, hyvin pienellä alueella. Pyöriväsiipisten lennokkien etuihin lukeutuu myös se, että ne voivat nostaa huomattavasti enemmän hyötykuormaa kuin vastaavankokoiset kiinteäsiipiset lennokit roottorien aiheuttaman paremman nosteen ansiosta. Hyötykuormaksi voidaan siis asentaa erilaisia järjestelmä- tai videokameroita, jolloin kameran ominaisuuksilla on vain vähän rajoitteita. Toisin kuin monissa kiinteäsiipisissä lennokeissa (kuten Trinity F90+), joihin voidaan asentaa vain hyvin vähän järjestelmän ulkopuolista hyötykuormaa. On todennäköistä, että tiedustelua toteutetaan mieluummin pyöriväsiipisillä lennokeilla kuin kiinteäsiipisillä edellä mainittujen syiden takia. Toisaalta mikäli halutaan kuvata esimerkiksi puolustusvoimien harjoitusalueita tai muita suurempia alueita, Trinity F90+:n suurempi lentomatka ja -aika mahdollistaa suurten alueiden kartoituksen tehokkaasti. Luonnollisesti tällöin lennokin havaitsemisen ja vastatoimien mahdollisuus kasvavat huomattavasti.

Toisin kuin tiedustelua suorittavan tahon, puolustajan on noudatettava lakeja ja asetuksia toiminnassaan. Lailla puolustusvoimista on annettu oikeus puuttua lennokin kulkuun puolustusvoimien hallinnoiman alueen ulkopuolellakin, mikäli lennokki todennäköisesti vaarantaa maanpuolustusta tai puolustusvoimien palveluksessa olevien turvallisuutta [4, § 15a]. Vaikka lennokki havaittaisiin kilometrien päästä kohteesta, olisi äärimmäisen vaikea tietää milloin se suuntaa tiedustelua tai muita toimia puolustusvoimien suuntaan. Mikäli epäilyksiä vihamielisestä toiminnasta herää, onkin tehtävä virka-apupyyntö poliisille. Poliisilla on oikeus puuttua lennokin kulkuun, mikäli sen katsotaan vaarantavan sivullisia, mikä onkin tiheästi asutetun Helsingin alueella lennettäessä todennäköistä [106, § 11a].

4.2.2. Epäsuora uhka

Epäsuoralla uhalla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa lennokin aiheuttamaa uhkaa onnettomuus-tilanteessa tai muun toiminnan sivuvaikutuksena. Tämä uhkakuva korostuu erityisesti normaalioloissa, jolloin siviiliväestöä ei ole evakuoitu. Toisaalta epäsuora uhka on olemassa, vaikka lennokkia lennätettäisi täysin laillisesti ja sallitulla alueella, tai vaikka lennättäjä olisi puolustusvoimien henkilöstöä. Epäsuora uhka voi aiheutua esimerkiksi lennokin toimintahäiriöstä, radioverkon kuormittumisesta johtuvasta ohjaussignaalin katkeamisesta, törmäämisestä toiseen lennokkiin tai helikopteriin tai liian matalasta lentokorkeudesta johtuvasta törmäyksestä maassa olevaan kohteeseen. Nämä voivat olla puhtaasti vahinkoja, ja voivat tapahtua periaatteessa aina kun lennokka on ilmassa, oli sen lennättäjä kuka tahansa. Mikäli lennokka on kuitenkin muodostanut puolustusvoimille esimerkiksi edellisessä luvussa kuvatun tiedustelu-uhan, voi epäsuora uhka johtua puolustusvoimien tai poliisin toteuttamista vastatoimenpiteistä. Lennokin torjuntaa rajoittavana tekijänä voidaankin nähdä hyvin vahvasti siviiliväestö puolustusvoimien alueen ulkopuolella. Vaikka puolustusvoimat ei välttämättä aiheuta suunnatun energian aseilla samanlaista välitöntä uhkaa sivullisille, kuin konventionaalisilla asejärjestelmillä, tuhoutunut tai ohjaussignaalin menettänyt lennokka aiheuttaa kuitenkin kohtuullisen vaaran pudotessaan hallitsemattomasti.



Kuva 21. Väestötiheys Santahaminan lähialueella [107]

Kuvassa 21 on esitetty Santahaminan ja sen lähialueen väestötiheyttä ruudukolla, jonka koko on 1 km x 1 km. Uhkaan vastaamiseksi onkin torjuntaa suorittavan johtokeskuksen analysoitava riskit uhan mukaan. Kuten kuvasta 21 voidaan päätellä, siviiliväestön loukkaantumisen riski on suurimmillaan Santahaminan pohjoispuolella, Hevossalmen ja Jollaksen alueilla. Näillä alueilla asuu yli 500 ihmistä neliökilometrillä. Toisaalta myös itse Santahaminan saaren pohjoisosissa on kohtalaisen suuri väestötiheys ottaen huomioon, että kyseessä on suljettu sotilassaari. Torjunnan kannalta turvallisempia suuntia vaikuttaisivat olevan idän ja etelän suunnat, koska merelle pudotetun lennokin aiheuttamat vahingot sivullisille ovat epätodennäköisiä. Lännessä, lähimmillään noin 1700 metrin etäisyydellä sijaitsevalle Suomenlinnan saarelle pudonnut lennokki aiheuttaisi merkittävän uhan siviileille sekä saarelle asuvan väestön, että valtavan, päivittäisen turistimäärän takia.

Siviiliväestölle aiheutuvan uhan lisäksi lennokki muodostaa pudotessaan uhan myös Santahaminan sotilashenkilöstölle. Tämän lisäksi merkittävä uhka muodostuu lennokista, joka lentää, joko tahallisesti tai epähuomiossa, Ilmailulaissa tarkoitetulla UAS-lentokieltoalueella, tässä tapauksessa Santahaminan sotilasalueen yläpuolella. Vaikka lennokki pysyisi ohjaajansa hallinnassa eikä puolustusvoimat toimisi sitä vastaan, se muodostaa potentiaalisen uhan puolustusvoimien helikoptereille, jotka voivat toimia alueella. Mikäli lennokki lentää Euroopan Unionin droneasetuksen vastaisesti yli 120 metrin korkeudella, ei helikopterin lentäjä osaa odottaa sen lentävän alueella, jolloin onnettomuuden riski kasvaa. Lennokin ja helikopterin törmätessä toisiinsa ilmassa, voi helikopteri jopa pudota tai ainakin sille aiheutuu merkittäviä vahinkoja. Esimerkiksi Chilen laivaston helikopteri Bell UH-57B törmäsi tammikuussa 2021 toistaiseksi tuntemattoman lennättäjän lentämään DJI Mavic Air 2 -lennokkiin, aiheuttaen kyydissä olleen mekaanikon vakavan loukkaantumisen ja helikopterin tuulilasin rikkoutumisen [108].

Mikäli alkuperäinen uhka liittyy tiedusteluun, on mahdollista väistää uhka salaamisella ja harhauttamisella ja toteuttaa varsinainen torjunta vasta, kun lennokki on turvallista pudottaa. Toisaalta jos on viitteitä lennokin muodostamasta aseellisesta uhasta, on sen torjunnassa mahdollisesti otettava riski sivullisista uhreista, jotta voidaan suojata lennokin alkuperäistä kohdetta.

4.2.3. Aseellinen uhka

Aseellisella uhalla tarkoitetaan uhkaa, jossa lennokkiin on lisätty hyötykuormaksi väline tai laite, joka on tarkoitettu vahingoittamaan henkilöstöä tai kalustoa. Tällaisia laitteita voivat olla esimerkiksi lennokkiin kiinnitetty ampuma-ase, pommi tai teräase. Tähän uhkakategoriaan voidaan myös laskea kuuluvaksi niin sanottu itsemurhalennokki, jonka tarkoitus on törmätä esimerkiksi helikopteriin tai muuhun herkkään laitteeseen vaurioittaen sitä.

Esimerkiksi Afganistanin turvallisuusjoukoissa on rakennettu pommituskykyinen lennokki kiinnittämällä DJI Matrice 210-lennokkiin hyötykuormaksi putken, jonka avulla voidaan toimittaa käsikranaatti halutulle kohteelle [109]. Käsikranaattien pudotusmekanismin lisäksi lennokissa oli korkealaatuinen Zenmuse Z30 -kamera, joka mahdollistaa kohteen tunnistuksen suurella varmuudella [109]. Matrice 300 RTK-lennokin hyötykuorma on suurempi kuin vanhemmassa 210-mallissa, joten vastaavanlainen rakennelma olisi täysin mahdollinen uhka.

Ampuma-aseella varustettuja lennokkeja on olemassa joitakin, esimerkiksi Duke Roboticsin valmistama Tikad, joka on aseistettu konekiväärillä ja kranaatinheittimellä [110]. Tikad painaa noin 50 kg, joten se on tämä tutkimuksen lennokkeja huomattavasti suurempi, mutta on siitä huolimatta vielä Naton luokittelun mukaisesti luokan 1 lennokki. Toinen, Britannian armeijalle rakennettava esimerkki on Project i9, joka on tosin vasta prototyyppiasteella [111]. Tässä prototyyppissä on asennettu lennokkiin kaksipiippuinen haulikko laukaisulaitteineen. Laitteesta on julkisista lähteistä saatavilla vain vähän tietoa, mutta itse lennokki on varustettu kuudella propellilla ja se on leveydeltään noin yhden metrin kokoinen. Se on siis vain hieman suurempi kuin Matrice 300 RTK, mutta siinä on varmasti kahden lisäpropellin ansiosta suurempi nostovoima ja näin ollen mahdollisuus kantaa enemmän hyötykuormaa.

Aseellinen uhka on käytännössä poissuljettu uhka kahdella tutkimuksen lennokkijärjestelmällä, DJI Air2S ja Parrot Disco eivät nimittäin kykene valmistajien mukaan kantamaan lainkaan hyötykuormaa. Toisaalta esimerkiksi DJI Matrice 300 RTK on hyvin potentiaalinen lennokki erilaisten aseiden kuljetukseen 2,7 kilogramman hyötykuormallaan. Lisäksi Matrice 300 RTK on multikopteri-mallinen lennokki, joten se voi tarvittaessa lentää hitaasti tai jopa leijua vaanimassa maalitettua kohdetta. Esimerkiksi Beretan valmistama Ultraleggero on kevyt, vain 2,8 kg painoinen päällekkäispiippuinen haulikko [112], joten se voisi olla mahdollista massansa puolesta asentaa Matrice 300 RTK:n alle piippua lyhentämällä ja perän poistamalla. Näin multikopteri-tyyppisten lennokkien osalta uhka aseellisesta vaikuttamisesta on todellinen, vaikka ampumaetäisyys tai osumatarkkuus tällaisissa itsetehdyissä taistelulennokeissa eivät todennäköisesti kovin suuria olisikaan.

Kiinteäsiipisten lennokkien kyky kantaa hyötykuormaa on yleensä heikompi kuin vastaavan-kokoisissa multikopteri-tyyppisissä lennokeissa [113]. Tämän tutkimuksen kiinteäsiipisistä lennokeista suurempi, ammattikäyttöön tarkoitettu Quantum Trinity F90+ kykenee valmistajan mukaan kantamaan 700 gramman hyötykuorman. Tässä tapauksessa on kuitenkin huomioitava se, että lennokissa ei ole kiinteästi kameraa, joten siihen mahdollisesti kiinnitettävän aseensa lisäksi tarvitaan hyötykuormaksi jonkinlainen kamera tai muu tähtäystä helpottava apuväline. Kiinteäsiipiset lennokit eivät yleensä voi jäädä leijumaan paikalleen tähtäystä varten, mutta Trinity F90+ kykenee lentämään erittäin hitaasti ja jopa leijuntaan. Kuitenkaan huonon kantokyvyn vuoksi kiinteäsiipiset lennokit eivät ole potentiaalisia aseellisen uhan välineitä, poislukien mahdollisuus käyttää niitä itsemurhatehtävään multikoptereita suuremman nopeuden ansiosta.

4.3. Kiinteän kohteen suojaaminen suunnatun energian aseilla

Jotta kiinteä kohde saataisi suojattua onnistuneesti lennokkiuhkaa vastaan, on lennokkia vastaan toimittava ennen kuin se vaikuttaa kohteeseen. Kuten luvussa 4.2.1 todetaan, tiedusteluuhka voi suuntautua suojattavaa kohdetta vastaan jopa 4550 metrin etäisyydeltä. Näin ollen torjuntakehä on kyettävä ulottamaan vähintään saman etäisyyden päähän kohteesta. Pistemäisen kohteen (päärakennus) suojaamisen tapauksessa se tarkoittaisi, että asejärjestelmät on ryhmitettävä kohteen läheisyyteen ja niiden tehon on riitettävä lennokin tuhoamiseen tarpeeksi etäältä. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään kiinteän kohteen suojaamista laser- ja mikroaaltoaseilla.

4.3.1. Kiinteän kohteen suojaaminen laseraseilla

Lennokkien runkomateriaalina käytetään usein hiilikuitua sen jäykkyyden, vetolujuuden ja keveyden takia. Hiilikuidun korkean hinnan vuoksi erilaiset muovit, kuten polykarbonaatti ja akrylibutadieenistyreeni (ABS), ovat kuitenkin erittäin yleisiä materiaaleja, etenkin edullisemmissa, siviilikäyttöön suunnitelluissa, lennokeissa. Muita yleisiä runkomateriaaleja ovat metallit, kuten alumiini, sekä erilaiset seosmateriaalit. [26, s. 13; 114]

Kohteen tuhoaminen laseraseella vaatii käytännössä reiän polttamisen lennokin runkoon. Jotta lennokin runkoon muodostuu reikä, on kohdetta lämmitettävä niin kauan, että saavutetaan materiaalille ominainen sulamispiste. Sulamispisteen saavuttamisen jälkeen on jatkettava lämmittämistä, kunnes materiaali sulaa ja siihen näin muodostuu reikä. Jotta sulanut materiaali ei muodostaisi juotossaumaa ja näin tukkisi muodostunutta reikää, on lämmittämisen jatkettava, kunnes sula materiaali on höyrystynyt ja poistunut muodostuneesta aukosta. On tutkittu, että kun kohteeseen sulatetaan reikä, vakavilta vaurioilta ei voida välttyä, joten tässä tapauksessa kohde voidaan katsoa tuhoutuneeksi. Kohde todennäköisesti vaurioituu jo ennen rungon sulamispisteen saavuttamista, riippuen sen sisältämistä materiaaleista ja niiden lämmönkestävyydestä. [115, s. 10] Oletetaan kohteena olevan lennokin rungon materiaalivahvuudeksi noin 2 millimetriä. Lennokkien runkojen pienimpien mittojen perusteella on arvioitu, että halkaisijaltaan noin 25 millimetrin kokoiselle alueelle kohdistunut energia olisi riittävä tekemään vaurioita jokaiseen kohteeseen. Tällöin energian tarve lasketaan alueelle, jonka tilavuus on noin $\pi r^2 \times h = \pi \times (12,5 \text{ mm})^2 \times 2 \text{ mm} \approx 981,75 \text{ mm}^3$. Tässä tutkimuksessa arvo pyöristetään ylöspäin ja lasketaan yhden kuutiosenttimetrin sulattamiseen ja höyrystämiseen tarvittava energiamäärä eri materiaaleilla (muovi, alumiini ja hiilikuitu).

Aineen olomuodonmuutoksiin tarvittavia kaavoja ovat: Lämpötilanmuutokseen tarvittava energia

$$dE = mc dT \quad (7)$$

jossa dE on lämpömäärän muutos (J), m on massa (g), c on ominaislämpökapasiteetti (J/g°C) ja dT on lämpötilanmuutos (°C).

Aineen tiheys (g/cm³) $\rho = \frac{m}{V}$, josta saadaan johdettua aineen massa (g)

$$m = \rho V \quad (8)$$

jossa V on tilavuus (cm³).

Sulamiseen tarvittava lämpömäärä

$$Q_s = sm \quad (9)$$

jossa s on ominaissulamislämpö (J/g) ja m on massa (g).

Höyrystymiseen tarvittava lämpömäärä

$$Q_h = rm \quad (10)$$

jossa r on ominaishöyrystymislämpö ja m on massa.

Laskettaessa aineiden höyrystymiseen tarvittavaa lämpömäärää, on ensin laskettava lämpötilanmuutokseen tarvittava energia aineen sulamispisteeseen asti. Seuraavaksi lasketaan sulamispisteessä olevan aineen sulamiseen tarvittava lämpömäärä. Lisäksi on laskettava aineen lämpenemiseen tarvittava lämpömäärä sulamispisteestä höyrystymispisteeseen ja lopulta itse höyrystymisen vaatima lämpömäärä. Laskuissa on käytössä NTP-olosuhteet, eli kohteen lämpötila on 20°C.

Aineiden sulamiseen tarvittava kokonaislämpömäärä lasketaan kaavalla:

$$E_{yht} = dE_{sulaminen} + Q_s + dE_{höyrystyminen} + Q_h \quad (11)$$

$$\begin{aligned} E_{alumiini} &= mc \, dT + sm + mc \, dT + rm \\ &= 2,7 \, g \times 0,9 \frac{J}{g^\circ C} \times (660 - 20)^\circ C + 397 \frac{J}{g} \times 2,7 \, g \\ &\quad + 2,7 \, g \times 0,9 \frac{J}{g^\circ C} \times (2519 - 660)^\circ C \\ &\quad + 10\,900 \frac{J}{g} \times 2,7 \, g \\ &= 36\,574,47 \, J \approx 36 \, kJ \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} E_{hiilikuitu} &= mc \, dT + sm + mc \, dT + rm \\ &= 1,8 \, g \times 0,712 \frac{J}{g^\circ C} \times (3652 - 20)^\circ C + 17000 \frac{J}{g} \times 1,8 \, g \\ &\quad + 1,8 \, g \times 0,712 \frac{J}{g^\circ C} \times (4830 - 3652)^\circ C \\ &\quad + 50\,000 \frac{J}{g} \times 1,8 \, g \\ &= 126\,764,496 \, J \approx 127 \, kJ \end{aligned} \quad (13)$$

Polykarbonaatin ja akryylibutadieenistyreenin (ABS-muovi) osalta ominaissulamis-, ominaishöyrystymislämpöä tai kiehumispisteen lämpötilaa ei ollut tutkijan saatavilla. Kun verrataan saatavilla olevaa tietoa alumiinin ja hiilen ominaisuuksiin, voidaan todeta, että muovisten rakenteiden tuhoamiseen riittää huomattavasti pienempi lämpömäärä kuin alumiinisten tai hiilikuidusta valmistettujen. Lasketaan tarvittava energiamäärä muovien lämmittämiseen sulamispisteeseen:

$$E_{\text{Polykarbonaatti}} = mc dT = 1,2 \text{ g} * 2,1 \frac{\text{J}}{\text{g}^\circ\text{C}} * (166 - 20)^\circ\text{C} = 367,92 \text{ J} \quad (14)$$

$$E_{\text{ABS}} = mc dT = 1,05 \text{ g} * 2,1 \frac{\text{J}}{\text{g}^\circ\text{C}} * (97 - 20)^\circ\text{C} = 169,785 \text{ J} \quad (15)$$

Riippumatta laskennassa käytetystä ominaislämpökapasiteetista tulos osoittaa muovin sulattamisen vaativan merkittävästi vähemmän energiaa kuin alumiinin tai hiilikuidun sulattaminen.

Taulukko 7. Kiinteiden aineiden ominaisuuksia [116, 117]

Aine	Ominaislämpökapasiteetti (J/g°C)	Tiheys (g/cm ³)	Ominaissulamislämpö (J/g)	Ominaishöyrystymislämpö (J/g)	Sulamis piste (°C)	Kiehumis piste (°C)
Alumiini	0,9	2,7	397	10 900	660	2519
Hiilikuitu	0,712	1,8	17 000	50 000	3652	4830
Polykarbonaatti	2,1	1,2	N/E	N/E	166	N/E
ABS	2,1	1,05	N/E	N/E	97	N/E

Aikaisemmin todettiin, että energia kohdistetaan halkaisijaltaan 25 millimetrin kokoiselle alueelle, tämän alueen pinta-ala on $\pi r^2 = \pi \times (12,5 \text{ mm})^2 \approx 490,87 \text{ mm}^2$. Tämän ja aikaisempien laskujen perusteella on pääteltävissä, että kohdistettaessa energiaa noin viiden neliösenttimetrin kokoiselle alueelle, tarvittava energiamäärä on enimmillään 127 kJ, mikäli lennokin materiaali olisi puhdasta hiilikuitua. Kaupalliseen käyttöön tarkoitetuissa lennokeissa on kuitenkin hiilikuidun korkean hinnan vuoksi käytetty usein muovin ja hiilikuidun sekoitusta. Esimerkiksi DJI Matrice 300 RTK on suurelta osin muovia ja alumiinia, mutta roottorin lavat, laskutelineet ja roottorien tukivarret ovat hiilikuitua. Näin ollen alumiinin sulattamiseen tarvittava energia riittäisi kaikkien tämän tutkimuksen lennokkien tuhoamiseen. Huomattavasti pienempikin energia todennäköisesti riittäisi, sillä lennokin runko ei ole missään mallissa kokonaan alumiinia, vaan enimmäkseen muovia, todennäköisimmin polykarbonaattia tai ABS-muovia.

Liitteessä 3 on laskettu kohteeseen kohdistunut intensiteetti, tulokset ovat muodossa W/cm^2 . Liitteessä on otettu huomioon mahdollisten asejärjestelmien erilainen kyky pitää kohdetta vaikutuksen alaisena, joten taulukon intensiteetteihin on laskettu mukaan teho, joka on tuotettu yhden sekunnin pulssista aina 10 sekunnin pituiseen vaikutukseen asti. Arvioitiin, että tätä pidempää aikaa ei voida lennokkia ampua, sillä säteen täytyisi osua samaan pisteeseen koko laukaisutapahtuman ajan. Lennokkiin vaikuttaa tehtävän lisäksi ulkoiset olosuhteet (kuten sade ja tuuli), jotka pakottavat sen korjaamaan lentorataansa ja asentoaan, jolloin lennokka ei voi olla jatkuvasti samassa asennossa suhteessa asejärjestelmään.

Luvussa 2 on esitetty, että aallon intensiteetti pienenee vasta sen edetessä kaukokentässä, laseraseen tapauksessa intensiteetti on kohdistuspisteessä jopa suurempi kuin aivan laserlähteen vieressä. Näin ollen voidaan todeta, että mikäli laseraseessa on riittävästi tehoa tuottaa tuhoamisen vaatima intensiteetti aivan aseeseen viereen, teho riittää koko lähikentän alueelle. Liitteessä 3 on laskettu tarvittavien intensiteettien lisäksi myös materiaalin tuhoutumisen vaatimat lähtötehot eri materiaaleille. Laskuissa ei ole otettu huomioon ilmakehän ja sääolosuhteiden vaikutusta. Laskujen perusteella voidaan päätellä, että alumiinin ja muoviseosten osalta tarvittavat tehot ovat vielä varsin maltillisia, mikäli alumiinista lennokkia voidaan ampua yhden sekunnin ajan samaan pisteeseen, vaaditaan aseelta noin 37 kilowatin suuruinen teho. Kaupallisten, ja pienten sotilaallistenkin, lennokkien rungot ovat kuitenkin usein enimmäkseen muovia tai jotakin komposiittia, jolloin suuntaa antavasti voidaan todeta sekunnin pituisella pulssilla tarvittavan vain 200 – 400 wattia tehoa. Mikäli lennokin runko olisi puhdasta hiilikuitua, sen läpäisy vaatisi sekunnin mittaisella pulssilla jopa 130 kilowattia. Tällaisen tehon tuottaminen nykyaikaisilla järjestelmillä on täysin mahdollista, vaikka vaatiikin paljon energiaa aiheuttaen asejärjestelmän koon ja massan lisääntymistä. Toisaalta mikäli lennokkia voidaan ampua 10 sekunnin mittaisella pulssilla, tehoa ei tarvita enää kuin 12,7 kilowattia, jonka tuottamiseen riittääkin jo huomattavasti kevyempi ja pienempi järjestelmä. Todellisuudessa asia ei kuitenkaan ole näin yksinkertainen, sillä aikaisemmin mainittujen ilmakehän ja sään lisäksi torjuntaan vaikuttavat lennokin todelliset materiaalit sekä lennokin liikehdintä.

Koska kohteen tuhoutuminen vaatii suunnatun laseraseelta suurta intensiteettiä, on usein taloudellisinta ja tehokkainta toimia aseiden lähikentässä. Jotta lähikenttä ja Rayleighin etäisyys saataisi mahdollisimman suuriksi, on joko lisättävä lähettimen tehoa tai suurennettava aukkoa/antennia. Kummassakin tapauksessa laitteen koko kasvaa taisteluteknisestä näkökulmasta katsottuna liian suureksi. Tällöin voi olla helpompi toimia kaukokentässä, jolloin vaikutetaan vasta säteen divergenssin suurentuessa. Tällöin voidaan toimia kauemmas pienemmällä energialla ja antennilla, mutta luonnollisesti säteen intensiteetti pienenee, mitä kauemmas aseella vaikutetaan. [9, s. 102] Laseraseiden osalta lähikentässä pysyminen ei liene ongelma, sillä jos aukon halkaisija olisi esimerkiksi 1 metri ja lasersäteiden aallonpituus 0,63 mikrometriä (punainen valo), voidaan laskea lähikenttä kuvan 4 kaavan mukaan

$$\frac{D^2}{\lambda} = \frac{(1m)^2}{0,63 \times 10^{-6}m} = 1587301,587m \approx 1600km \quad (16)$$

Kaupallisissa lennokeissa käytetään monia materiaaleja, joista yleisimpiä ovat erilaiset muoviseokset ja kevytmetallit. Hiilikuitu on materiaalina arvokasta, joten sitä käytetään pääsääntöisesti osissa, joissa vaaditaan suurta jäykkyyttä. Esimerkiksi DJI Matrice 300 RTK:ssa hiilikuituisia osia ovat roottorit, roottorien tukivarret sekä laskutelineet. Hiilikuituisten osien tuhoaminen vaatii yli 100 kilojoulen energian, mutta lennokin muihin osiin riittää huomattavasti pienempi energia. Näin ollen on taloudellista ja yksinkertaista pyrkiä vaikuttamaan lennokin pehmeämpiin ja heikompiin osiin, jolloin asejärjestelmän ei tarvitse tuottaa satojen kilowattien tehoa, vaan pienempi teho riittää.

4.3.2. Kiinteän kohteen suojaaminen mikroaaltoaseella

Mikroaaltoaseen toimintaperiaatteen ollessa hyvin erilainen, ei vaikutuksen laskemiseen ole yhtä yksinkertaista tapaa kuin laseraseen tapauksessa. Mikroaaltoaseen osalta voidaan laskea lähi- ja kaukokenttien etäisyyksiä ja sen perusteella päätellä eri kokoisilla antenniratkaisuilla saavutettavaa kantamaa. Kuitenkaan tämä ei ole kohteen tuhoutumisen kannalta ainoa merkittävä tekijä. Aseiden tehoa lisäämällä voidaan tuottaa suurempi teho myös kohteen alueelle, riippumatta etäisyydestä. Mikroaaltoaseen vaikutus riippuu kuitenkin hyvin paljon myös kohteen yksilöllisistä ominaisuuksista ja sääolosuhteista, joten suoraviivainen tehon laskeminen ei tuota johtopäätösten tekemisen kannalta riittävän tarkkaa tietoa. On kuitenkin mahdollista laskea alla esitettyjen kaavojen avulla mikroaaltoaseiden käyttämän antennin halkaisija. Tässä alaluvussa esitettyjen laskujen perusteella voidaan todeta mikroaaltoaseen fyysisen koon kasvavan suureksi, mikäli aseella on kyettävä vaikuttamaan torjunnan kannalta riittävän etäälle kohteesta.

Mikroaaltoaseen osalta, mikäli antenni olisi 1 metrin kokoinen, voidaan laskea lähikentän pituus kuvan 10 kaavan mukaan, aallonpituuden ollessa 10 cm

$$Z_r = \frac{\pi D^2}{\lambda} = \frac{\pi(1m)^2}{0,1m} \approx 31,416m \quad (17)$$

Näin ollen mikroaaltoaseen kannalta tehokkaampaa olisi käyttää paljon suurempaa antennia, mutta yli 10 metrin kokoinen antenni ei kuitenkaan soveltuisi kuin kiinteästi asennettavaksi, ja siitä huolimatta se olisi haavoittuvainen sään ja vihollisen vaikutuksille. Lasketaan lähikenttä 10 metrin kokoiselle antennille 10 senttimetrin aallonpituudella

$$Z_r = \frac{\pi D^2}{\lambda} = \frac{\pi(10m)^2}{0,1m} \approx 3141,59m \quad (18)$$

Suuremmalla antennilla mikroaaltoaseen lähikenttä ylttäisi jo huomattavasti kauemmas, mutta toisaalta sillä ei vielääkään päästä lennokin mahdollisen tiedusteluetäisyyden päähän suojattavasta kohteesta. Lisäksi on huomioitava, että näissä laskukaavoissa ei ole otettu huomioon ilmakehän ja sääolosuhteiden vaikutusta, mikä luonnollisesti aiheuttaa tehohäviöitä ja säteen alkuperäisestä energiasta vain osa saadaan kohteelle asti, etenkin mikäli pyritään vaikuttamaan useiden kilometrien päähän. Mikroaaltoaseen tapauksessa tulisikin miettiä, olisiko ase tehokkaampi kaukokentässä toimittaessa, jolloin voidaan käyttää pienempää antennia. Mikäli antenni on esimerkiksi kymmenen metrin kokoinen, sen lähettämä säde on heti antennilta lähtiessään suurempi kuin kohde, johon sillä halutaan vaikuttaa. Näin aseelta vaaditaan paljon tehoa tuottaakseen riittävä vaikutus, sillä suuri osa säteestä suuntautuu ohi kohteesta jo lähikentässä, kaukokentässä vaikutus korostuu. Pienemmällä antennilla suurempi osa ammutusta pulssista osuu kohteeseen, jolloin energiaa ei mene ohi kohteesta.

Kiinteää kohdetta suojatessa aseiden suuri koko ei ole välttämättä ongelma, mutta mikäli halutaan aseiden olevan siirrettävissä ja että se voisi toimia jopa kiinteän sähköverkon ulkopuolella, on asia ratkaistava taktisilla ja taisteluteknisillä keinoilla. Maanpuolustuskorkeakoulun päärakenuksen tapauksessa olisi mahdollista siirtää asejärjestelmät Santahaminan ulkokehille ja levittää torjuntakehää näin suuremmaksi. Mutta koko Santahaminan saarta suojatessa aseita ei voida viedä siviilikäytössä olevalle alueelle lisäämiseksi, tai ainakaan sieltä alueelta ei voida vaikuttaa lennokkiin turvallisesti. Tässä tapauksessa siis todennäköisesti olisi turvauduttava poliisilta pyydettyyn virka-apuun lennokkien torjunnassa, mikäli aseiden teho ei riitä torjumaan lennokkeja kauempaa kuin ne kykenevät kuvaamaan kohdetta.

5. POHDINTA

5.1. Johtopäätökset

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää suunnatun energian aseiden käyttömahdollisuuksia pienten kaupallisten lennokkien torjunnassa normaalioloissa. Tässä kappaleessa vastataan tutkimuskysymyksiin ja esitetään johtopäätökset, joihin tulosten pohjalta on päästy. Suunnatun energian aseiden käyttöä pienten miehittämättömien ilma-alusten torjunnassa on kuitenkin vielä kysymyksiä, joihin tämä tutkimus ei antanut vastausta. Tutkimuksessa on kartoitettu mahdollisia ongelmakohtia tai mahdollisuuksia aseiden käytössä, jotta jatkotutkimuksen tekeminen olisi mielekkäämpää. Tutkimuksen tulokset ja lennokkien torjuntaan vaikuttavat tekijät on kuvattu liitteessä 5.

Päätutkimuskysymys oli: Miten suunnatun energian aseet soveltuvat kiinteän kohteen suojaamiseen pienten kaupallisten lennokkien muodostamaa uhkaa vastaan normaalioloissa?

Päätutkimuskysymykseen vastattiin neljän alatutkimuskysymyksen avulla. Seuraavaksi käsitellään jokainen alatutkimuskysymys ja niihin muodostuneet vastaukset.

1. Mitä ovat suunnatun energian aseet ja mitkä ovat niiden toimintaperiaatteet?

Tähän kysymykseen vastattiin luvussa 2. Suunnatun energian aseet. Tutkimusmenetelmänä käytettiin kirjallisuusselvitystä, jossa lähteinä olivat esimerkiksi P.E. Nielsenin kirja suunnatun energian aseista sekä George Bakerin sähkömagneettisten aseiden perusteista kertova kirja. Suunnatun energian aseiden pääajatus on suunnata suuri määrä energiaa haluttuun suuntaan ja vaikuttaa siten kohteeseen. Tässä tutkimuksessa käsittely rajattiin koskemaan vain yleisimpiä ja pitkälle kehittyneimpiä suunnatun energian aseita, suurteholasereita sekä -mikroaaltoaseita. Tutkimuksen ulkopuolelle jätettiin siis esimerkiksi ääneen perustuvat aseet.

Luvussa 2 käsiteltiin suunnatun energian aseiden toimintaperiaatteet siten, että painopiste oli vaikutusmekanismeissa, ei niinkään aseiden teknisissä yksityiskohdissa ja säteenmuodostamisessa.

Laseraseen toimintaperiaate perustuu koherenttiin ja kollimoituun valoon, joka kohdistetaan erittäin pienelle alueelle. Laservalon ominaisuuksiin kuuluu pieni divergenssi, joten valo pysyy hyvin koossa ja valtaosa aseelta lähetetystä energiasta saadaan toimitettua kohteeseen. Näin mahdollistetaan suuri intensiteetti ja kohteen materiaali kuumenee, kunnes siihen sulaa ja höyrystyy reikä. Laseraseen osalta toivottu tilanne olisi, jos kohteeseen vaikuttaminen tapahtuisi mahdollisimman lähellä linssin polttoväliä eli lähikentän alueella. Lähikentässä lasersäteen intensiteetti on suurimmillaan, säde alkaa hajota kaukokentän alueelle tullessa, jolloin säteen intensiteetti pienenee. Lisäksi osa lasersäteestä siroaa jo ennen polttovälin saavuttamista.

Mikroaaltoaseen vaikutusmekanismi voidaan jakaa suoraan- ja epäsuoraan kytkeytymiseen, joiden eroa on selvitetty luvussa 2. Suora kytkeytyminen perustuu kohteen sensoreiden kanssa samalla taajuudella (päästökaistalla) toimivaan mikroaaltopulssiin tai -pulsseihin, jotka aiheuttavat suuren jännitteen lennokin herkkiin elektroniin komponentteihin aiheuttaen niiden ylikuormittumisen ja vaurioitumisen. Päästökaistan ulkopuolinen suora kytkeytyminen perustuu kohteen antennin kykyyn vastaanottaa radiotaajuudella lähetettävää signaalia, tässä tapauksessa asean lähettämä signaali ei vain ole kohteen päästökaistalla, eli kohde ei ole erityisen herkkä juuri kyseiselle taajuudelle. Epäsuoralla kytkeytymisellä tarkoitetaan tapaa, jossa vaikutetaan lennokin elektroniin komponentteihin kohteen johdotuksia, saumoja ja läpivientejä hyväksikäyttäen. Epäsuoralla kytkeytymisellä pyritään siis vaikuttamaan herkkään elektroniikkaan ilman kohteen antennin hyödyntämistä.

2. Mitä uhkia pienistä kaupallisista lennokeista muodostuu?

Luvuissa 3 ja 4 on käsitelty pienten kaupallisten lennokkien muodostamaa uhkaa. Tutkimukseen on valittu neljä eri tyyppistä lennokkia, kaksi kiinteäsiipistä ja kaksi pyöriväsiipistä. Kiinteäsiipisiä lennokkeja edustivat edullinen ja suosittu Parrot Disco sekä ammattimaiseen kartoitustyöhön suunniteltu Quantum Trinity F90+. Pyöriväsiipisten lennokkien esimerkkimalleiksi puolestaan valittiin pienikokoinen DJI Air 2S sekä saman valmistajan kalliimpi malli Matrice 300 RTK. Lennokkien muodostamat uhkat arvioitiin maailmalla tapahtuneiden onnettomuuksien tai iskujen perusteella, jolloin päädyttiin jakamaan mahdolliset uhkakuvat kolmeen erilaiseen malliin: 1. Tiedustelu-uhka, 2. epäsuora uhka ja 3. aseellinen uhka. Uhkakuvat ovat numeroinnin mukaan todennäköisyysjärjestyksessä sillä aikaisempien tapahtumien valossa nimenomaan tiedustelu-uhka on Suomessa olevia kohteita vastaan todennäköisin ja aseellinen uhka ei ole kovinkaan todennäköinen normaalioloissa. Lennokkien aiheuttamiin uhkiin liittyvät rajoitteet on esitetty liitteessä 5.

Epäsuoran ja aseellisen uhan osalta vaikuttavuusetäisyyden arvioitiin olevan lyhyen, korkeintaan joitakin kymmeniä metrejä lennokista. Sen sijaan tiedustelu-uhan arvioitiin ulottuvan jopa 4550 metrin päähän kohteesta, joten suunnatun energian asean vaikutuskin täytyisi ulottaa näin kauas. Tiedustelu-uhan etäisyys selvitettiin laskemalla lennokkien sensorien perusteella suurin mahdollinen etäisyys, jolla maastopikselikoko (GSD, Ground Sample Distance) on vielä riittävän pieni, jotta lennokin ottamasta kuvasta voidaan erottaa ihminen. Tässä laskentatavassa ei kuitenkaan oteta huomioon sää- tai valaistusolosuhteita, joten lopputulokset ovat suuntaa antavia ja hyvinkin teoreettisia. Lopputuloksena voidaan kuitenkin todeta, että nykyaikaisilla lennokeilla voidaan valokuvata kohteita tarkasti useiden kilometrien etäisyydeltä. Tässä yhteydessä on huomioitava, että tiedustelu-uhan muodostama lennokki muodostaa aina samalla myös epäsuoran uhan, etenkin jos sitä vastaan käytetään voimakeinoja ja se putoaa asutulle alueelle. On myös vaikea ennustaa, milloin lennokki todellisuudessa muodostaa uhan Puolustusvoimille, mikäli se toimii pitkien etäisyyksien takaa. Puolustusvoimilla on oikeus puuttua lennokin kulkuun, mikäli se aiheuttaa uhan Puolustusvoimien kalustolle tai henkilöstölle, mutta on vaikeaa osoittaa aukottomasti lennokin muodostaneen tällaisen uhan, mikäli se ei lennä Puolustusvoimien alueen yläpuolella tai välittömässä läheisyydessä.

Tutkimuksessa ei ole otettu erillisenä uhkana huomioon lennokkiparven muodostamaa uhkaa ja mahdollisia autonomisia lennokkeja, jotka toimivat parvissa, mutta jokaisella lennokilla ei olekaan erillistä lennättäjää. Parveilu on kuitenkin osa lennokkien toimintaa ja se voidaan liittää jokaiseen edellä mainittuun uhkakuvaan, aiheuttaen lähinnä uhan moninkertaistumisen ja mahdollisuuden vaikuttaa useasta suunnasta samanaikaisesti. Parveilu asettaa lisävaatimuksia torjunta-asejärjestelmälle, mutta ne liittyvät lähinnä tulenjohto- ja maalinosoituskykyyn sekä aselavettien lukumäärään.

Tutkimuksen tulokset perustuvat esimerkkeinä olleiden lennokkien ominaisuuksiin, mutta ne on valittu siten, että otanta on mahdollisimman kattava. Etenkin tutkimuksen kalleimmat lennokit, Trinity F90+ sekä Matrice 300 RTK, ovat markkinoiden parhaita kaupallisia lennokkeja sensoreidensa ja ominaisuuksiensa osalta. Lennokkien rakentaminen ja etenkin parempien kameroiden asentaminen ei kuitenkaan ole vaikeaa, joten Puolustusvoimia vastaan voi suunnata suorituskykyisempiäkin kaupallisia lennokkeja.

3. Miten lennokki torjutaan suunnatun energian aseilla?

Tähän alatutkimuskysymykseen vastattiin luvuissa 2 ja 4. Suunnatun energian aseiden toimintaperiaatteet on selvitetty luvussa 2. Lennokkien torjuntamekanismit ja todennäköiset käyttötavat on esitelty alla.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kannattaako suunnatun energian aseita käyttää lennokkien tuhoamiseen tai torjuntaan vai tulisiko keskittyä kineettisen vaikuttamisen tai elektronisen häirinnän keinoihin. Elektronisella häirinnällä voidaan tarkoittaa esimerkiksi lennokin ohjaussäteen kaappaamista tai katkaisemista, jolloin lennokki voidaan pakottaa laskeutumaan halutulle alueelle. Vaihtoehtoisesti pienitehoista laserasetta voidaan käyttää sensorien sokaisemiseen, jolloin lennokki ei saa tietoa alueelta. Sokaisemisen onnistumista ja vaikutusta on kuitenkin vaikea arvioida, joten lennokin pudottaminen tai pakottaminen laskeutumaan on varmin keino toteuttaa torjunta. Toisaalta kaupallisten lennokkien elektroninen häirintä on todennäköisesti sotilaallista lennokkia helpompaa, sillä kaupallisista tuotteista on saatavilla huomattavasti enemmän teknistä tietoa, jota voidaan hyödyntää torjunnassa. Lisäksi tämän tutkimuksen tuloksia voidaan hyödyntää myös sotilaallisten lennokkien torjuntaan, sillä käytettäessä suuria energioita, ei kohteen ominaisuuksilla ole niin suurta merkitystä. Sotilaallisetkaan lennokit eivät ole pääsääntöisesti raskaasti panssaroituja, jolloin samoilla aseilla voidaan yhtä hyvin torjua kaupallinen, kuin sotilaallinenkin lennokki.

Laseraseen vaikutusmekanismi on kineettisten aseiden kaltainen, sillä se perustuu suuren energian kohdistamiseen lennokin runkoon ja sen läpäisemiseen. Tämä aiheuttaa lennokin putoamisen sen aerodynaamisten ominaisuuksien muuttumisen sekä suuren lämpömäärän aiheuttamien vaurioiden seurauksena. Laseria voidaan käyttää myös lennokin sensorien sokaisemiseen, mutta tämän voidaan todeta tutkimuksen perusteella epävarmaksi menetelmäksi. Sokaisemalla voidaan heikentää lennokin kykyä tiedustella kohdetta sekä kykyä osua tarkasti haluttuun kohteeseen. Lennokit voivat kuitenkin lentää myös satelliittipaikannusjärjestelmän avulla ilman visuaalista näköyhteyttä, joten torjunnan kannalta on varmempaa tuhota lennokki pudottamalla se taivaalta. Lennokin pudottamisajankohta ja -paikka on kyettävä valitsemaan siten, että kyettään estämään putoavan lennokin aiheuttamien lisävahinkojen syntyminen.

Mikroaaltoaseella lennokin torjunta ei välttämättä aiheuta lennokkiin mitään ulkoisesti havaittavia vaurioita. Lennokin tuhoutuminen johtuu kytkeytymistavasta riippumatta suuren virtapiikin aiheuttamasta herkkien elektronisten komponenttien vioittumisesta.

Mikäli mikroaltoaaseen ainoa käyttötarkoitus olisi kaupallisten lennokkien torjunnassa, kyseen tulisi suoraan kytkeytymiseen perustuva järjestelmä. Kaupallisten lennokkien käytössä olevat taajuudet ovat rajallisia ja ne on määritelty Euroopan unionin dronesäädöksissä. Näin mikroaltoaaseen parametrit voitaisi rakentaa vastaamaan kaupallisten lennokkien ominaisuuksia. Asejärjestelmiä suunnitellessa ja rakentaessa tavoitteena on kuitenkin useimmiten sotilaallisten suorituskykyjen torjunta, joten mikroaltoaaseenkin on kyettävä toimimaan muitakin kuin kaupallisia lennokkeja vastaan. Koska mikroaltoaaseen parametrien muuttaminen on monimutkaista, ei ole järkevää, että aseita valmistettaisi optimoituina kaupallisia lennokkeja vastaan. Siksi mikroaltoaaseiden todennäköisimmät käyttöperiaatteet perustuvat joko suoraan kytkeytymiseen päästökaistan ulkopuolelta tai epäsuoraan kytkeytymiseen. Erityisesti sotilaallisia lennokkeja vastaan epäsuora kytkeytyminen on varmin torjuntamenetelmä, vaikka se vaatiikin asejärjestelmältä suoraa kytkeytymistä suurempaa tehoa.

4. Mitä rajoitteita suunnatun energian aseiden käyttöön liittyy normaaliolojen toimintaympäristössä?

Luvussa 3.2 käsitellään suunnatun energian aseiden käyttöön liittyviä, erityisesti normaalioloissa ilmeneviä, rajoituksia. Tutkimuksen muissa osissa käsitellään suunnatun energian käyttöön liittyviä rajoituksia, jotka ovat riippumattomia poliittisesta tilanteesta. Suunnatun energian aseet ovat tavanomaisia asejärjestelmiä herkempiä sääolosuhteille, etenkin laseraseen käyttö muodostuu mahdottomaksi, mikäli kohteeseen ei ole suoraa näköyhteyttä esimerkiksi pilvikerroksen takia.

Normaalioloissa lennokkien torjuntaa rajoittaa eniten kansallinen lainsäädäntö, joka ei anna täysin vapaita käsiä torjunnan toteuttamiseen. Toisaalta puolustusvoimilla on oikeus puuttua toimintaansa uhkaavan lennokin kulkuun, mutta puolustusvoimien torjuntatoimet eivät saisi aiheuttaa riskiä sivullisten loukkaantumisesta. Näin ollen lennokin häirintä ja saattaminen turvallisesti laskeutumaan tai lennättäjän pidättäminen voisivat olla ensisijaisia toimenpiteitä, ja tuhoavan voiman käyttö vasta kun mikään muu ei auta. Kansainvälinen aselainsäädäntö mahdollistaa suunnatun energian käytön lennokkien torjunnassa, mutta ei ihmisten vahingoittamistarkoituksessa. Kansainvälinen oikeus ei siis rajoita merkittävästi tutkimuksessa kuvattuun käyttötarkoitukseen suunniteltujen aseiden käyttöä.

Toinen merkittävä käyttöä rajoittava tekijä on palvelusturvallisuus. Suurteholaserit ovat silmävaarallisia ja aiheuttavat myös ihovaurioita, jolloin niiden käyttäminen Santahaminan ympäristössä voi aiheuttaa vaaraa sivullisille sekä putoavan lennokin, että ohiammutun tai lennokista heijastuvan lasersäteen myötä. Mikroaaltoaseiden haittavaikutukset liittyvät elimistön lämpötilan nostamiseen, mutta niiden vaikutus ei ole todennäköisesti lyhyenä altistuksena pysyvä. Eriyisesti suurteholaserin käyttöön liittyy riski ylilentävien lentokoneiden vaurioitumisesta, mikäli lasersäde ei osu kohteeseensa. Säde on todella voimakas ja se on pienelle alueelle keskitetty, jolloin sen haitallinen vaikutuskin yltää kauemmas kuin mikroaaltoaseen tapauksessa.

Päätutkimuskysymys: Miten suunnatun energian aseet soveltuvat kiinteän kohteen suojaamiseen pienten kaupallisten lennokkien muodostamaa uhkaa vastaan normaalioloissa?

Mitään yksiselitteistä johtopäätöstä suunnatun energian aseiden käytöstä lennokkien torjunnassa ei voida tutkimuksen perusteella tehdä, sillä aseita ei ole vielä todistettavasti käytetty tutkimuksessa kuvailussa käyttötarkoituksessa. Suurin haaste lennokkien torjunnassa muodostuu siitä, että hyvillä kameroilla varustetut lennokit voivat tiedustella kohdetta useiden kilometrien päästä, kun taas suunnatun energian aseiden vaikutusetäisyydet ovat rajallisemmat. Toisaalta asejärjestelmää voidaan useissa tapauksissa siirtää pois suojattavan kohteen sisäkehältä, jolloin torjunta voidaan toteuttaa yllätyksellisesti ja etupainotteisesti. Mikäli suunnatun energian asetta verrataan kineettisiin asejärjestelmiin, etuja ovat muun muassa pienempi riski sivullisten vahingoittamisesta, yksittäisen laukauksen edullisuus ja kyky pienentää aseiden tehoa häiritsemistarkoitukseen. Toisaalta kineettiset asejärjestelmät ovat tällä hetkellä hankintahinnaltaan edullisempia, niille on olemassa valmis infrastruktuuri ja niillä ulotutaan riittävän pitkiin vaikutusetäisyyksiin. Lopputuloksena voidaan kuitenkin todeta, että suunnatun energian aseet ovat potentiaalisia tutkimuksessa kuvattuun käyttöön, mutta perinteisten asejärjestelmien kanssa käytettäviä taistelutapoja on todennäköisesti muokattava, jotta uusien asejärjestelmien koko kapasiteetti saadaan hyödynnettyä.

Tämän tutkimuksen perusteella suunnatun energian aseiden käytölle lennokkien torjunnassa ei ole suoranaisia esteitä teknisesti tai lainsäädännöllisesti. Aseiden käyttöön liittyvät rajoitteet ovat suurimmalta osalta taisteluteknisen ja taktisen tason haasteita. Koska tehokkaat suunnatun energian aseet ovat vielä painavia ja kookkaita, niiden käyttö rajoittuu alusten tai kiinteiden kohteiden suojaamiseen. Mikäli suojattava kohde on suuri, sen suojaaminen vaatii paljon ase-lavetteja, joita on ryhmitetty kohteen ympäristöön riittäväällä syvyysporrastuksella. Toisaalta kyseeseen sopisivat myös pienemmät laukaisulavetit, joiden siirtäminen uhan suuntaan voidaan toteuttaa tehokkaasti ja nopeasti. Nykyinen kameratekniikka mahdollistaa todella tehokkaan ja tarkan tiedustelutoiminnan suunnatun energian aseiden kantaman ulkopuolelta. Aluksen on mahdollista siirtyä pois uhkaavalta alueelta tai lähemmäs uhan muodostamaa lennokkia torjuntaa varten. Mikäli kiinteän kohteen ympärillä ei ole Puolustusvoimien hallinnoimaa maa-alueetta, jolle voitaisi vapaasti sijoittaa asejärjestelmiä, täytyy kohteen uloimman suojaamisen toteuttamisessa pyytää virka-apua muilta viranomaisilta. Mikäli suojattava kohde on pieni ja se sijaitsee Puolustusvoimien alueen sisäpuolella, onnistuu sen suojaaminen varmemmin suunnatun energian aseilla, jotka on sijoitettu mahdollisimman etäälle kohteesta, näin mahdollistaen lennokin torjunnan yllätyksellisesti ennen sen saapumista omalle vaikutusetäisyydelleen.

Pienten miehittämättömien ilma-alusten torjunta pelkästään suunnatun energian aseilla on tutkimuksen valossa mahdollista ja siinä on paljon tutkimuksessa esille nousseita hyviä puolia, kuten laukauksen hinta, säteen nopea eteneminen ja pienempi riski sivullisista vahingoista (pois lukien ilmailuun liittyvät riskit). Suunnatun energian aseiden hyvistä ominaisuuksista huolimatta tutkijan näkökulmasta miehittämättömien ilma-alusten tai lentolaitteiden torjunnassa tärkeää on käyttää tilanteeseen sopivinta torjuntakeinoja. Kohteesta riippuen, pitkille etäisyyksille torjuttaessa suunnatun energian aseita parempi vaihtoehto voikin olla torjuntahävittäjä, häirintä tai perinteisillä aseilla toteutettava ilmatorjunta, samoin mikäli suojattava kohde on liikkuva. Lyhyille etäisyyksille ja kiinteän kohteen tapauksessa taas suunnatun energian aseet voivat olla tehokkain ja turvallisin keino. Joissakin tilanteissa tärkein ja tehokkain torjuntakeino voi olla lennättäjän etsintä ja kiinniotto. Kaikkia olemassa olevia torjuntakeinoja tuleekin käyttää kohteen, uhan ja halutun vaikutuksen mukaisesti rinnakkain.

5.2. Tutkimuksen luotettavuuden arviointi

Rantapelkosen ja Koistisen mukaan tutkimuksen luotettavuudella tarkoitetaan perusteltua, läpinäkyvää ja tieteellisyyden kriteerit täyttävää tutkimusta. Laadullisten tutkimusten luotettavuutta arvioidaan uskottavuuden perusteella, kun taas määrällisissä tutkimuksissa painopisteenä ovat reliabiliteetti ja validiteetti. [24, s. 62] Tässä tutkimuksessa on sekä laadullisia, että määrällisiä elementtejä, joten tutkimuksen luotettavuuden arvioinnissa on keskitytty kuvaamaan kaikkia edellä mainittuja luotettavuuden arvioinnin kriteerejä.

Tutkimuksen teoriapohja perustuu tieteelliseen kirjallisuuteen sekä aikaisempiin tutkimuksiin, joiden osalta lähdeaineistoa voidaan pitää uskottavana. Suunnatun energian aseiden tapauksessa tutkimuskohde kehittyy nopeasti ja jopa kiihtyvällä tahdilla, joten tutkimuksen uskottavuutta on lisätty käyttämällä mahdollisimman uusia julkaisuja. Lisäksi lennokkien torjuntaan liittyy lakeja ja asetuksia, joiden luotettavuutta ja uskottavuutta on pidettävä erittäin korkeana. Laeista tehtyjen tulkintojen oikeellisuuden tutkija on varmentanut konsultoimalla Maavoimien esikunnan operatiivista sotilaslakimiestä Tuulikki Vainiota. Sotilaslakimies Vainio on tarkistanut luvussa 3.3.1 esitetyt tulkinnat ja todennut niiden sotilaallista lainsäädäntöä ja lennokkeja koskevat osuudet oikeiksi [118]. Aiheesta onkin tehty runsaasti tutkimuksia 2010-luvulla, niistä osa on jopa julkisista lähteistä löydettävissä. Fysikaaliset ilmiöt suunnatun energian aseiden taustalla ja vaikutukset kohteessa eivät kuitenkaan ole muuttuneet viime vuosina, joten näihin liittyvää tietoa on saatu vanhemmastakin kirjallisuudesta. Kuitenkin, vaikka käytettyä kirjallisuutta voidaan pitää uskottavana lähdeaineistona, lukuisat aineistona käytetyt vertaisarvioimat internetjulkaisut ja -artikkelit eivät ole yhtä uskottavia ja luotettavia lähteitä. Näiden lähteiden luotettavuutta on kuitenkin lisätty etsimällä useita lähteitä samasta ilmiöstä tai järjestelmästä.

Reliabiliteetti tarkoittaa tutkimuksen luotettavuutta sen toistettavuuden kautta, eli ovatko tutkimuksen tulokset riippumattomia mittaustilanteesta, tutkijasta tai satunnaisista muuttujista. [24, s. 101] Suuri osa tämän tutkimuksen empiirisestä osasta koostuu matemaattisesti mallinnetuista ilmiöistä, joissa käytetyt laskutoimitukset on esitelty tutkimuksessa. Näin ollen voidaan todeta tutkimuksen laskutoimitusten olevan kenen tahansa toistettavissa samoin lopputuloksin. Laadullisiin tutkimusmenetelmiin perustuvat osuudet on puolestaan viitteistetty siten, että tutkimuksen lukija voi palata alkuperäislähteisiin ja varmentaa tutkijan tekemien tulkintojen oikeellisuuden.

Tutkimuksen validiteettia arvioitaessa pohditaan, onko tutkimuksessa mitattu juuri niitä asioita, jota tutkimuksen ilmiötä selittäessä pitäisi tutkia. Kansankielisesti todettuna validiteetti kuvaa siis tutkimuksen pätevyyttä ja laatua. [24, s. 185] Tätä tutkimusta tehdessä on jouduttu tekemään lukuisia olettamuksia ja valintoja, esimerkiksi lennokkien suhteen. Tutkimuksen tekoon liittyvät oletukset on perusteltu tutkijan omien näkemysten sekä lähteiden ohjaamana. Tämän lisäksi validiteettia arvioitaessa on otettava huomioon suunnatun energian asejärjestelmien monimutkaisuus ja tutkijan rajalliset resurssit, joten tutkimuksessa ei ole voitu huomioida kaikkea aseiden käyttöön liittyvää. Tutkimuksen validiteetti voidaan kuitenkin kokonaisuutena arvioiden todeta luotettavaksi ja tieteelliset kriteerit täyttäväksi.

Osaan lähteistä on kohdistettava erityistä kritiikkiä niiden puolueellisuuden vuoksi. Esimerkiksi asevalmistajien omilla internetsivuillaan julkaisemiin tietoihin on syytä suhtautua epäillen, sillä valmistajat luonnollisesti korostavat tuotteidensa hyviä puolia saadakseen tuotteet myytyä. Lähdekritiikkiä on suoritettu tutkimusta tehdessä ja epävarmimpia lähteitä ei ole käytetty tai niissä ollut tieto on varmistettu muista lähteistä. Puolueellisten lähteiden tutkija on suhtautunut kriittisesti opinnäytetöihin, erityisesti kandidaatin- ja maisterin tutkintoihin, joiden tieto on pyritty varmistamaan alkuperäislähteistä, mikäli se on ollut mahdollista.

Tutkittavan aiheen teknisyyden ja lähdemateriaalin englanninkielisyyden voidaan arvioida vaikuttaneen tutkimuksen luotettavuuteen ja tarkkuuteen. Aihe oli tutkijalle verrattain tuntematon, joten ennen tutkimusraportin kirjoittamista tutkija on joutunut perehtymään aiheeseen ja englanninkielinen lähdeaineisto on voinut aiheuttaa tulkintavirheitä tai väärinymmärryksiä. Tutkimusraporttiin on syytä suhtautua kriittisesti ja varmistettava tietojen oikeellisuus tarvittaessa viittausten mukaisista primäärilähteistä. Mahdollisten virheellisten tulkintojen vaikutuksia on pyritty sulkemaan pois konsultoimalla Puolustusvoimien tutkimuslaitoksen tutkijoita, jotka ovat työskennelleet laser- ja mikroaaltoaseiden parissa.

Tutkimusprosessin aikana selvisi, että käytetyt tutkimusmenetelmät eivät olleet tutkittavan ilmiön kannalta tehokkaimpia. Aiheen aikaisempien tutkimusten vähäisyyden ja tutkijan oman ammattitaidon kannalta asiantuntijahaastattelu jo tutkimuksen alkuvaiheessa olisi ollut tarkoituksenmukaisempi tutkimusmenetelmä. Toisaalta tutkimuksen loppupuolella suoritettulla asiantuntijakonsultoinnilla on paikattu tätä puutetta. Tutkija on käyttänyt huomattavasti aikaa tutkimukseen liittyvien peruskäsitteiden ja teorian opiskelemiseen, jolloin varsinaisen empiirisen tutkimustyön tekemiseen on jäänyt vähemmän resursseja.

5.3. Esitykset jatkotutkimuksista

Tutkimuksen lopussa esitetään muutamia aiheita, joita olisi syytä tutkia tarkemmin tulevaisuudessa. Tämä tutkimus rajattiin koskemaan vain pieniä kaupallisia miehittämättömiä ilma-aluksia, mutta jatkotutkimustarve koskien sotilaallisia lennokkeja on ilmeinen. Tässä tutkimuksessa nousi esille, että suunnatun energian aseiden tehokas kantama pakottaa käyttämään niitä etäällä suojattavasta kohteesta, joten aseiden käyttöä tulee tutkia myös taktisesta näkökulmasta.

Tässä tutkimuksessa lennokeilla tarkoitettiin vain miehittämättömiä ilma-aluksia, mutta muutkin miehittämättömät lentolaitteet ja niiden torjunta ovat ajankohtaisia tutkimusaiheita nyt ja tulevaisuudessa. Miehittämättömillä lentolaitteilla tarkoitetaan tässä tapauksessa kaikkia ilman miehistöä lentäviä laitteita, eli lennokkien lisäksi esimerkiksi ohjuksia tai raketteja.

Suunnatun energian aseet kehittyvät jatkuvasti ja tämä tarkoittaa, että niistä saadaan rakennettua yhä pienempiä ja kevyempiä, mutta samalla tehokkaampia. Seuraavana tutkimusaiheena voisikin olla suunnatun energian aseiden käyttö taistelevien joukkojen suojana esimerkiksi korvaamalla tai täydentämällä ilmatorjuntaohjussyksiköitä tulevaisuudessa. Tällaisen joukon tehtävä on ensisijaisesti tappioiden tuottaminen, jolloin sillä ei ole varsinaista suojattavaa kohdetta. Se voisi olla myös laser- tai mikroaaltoaseelle tehokas käyttötapa, vaikka ne eivät vielä liikuteltavuudeltaan aivan pienten, kannettavien, ilmatorjuntaohjusten tasolle ylläkään. Toisaalta myös ammusilmatorjuntayksiköiden korvaajaksi suunnatun energian aseet ovat hyvä vaihtoehto, etenkin kohteen suojaamiseen liittyvissä tehtävissä.

Tämän tutkimuksen matemaattinen osuus ei ota kaikkia suunnatun energian aseiden käyttöön liittyviä parametreja huomioon, joten tarkempien laskelmien tekeminen ja niiden pohjalta mahdollisten kenttäkokeiden tekeminen ovat mahdollisia tutkimusten aiheita tulevaisuudessa. Lisäksi tässä tutkimuksessa ei ole otettu huomioon suunnatun energian aseiden kaupallista puolta, eli hinta-laatu -suhdetta verrattuna kineettisiin asejärjestelmiin. On selvää, että ilmatorjuntaohjukset maksavat kymmeniä tuhansia euroja kappaleelta, niitä ole taloudellisesti järkevää käyttää halpoja lennokkeja vastaan eikä niitä voida normaalioloissa ampua missään tapauksessa. Ammusilmatorjuntaa puolestaan voisi hintansa puolesta käyttää, mutta niidenkään käyttö normaalioloissa ei ole mahdollista. Suunnatun energian aseiden käyttö olisi mahdollista, mutta niiden osalta tulee tutkia todelliset kustannukset hankinnalle, ylläpidolle ja käytölle. Samoin tulisi suunnata tutkimusta lennokkien muodostamalta uhalta suojautumiseen ja riskien minimoimiseen muilla keinoin, kuin aseellisella vaikuttamisella.

Suunnatun energian aseiden vaarallisuutta sivullisia kohtaan on tutkittava tätä tutkimusta tarkemmin ja erityisesti aseiden säteen haitallinen kantama on selvitettävä. Suunnatun energian aseet voivat tutkitusti aiheuttaa terveydellistä vaaraa aseiden lähialueelle, mutta on tutkittava, minkälaisen vaaran aseet aiheuttavat tehokkaan kantaman ulkopuolelle, esimerkiksi yli lentävälle lentokoneelle.

KUVAT

Kuva 1. Sähkömagneettinen spektri [38].....	12
Kuva 2. Laser-aseiden luokittelu energian mukaan [33]	16
Kuva 3. Laseraseen lähi- ja kaukokenttä.....	17
Kuva 4. DE M-SHORAD [50].....	22
Kuva 5. DRONE DOME™ [53].....	23
Kuva 6. HELIOS [59]	24
Kuva 7. Peresvet [64].....	25
Kuva 8. Sokol-Eshelon [65].....	26
Kuva 9. Suunnatun energian aseiden vaikutusmenetelmät	28
Kuva 10. Mikroaaltoaseen lähi- ja kaukokenttä.....	29
Kuva 11. THOR [70].....	31
Kuva 12. Leonidas [72].....	32
Kuva 13. Phaser [75].....	33
Kuva 14. Maanpuolustuskorkeakoulun päärakennus.....	34
Kuva 15. Santahaminan saari ympäristöineen	35
Kuva 16. DJI Air 2S [120]	42
Kuva 17. DJI Matrice 300 RTK [91]	43
Kuva 18. Parrot Disco [119]	43
Kuva 19. Quantum Trinity F90+ [95].....	44
Kuva 20. Lennokkien äärikantamat	47
Kuva 21. Väestötiheys Santahaminan lähialueella [107].....	53
Taulukko 1. EU:n lennokkiluokittelu [79].....	36
Taulukko 2. NATO:n ja Iso-Britannian sotilasilmaluviranomaisen lennokkiluokittelu.....	37
Taulukko 3. Käytössä olevat radiotaajuudet [82]	37
Taulukko 4. Laserien turvallisuusluokittelu [86].....	40
Taulukko 5. Lennokkien ominaisuudet [96; 97; 98; 99; 100; 101]	45
Taulukko 6. Lennokkien GSD-arvot eri etäisyyksille.....	50
Taulukko 7. Kiinteiden aineiden ominaisuuksia [116, 117]	59

LÄHTEET

- [1] Mattis, J. *Summary of the 2018 National Defense Strategy of the United States of America: Sharpening the American Military's Competitive Edge*. The United States Department of Defense, 2018. [Viitattu 9.2.2021]. Saatavissa: <https://dod.defense.gov/Portals/1/Documents/pubs/2018-National-Defense-Strategy-Summary.pdf>.
- [2] Lindberg, J. *Lennokki voidaan ottaa alas voimakkein tai erilaisin mielenkiintoisin tekniikoin - Puolustusvoimilla on nyt lupa puuttua sitä uhkaavaan lennokkitoimintaan*. Aamulehti, 2019 Maaliskuu 3.
- [3] Torniainen, A. *Drone-uhka! Miehittämättömien lennokkien valvonta ja torjunta*. Opinnäytetyö AMK. 2018. Poliisiammattikorkeakoulu. 35 s.
- [4] L 11.5. 2007/551. Laki Puolustusvoimista.
- [5] Kullberg, I. *Kaupallisten minilennokkien aiheuttama uhka ja sen torjuntakeinot rakennetulla alueella rauhan aikana*. Pro Gradu. Helsinki, 2020. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. 81 s.
- [6] Kaurila, T. Korhonen, A. ja Erkkilä, T. *Kaupallisten miehittämättömien järjestelmien uhka ja torjunta*. AN6396, TLIV. Ylöjärvi: Puolustusvoimien tutkimuslaitos, 2017. 48 s.
- [7] Bob, J. *How much does Hamas's rocket arsenal cost?*. The Jerusalem Post. [Viitattu 21.5.2021]. Saatavissa: <https://www.jpost.com/arab-israeli-conflict/how-much-does-hamass-rocket-arsenal-cost-668317>.
- [8] Haapasalo, S. *Pienten sotilaslennokkien kustannustehokas torjunta erittäin lyhyen kantaman ilmatorjunta-aseilla*. Pro Gradu. Helsinki, 2020. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. 69 s.
- [9] Nielsen, P. *Effects of directed energy weapons*. Washington DC: National Defence University, 1994. 368 s. ISBN 0-945274-24-6.
- [10] Torri, H. *Kineettinen vaikuttaminen ammusilmatorjuntajärjestelmillä tiedustelulennokki uhkaa vastaan*. Kandidaatintutkielma. Helsinki, 2020. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. 25 s.
- [11] Liakka, A. *Lennokkien torjuntamahdollisuudet ITO05m sekä ITO15 -kalustoilla TSTOS(PAJON) -taistelussa*. Kandidaatintutkielma. Helsinki, 2015. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotataidon laitos.
- [12] Pernu, T. *The technological maturity of ground based directed energy air defence systems in 2025-2030*. Diplomityö. Helsinki, 2017. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. 99 s.
- [13] Lehtinen, V. *Ilma-aluksen torjuminen laseraseella*. Kandidaatintutkielma. Helsinki, 2018. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. 21 s.
- [14] Kytö, M. *Suurteholaser Suomen ilmapuolustuksessa 2030+*. Kandidaatintutkielma. Helsinki, 2015. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. 29 s.
- [15] Moisio, M. & Parviainen, T. *Suunnatun energian aseet 1.0*. AP6595, TLIV. Puolustusvoimien Tutkimuslaitos, 2019. 35 s.
- [16] Parviainen, T., Hartikainen, J., Raerinne, P. & Kaurila, T. *Suunnatun energian aseet 2.0*. AQ15810, TLIV. Lakiala: Puolustusvoimien Tutkimuslaitos, 2020. 23 s.
- [17] Clark, B. & Gunzinger, M. *Winning The Airwaves Regaining America's Dominance In The Electromagnetic Spectrum*. Washington DC: Center for Strategic and Budgetary Assessments, 2017. 68 s.
- [18] Townes, C. *The first laser*. University of Chicago. [Viitattu 10.2.2021]. Saatavissa: https://press.uchicago.edu/Misc/Chicago/284158_townes.html.
- [19] Hämäläinen, J., Järviö, P., Kuja-Halkola, S., Silvola, P. & Paunonen, J. *Sähkömagneettisten aseiden teknologiaa*. Riihimäki: Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos, Julkaisuja 17, 2009. 34 s.
- [20] McHale, J. *Raytheon delivers Active Denial System 2 to U.S. Air Force*. Military & Aerospace Electronics. 1.12.2007. [Viitattu 4.6.2021]. Saatavissa: <https://www.militaryaerospace.com/home/article/16706126/raytheon-delivers-active-denial-system-2-to-us-air-force>.
- [21] Wilson, J. *Laser weapons get ready for the big time*. Military & Aerospace Electronics. 23.7.2020. [Viitattu 11.3.2022]. Saatavissa: <https://www.militaryaerospace.com/home/article/14180250/military-laser-weapons>.
- [22] Baker, G. *High Power Electromagnetic Weapons: A Brief Tutorial*. James Madison University, 2011. 9s.
- [23] L 29.12. 2011/1552. Valmiuslaki.

- [24] Rantapelkonen, J. & Koistinen, L. *Pohdintoja sotatieteellisistä käsitteistä*. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotataidon laitos, Julkaisusarja 2, 2016. 203 s. ISBN 978-951-25-2820-2.
- [25] Vuori, J. Tapaustutkimus. Teoksessa Vuori, J. (toim.) *Laadullisen tutkimuksen verkkokäsikirja*. [Verkkójulkaisu] Tampere: Yhteiskuntatieteellinen tietoaarkisto. [Viitattu 11.3.2022]. Saatavissa: <https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvali/tutkimusasetelma/tapaustutkimus/>
- [26] Nurmio, S. *Pienten kaupallisten multikopterien suorituskyky taistelulentän valvonnassa*. Pro Gradu. Helsinki, 2018. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. 79 s.
- [27] Metsänvirta, A. *Lyhyen kantaman ilmatorjuntajärjestelmissä käytettävät teknologiat 2030-luvulla*. EUK opinnäytetyö. Helsinki, 2013. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. 26 s.
- [28] Kivi, S., Kärkelä, J., Pajja, M., Lemmettyinen, J., Saarikko, M., Nissinen, A. & Lehtonen, R. *PVTO2017: Pienten miehittämättömien ilma-alusten torjunta. Demonstraatiovaiheen loppuraportti*. TLIV. Patria, 2020. 116 s.
- [29] Walling, E. *High Power Microwaves: Strategic and Operational Implications for Warfare*. Alabama: Air War College, Maxwell Air Force Base, 2000. 53 s.
- [30] Salvador, J. *Radio Frequency Photonics: Enabler of electromagnetic spectrum dominance*. Alabama: Air Command and staff College, Maxwell Air Force Base, 2020. 21 s.
- [31] Parker, B. *The Physics of War: From Arrows to Atoms*. New York: Prometheus Books, 2014. 320 s. ISBN 978-1-61614-803-4.
- [32] Kosola, J. & Solante, T. *Digitaalinen taistelulentä: Informaatioajan sotakoneen tekniikka*. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos, julkaisusarja 1, 2013. 497 s. ISBN 978-951-25-2503-4.
- [33] Kaushal, H. & Kaddoum, G. *Applications of Lasers for Tactical Military Operations*. IEEE, 2017. 18 s.
- [34] Ellis, J. *Directed-Energy Weapons: Promise and Prospects*. Washington DC: Center for a New American Security, 2015. 60 s.
- [35] Jormakka, J., Lappalainen, E., Viita-Aho, A. & Tuovinen, P. *Maanpuolustuskorkeakoulu teknisten tutkimusmenetelmien käytön murroksessa*. Tiede Ja Ase, 2004. s. 226 - 255.
- [36] Lappalainen, E. & Jormakka, J. *Katsaus tekniikan tutkimusmenetelmiin Maanpuolustuskorkeakoulussa*. Tiede ja Ase. s. 202-232.
- [37] Salminen, A. *Mikä kirjallisuuskatsaus? Vaasa: Vaasan yliopisto, 2011. 50 s.*
- [38] [Viitattu 12.10.2021]. Saatavissa: <https://peda.net/kannus/jvk/oppiaineet2/fysiikka/9-lk-fysiikka/e9k22/3ssjv/kuvat/luvun-37-kuvat/sss:file/photo/dbaf1b1dcc0964ff34c5f2878839121709dd9644/sahkomagneettinen-sateily-800.png>.
- [39] Honkonen, J. *ISM3 Suorituskyvyn suunnittelu: Optisen alueen sensorien fysiikan perusteet, SM10 luentomoniste*. Helsinki 2020, Maanpuolustuskorkeakoulu. Luentomateriaali. 71 s.
- [40] Urone, P. & Hinrichs, R. *College Physics*. [Verkkójulkaisu]. Houston, Texas: Rice university, 2020. 1568 s. ISBN-10: 1-947172-01-8.
- [41] *Definition and Properties of Laser Light*. Oregon State University, Environmental Health and Safety. [Viitattu 11.3.2022]. Saatavissa: <https://ehs.oregonstate.edu/laser/training/definition-and-properties-laser-light>.
- [42] Townes, C. *The first laser*. University of Chicago. [Viitattu 10.2.2021]. Saatavissa: https://press.uchicago.edu/Misc/Chicago/284158_townes.html.
- [43] Rogoway, T. *The Airborne Laser May Rise Again But It Will Look Very Different*. Jalopnik. 18.8.2015. [Viitattu 11.3.2022]. Saatavissa: <https://foxtrotalpha.jalopnik.com/the-airborne-laser-may-rise-again-but-it-will-look-very-1724892313>.
- [44] Lionis, A. *Experimental Design of a UCAV-based High-Energy Laser Weapon*. Monterey, California, Naval Postgraduate School, 2016. 133 s.
- [45] Wilson, J. *Laser weapons get ready for the big time*. Military & Aerospace Electronics. 23.7.2020. [Viitattu 11.3.2022]. Saatavissa: <https://www.militaryaerospace.com/home/article/14180250/military-laser-weapons>.
- [46] *Indian Air Force releases RFI to procure ten CUAS systems*. Airforce Technology. 6.7.2021. [Viitattu 20.12.2021]. Saatavissa: <https://www.airforce-technology.com/news/indian-air-force-rfi-cuas-systems/>.
- [47] *While The US Experiments, Russian Laser Weapon 'Peresvet' Active Since 2018*. The Eurasian Times. 8.2.2020. [Viitattu 11.3.2022]. Saatavissa: <https://eurasianimes.com/while-the-us-experiments-russian-laser-weapons-active-since-last-year/>.

- [48] Jones-Bonbrest, N. *Army advances first laser weapon through Combat Shoot-Off*. Army rapid capabilities and critical technologies office. 10.8.2021. [Viitattu 20.12.2021]. Saatavissa: https://www.army.mil/article/249239/army_advances_first_laser_weapon_through_combat_shoot_off.
- [49] Crumley, B. *US Army develops new laser weapon to fry drone, artillery threats away*. DoneDJ. [Verkkajulkaisu]. 27.8.2021. [Viitattu 20.12.2021]. Saatavissa: <https://dronedj.com/2021/08/27/us-army-develops-new-laser-weapon-to-fry-drone-artillery-threats-away/>.
- [50] Paleja, A. *The US Army Will Add a New Laser Weapon System to Its Arsenal in 2022*. Interesting engineering. 1.12.2021. [Viitattu 20.12.2021]. Saatavissa: <https://interestingengineering.com/us-army-will-add-a-new-laser-weapon-to-its-arsenal-in-2022>.
- [51] *Rafael's Iron Dome, celebrating 10 years of iron defense*. Rafael. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 20.12.2021]. Saatavissa: <https://www.rafael.co.il/iron-dome-10years/>.
- [52] *The British Ministry of Defence Employed Rafael's DRONE DOME to Defend the G7 Summit from Drone, UAV threats*. Defence Review Asia. 14.9.2021. [Viitattu 20.12.2021]. Saatavissa: <https://defencereviewasia.com/the-british-ministry-of-defence-employed-rafaels-drone-dome-to-defend-the-g7-summit-from-drone-uav-threats/>.
- [53] *DRONE DOME™ – C-UAS*. Rafael. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 11.3.2022]. Saatavissa: <https://www.rafael.co.il/worlds/air-missile-defense/c-uas-counter-unmanned-aircraft-systems/>.
- [54] *Drone Dome*. Rafael. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 11.3.2022]. Saatavissa: <https://www.rafael.co.il/wp-content/uploads/2019/03/Drone-Dome.pdf>.
- [55] *ATHENA Successfully Defends Drone Threat*. Lockheed Martin. [Verkkajulkaisu]. 7.11.2019. [Viitattu 20.12.2021]. Saatavissa: <https://news.lockheedmartin.com/2019-11-07-ATHENA-Successfully-Defends-Drone-Threat>.
- [56] *USAF tests Lockheed Martin's ATHENA laser weapon system*. Airforce Technology. 11.11.2019. [Viitattu 15.3.2022]. Saatavissa: <https://www.airforce-technology.com/news/usaf-lockheed-athena-laser-weapon/>.
- [57] *Tactical Airborne Laser Pods are Coming*. Lockheed Martin. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 15.3.2022]. Saatavissa: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/news/features/2020/tactical-airborne-laser-pods-are-coming.html>.
- [58] Keller, J. *Lockheed Martin moves forward with building laser weapons and optical dazzler for U.S. Navy surface warships*. Military Aerospace Electronics. 11.3.2021. [Viitattu 15.3.2022]. Saatavissa: <https://www.militaryaerospace.com/power/article/14199140/laser-weapons-optical-dazzler-surface-warships>.
- [59] *The Helios Solution*. Lockheed Martin. [Verkkajulkaisu]. 2020. [Viitattu 15.3.2022]. Saatavissa: https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/rms/documents/directed-energy/HELIOS_Infographic_FINAL.pdf.
- [60] *GA-EMS and Boeing Team to Develop 300kW-class HELWS Prototype for US Army*. General Atomics. 25.10.2021. [Viitattu 15.3.2022]. Saatavissa: <https://www.ga.com/ga-ems-and-boeing-team-to-develop-300kw-class-helws-prototype-for-us-army>.
- [61] Paleja, A. *US Army Commissions 300-kW Laser Weapon System, the Biggest So Far*. Interesting engineering. 28.10.2021. [Viitattu 15.3.2022]. Saatavissa: <https://interestingengineering.com/us-army-commissions-300kw-laser-weapon-system-the-biggest-so-far>.
- [62] *Russia has tested the Peresvet combat laser in Syria - the first drone has already been shot down*. Avia.Pro. 2.6.2020. [Viitattu 15.3.2022]. Saatavissa: <https://avia-pro.net/news/rossiya-ispytala-v-sirii-boevoy-lazer-peresvet-pervyy-bespilotnik-uzhe-sbit>.
- [63] Ahronheim, A. *No Israeli drone shot down by Russian laser weapons system in Syria*. The Jerusalem Post. 10.6.2020. [Viitattu 21.12.2021]. Saatavissa: <https://www.jpost.com/israel-news/no-israeli-drone-shot-down-by-russian-laser-weapons-system-in-syria-630987>.
- [64] Hendrickx, B. *Peresvet: a Russian mobile laser system to dazzle enemy satellites*. The Space Review. 15.6.2020. [Viitattu 21.12.2021]. Available: <https://www.thespacereview.com/article/3967/1>.
- [65] *A-60 / 78T6 / IJK222*. Military Russia. 3.7.2012. [Viitattu 21.12.2021]. Saatavissa: <http://militaryrussia.ru/blog/topic-680.html>.
- [66] Dombe, A. *US Deploys HPM Missiles on B-52 Bombers*. Israel Defense. [Verkkajulkaisu]. 21.5.2019. [Viitattu 15.3.2022]. Saatavissa: <https://www.israeldefense.co.il/en/node/38616>.
- [67] *How US military's THOR will fry drones out of the sky*. 9News. [Verkkajulkaisu]. 28.6.2021. [Viitattu 15.3.2022]. Saatavissa: <https://www.9news.com.au/technology/thor-anti-drone-weapon-to-protect-us-bases-from-attack/0f163737-3ab3-4fec-a530-e04b3acb3957>.
- [68] Perkins, J. *AFRL's THOR hammers drones in new video animation*. Air Force Research Laboratory. [Verkkajulkaisu]. 16.6.2021. [Viitattu 22.12.2021]. Saatavissa: <https://www.af.mil/News/Article-Display/Article/2658386/afrls-thor-hammers-drones-in-new-video-animation/>.

- [69] *MJOLNIR*. Department of Defense US. 29.7.2021. [Viitattu 15.3.2022]. Saatavissa: <https://sam.gov/opp/2c558c4b0b3e40fdb7362553fc6d64f1/view>.
- [70] Roza, D. *A new Air Force weapon will wipe out drone swarms with the push of a button*. Task And Purpose. 5.8.2021. [Viitattu 22.12.2022]. Saatavissa: <https://taskandpurpose.com/military-tech/air-force-drone-swarm-defense-mjolnir/>.
- [71] Taylor, I. *Drone-killer fires microwave beams to disable UAVS*. Science Focus. 13.3.2021. [Viitattu 23.12.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencefocus.com/future-technology/drone-killer-fires-microwave-beams-to-disable-uavs/>.
- [72] *Leonidas systems: Revolutionizing directed energy*. EPIRUS. 2021. [Viitattu 23.12.2021]. Saatavissa: <https://www.epirusinc.com/products>.
- [73] Judson, J. *General Dynamics, Epirus team up to integrate counter-drone swarm system on combat vehicles*. Defense News. 25.9.2021. [Viitattu 23.12.2021]. Saatavissa: <https://www.defensenews.com/land/2021/10/25/general-dynamics-epirus-team-up-to-integrate-counter-drone-swarm-system-on-combat-vehicles/>.
- [74] Paleja, A. *General Dynamics' Stryker Will Counter Drone Swarms With a Microwave Weapon*. Interesting Engineering. 26.10.2021. [Viitattu 23.12.2021]. Saatavissa: <https://interestingengineering.com/general-dynamics-stryker-will-counter-drone-swarms-with-a-microwave-weapon>.
- [75] *Phaser High-Power Microwave System*. Raytheon Missiles & Defense. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 23.12.2021]. Saatavissa: <https://www.raytheonmissilesanddefense.com/capabilities/products/phaser-high-power-microwave>.
- [76] Host, P. *US Air Force awards Raytheon high-power microwave device contract*. Janes. 25.9.2019. [Viitattu 15.3.2022]. Saatavissa: <https://www.janes.com/defence-news/news-detail/us-air-force-awards-raytheon-high-power-microwave-device-contract>.
- [77] L 1.1.2021 534/2020. Laki ilmailulain muuttamisesta
- [78] Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. *Droneinfo – Lentotyö ja miehittämätön ilmailu*. [Verkkojulkaisu]. 22.1.2021. [Viitattu 19.8.2021]. Saatavissa: <https://www.droneinfo.fi/fi/lentotyö/lentotyö-ja-miehittamaton-ilmailu>.
- [79] Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. *Droneinfo – EU:n dronesäännöt*. [Verkkojulkaisu]. 16.4.2021. [Viitattu 19.8.2021]. Saatavissa: <https://www.droneinfo.fi/fi/eun-dronesäännöt?toggle=Laitteet%20joiden%20k%C3%A4ytt%C3%A4ji%C3%A4%20ei%20koske%20ekister%C3%B6itymisvaatimukset>.
- [80] M 13.10.2017 SIM-Ma-Lt-014. Lentokelpoisuus- ja operointivaatimukset miehittämättömässä sotilasilmailussa
- [81] Ministry of Defence UK. *Joint Doctrine Publication 0-30.2: Unmanned Aircraft Systems*. Wiltshire: Ministry of Defence, 2017.
- [82] Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. *Kauko-ohjattujen lennokkien ja ilma-alusten (UAS/RPAS/Drone) taajuudet ja radiolupa-asiat*. [Verkkojulkaisu]. 12.7.2021. [Viitattu 31.8.2021]. Saatavissa: <https://www.traficom.fi/fi/liikenne/ilmailu/kauko-ohjattujen-lennokkien-ja-ilma-alusten-uasrpsadronetaajuudet-ja-radiolupa?toggle=M%C3%A4%C3%A4r%C3%A4ys%2015%20luvasta%20vapaiden%20radiol%C3%A4hettimien%20yhteistajuuksista%20ja%20k%C3%A4yt%C3%B6st%C3%A4>.
- [83] A 22.11. 2018/1045. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoimattoman säteilyn väetölle aiheuttaman altistuksen rajoittamisesta.
- [84] L 9.11. 859/2018. Säteilylaki.
- [85] Declerq, W. *Laser Weapons in International Humanitarian Law: Opportunities and Challenges*. Finabel - European Army Interoperability Center. [Verkkojulkaisu]. 9.3.2021. [Viitattu 6.7.2021]. Saatavissa: <https://finabel.org/laser-weapons-in-international-humanitarian-law-opportunities-and-challenges/>.
- [86] *Säteilyturvakeskus: Laserluokat*. Säteilyturvakeskus. [Verkkojulkaisu]. 18.12.2019. [Viitattu 30.6.2021]. Saatavissa: <https://www.stuk.fi/aiheet/laserit/laserluokat>.
- [87] Westhoff, J., Roberts, B. & Erickson, K. *Vehicle-Mounted High-Power Microwave Systems and Health Risk Communication in a Deployed Environment*. Military Medicine, 2013. No. 178, p. 34-36.
- [88] Maavoimat. *Ilmatorjuntaopas 2017*. TLIV HM648. Maavoimien esikunta, 2016. 155 s.
- [89] Pikkarainen, J. & Mesiä, M. *Paras drone 2021: DJI, Parrot ja muut kopterikamerallit ammatillisille ja aloittelijoille*. Techradar. 23.6.2021. [Viitattu 20.8.2021]. Saatavissa: <https://global.techradar.com/fi-fi/news/paras-drone>.

- [90] Verkkokauppa.com. [Viitattu 20.8.2021]. Saatavissa: <https://www.verkkokauppa.com/fi/catalog/12208c/A2-keskikokoiset-dronet?sort=popularity%3Adesc>.
- [91] *DJI-M300-RTK*. Vertical Hobby. ” 3.1.2021. [Viitattu 15.2.2022]. Saatavissa: <https://www.verticalhobby.com/kauppa/dji-matrice-300-rtk-p-7225.html>.
- [92] Verkkokauppa.com. [Viitattu 20.8.2021]. Saatavissa: <https://www.verkkokauppa.com/fi/catalog/12209c/A3---suuret-dronet?sort=popularity%3Adesc>.
- [93] Amazon.com. [Viitattu 20.8.2021]. Saatavissa: <https://www.amazon.com/Parrot-Disco-FPV-minutes-goggles/dp/B01JYRII4Y>.
- [94] Staum, N. *10 Best Fixed Wing Drones in 2021*. [Verkkojulkaisu]. 11.3.2021. [Viitattu 14.9.2021]. Saatavissa: <https://www.gadgetreview.com/best-fixed-wing-drone>.
- [95] *Trinity F90+ UAV with PPK, long range telemetry and ADS-B in & out*. Quantum Systems. [Verkkojulkaisu]. 17.9.2019. [Viitattu 15.2.2022]. Saatavissa: <https://www.quantum-systems.com/2019/09/17/product-release-trinity-f90-uav-with-ppk-long-range-telemetry-and-ads-b-in-out/>.
- [96] Geotrim. [Viitattu 20.8.2021]. Saatavissa: <https://geotrim.fi/tuotteet/uas/quantum-trinity-f90/>.
- [97] *Zenmuse P1 Specs*. DJI. [Viitattu 15.2.2022]. Saatavissa: <https://www.dji.com/fi/zenmuse-p1/specs>.
- [98] *Matrice 300 RTK Specs*. DJI. [Viitattu 15.2.2022]. Saatavissa: <https://www.dji.com/fi/matrice-300/specs>.
- [99] *Air 2s Specs*. DJI. [Viitattu 15.2.2022]. Saatavissa: <https://www.dji.com/fi/air-2s/specs>.
- [100] *RX1R II Täysi kennokoko mahtuu kämmenelle*. Sony. [Viitattu 15.2.2022]. Saatavissa: <https://www.sony.fi/electronics/cyber-shot-kompaktikamerat/dsc-rx1rm2>.
- [101] *Disco FPV User Guide*. Parrot Drones SAS. [Viitattu 15.9.2021]. Saatavissa: https://www.parrot.com/assets/s3fs-public/2021-09/disco-fpv_user-guide_uk.pdf.
- [102] Nissinen, M. & Siponen, T. *Dji mavic pro:n hyödyntäminen korjuuvaurioiden kuvauksessa*. Opinnäytetyö AMK. Joensuu, 2018. Karelia-Ammattikorkeakoulu, Tieto- ja viestintätekniikan koulutusohjelma. 35 s.
- [103] *What is Ground Sample Distance (GSD) and How Does it Affect Your Drone Data?*. Propeller Aero. 30.3.2021. [Viitattu 8.9.2021]. Saatavissa: <https://www.propelleraero.com/blog/ground-sample-distance-gsd-calculate-drone-data/>.
- [104] *National Image Interpretability Rating Scales*. Federation of American Scientists. 16.1.1998. [Viitattu 9.9.2021]. Saatavissa: <https://irp.fas.org/imint/niirs.htm>.
- [105] *Joukko-osastot*. Puolustusvoimat. [Verkkojulkaisu]. 2021. [Viitattu 10.9.2021]. Saatavissa: <https://puolustusvoimat.fi/joukko-osastot>.
- [106] L 22.7. 2011/872. Poliisilaki.
- [107] *Väestöruutuaineisto*. Tilastokeskus. [Verkkojulkaisu]. 31.12.2020. [Viitattu 29.9.2021]. Saatavissa: https://www.stat.fi/org/avoindata/paikkatietoaineistot/vaestoruutuaineisto_1km.html.
- [108] Georgilidakis, S. *Incident: Drone - Helicopter collision, occupant injury*. Mentour Pilot. 25.1.2021. [Viitattu 29.9.2021]. Saatavissa: <https://mentourpilot.com/incident-drone-helicopter-collision-occupant-injury/>.
- [109] Kesteloo, H. *Taliban seize weaponized DJI Matrice 210 from Afghan security forces*. DroneDJ. [Verkkojulkaisu]. 24.1.2020. [Viitattu 12.10.2021]. Saatavissa: <https://dronedj.com/2020/01/24/weaponized-dji-matrice-200-taliban-afghan-security-forces/>.
- [110] Russon, M-A. *US firm reveals gun-toting drone that can fire in mid-air*. BBC. 11.9.2017. [Viitattu 15.3.2022]. Saatavissa: <https://www.bbc.com/news/technology-40901393>.
- [111] Chadwick, J. *Ministry of Defence is developing weaponised drones armed with SHOTGUNS that can fly indoors and identify targets using 'machine vision'*. Dailymail. 29.9.2020. [Viitattu 13.10.2021]. Saatavissa: <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-8784251/MoD-unveils-drone-armed-twin-shotguns-machine-vision.html>.
- [112] *Beretta teki mahdottomasta mahdollista – Ultraleggero*. SAKO. [Verkkojulkaisu]. 20.5.2021. [Viitattu 13.10.2021]. Saatavissa: <https://www.sakosuomi.fi/uutiset/beretta-teki-mahdottomasta-mahdollista-ultraleggero>.
- [113] Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. *Droneinfo – Miehitämättömän ilma-alusjärjestelmän suorituskyky lennossa*. [Verkkojulkaisu]. 14.1.2021. [Viitattu 13.10.2021]. Saatavissa: <https://www.droneinfo.fi/fi/koulutusmateriaali/miehitamattoman-ilma-alusjarjestelman-suorituskyky-lennossa?toggle=Miten%20drone%20toimii&toggle=Drone%20ja%20hy%C3%B6tykuorma%2C%20huomioitavia%20asioita>.
- [114] *FPV Frame materials: Will garon fibre be replaced?*. Get FPV. [Verkkojulkaisu]. 6.6.2019. [Viitattu 25.11.2021]. Saatavissa: <https://www.getfpv.com/learn/fpv-essentials/fpv-frame-materials/>.

- [115] Stupl, J. & Neuneck, G. *Assessment of Long Range Laser Weapon Engagements: The Case of the Airborne Laser*. Taylor & Francis Group, 2010. 60 s. ISSN: 0892-9882 print / 1547-7800 online [Viitattu 15.3.2022]. Saatavissa: <https://scienceandglobalsecurity.org/archive/sgs18stupl.pdf>
- [116] [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 27.11.2021]. Saatavissa: https://www.valuatlas.fi/sites/default/files/docs/plastics_PS_FI.pdf.
- [117] *Muiden kiinteiden aineiden ominaisuuksia*. Taulukot.com: Taulukkokirja verkossa. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 15.3.2022]. Saatavissa: https://www.taulukot.com/fysiikka/mekaniikka_termodynamiikka/#muiden_kiinteiden_aineiden_ominaisuuksia.
- [118] Vainio, T. Sotilaslakimies, Maavoimien esikunta. 21.2.2022. Lakitekstien konsultointi. Sähköpostihaastattelu. Haastattelumuistiinpanot tutkijalla.
- [119] Hall, C. *Parrot Disco preview: You can be my wingman any time*. Pocket-Lint. 7.11.2016. [Viitattu 15.3.2022]. Saatavissa: <https://www.pocket-lint.com/drones/reviews/parrot/139386-parrot-disco-preview-you-can-be-my-wingman-any-time>.
- [120] Leitner, N. *DJI Air 2S Review – First Look and Footage from the new Drone*. CineD. 15.4.2021. [Viitattu 15.2.2022]. Saatavissa: <https://www.cined.com/dji-air-2s-review-first-look-and-footage-from-the-new-drone/>.

LIITTEET

LIITE 1: Maastopixelikoko, GSD

LIITE 2: GSD-NIIRS -vertailutaulukko

LIITE 3: Materiaalien tuhoutumiseen tarvittavat intensiteetit

LIITE 4: Lyhenteet ja määritelmät

LIITE 5: Lennokkien muodostamat uhat ja niiden torjuntaan vaikuttavat tekijät

Maastopikselikoko, GSD

	Air 2S GSD(k)	Air 2S GSD(l)	Matrice 300 RTK GSD(k)	Matrice 300 RTK GSD(l)	Disco GSD(k)	Disco GSD(l)	Trinity F90+ GSD(k)	Trinity F90+ GSD(l)
50	0,5482	0,5482	0,4396	0,4382	3,8069	4,1843	0,6464	0,6449
100	1,0965	1,0965	0,8791	0,8765	7,6138	8,3686	1,2928	1,2899
150	1,6447	1,6447	1,3187	1,3147	11,4207	12,5529	1,9392	1,9348
200	2,1930	2,1930	1,7582	1,7529	15,2276	16,7372	2,5856	2,5798
250	2,7412	2,7412	2,1978	2,1912	19,0345	20,9215	3,2321	3,2247
300	3,2895	3,2895	2,6374	2,6294	22,8414	25,1058	3,8785	3,8696
350	3,8377	3,8377	3,0769	3,0676	26,6483	29,2901	4,5249	4,5146
400	4,3860	4,3860	3,5165	3,5059	30,4552	33,4744	5,1713	5,1595
450	4,9342	4,9342	3,9560	3,9441	34,2620	37,6587	5,8177	5,8045
478	5,2412	5,2412	4,2022	4,1895	36,3939	40,0019	6,1797	6,1656
500	5,4825	5,4825	4,3956	4,3823	38,0689	41,8430	6,4641	6,4494
550	6,0307	6,0307	4,8352	4,8206	41,8758	46,0273	7,1105	7,0944
600	6,5789	6,5789	5,2747	5,2588	45,6827	50,2116	7,7569	7,7393
650	7,1272	7,1272	5,7143	5,6970	49,4896	54,3959	8,4034	8,3842
700	7,6754	7,6754	6,1538	6,1353	53,2965	58,5802	9,0498	9,0292
750	8,2237	8,2237	6,5934	6,5735	57,1034	62,7645	9,6962	9,6741
800	8,7719	8,7719	7,0330	7,0117	60,9103	66,9488	10,3426	10,3191
850	9,3202	9,3202	7,4725	7,4500	64,7172	71,1331	10,9890	10,9640
900	9,8684	9,8684	7,9121	7,8882	68,5241	75,3174	11,6354	11,6089
950	10,4167	10,4167	8,3516	8,3264	72,3310	79,5017	12,2818	12,2539
1000	10,9649	10,9649	8,7912	8,7646	76,1379	83,6860	12,9282	12,8988
1050	11,5132	11,5132	9,2308	9,2029	79,9448	87,8703	13,5747	13,5438
1100	12,0614	12,0614	9,6703	9,6411	83,7517	92,0546	14,2211	14,1887
1150	12,6096	12,6096	10,1099	10,0793	87,5586	96,2389	14,8675	14,8336
1200	13,1579	13,1579	10,5495	10,5176	91,3655	100,4232	15,5139	15,4786
1250	13,7061	13,7061	10,9890	10,9558	95,1724	104,6075	16,1603	16,1235
1300	14,2544	14,2544	11,4286	11,3940	98,9793	108,7918	16,8067	16,7685
1350	14,8026	14,8026	11,8681	11,8323	102,7861	112,9761	17,4531	17,4134
1400	15,3509	15,3509	12,3077	12,2705	106,5930	117,1604	18,0995	18,0584
1450	15,8991	15,8991	12,7473	12,7087	110,3999	121,3447	18,7460	18,7033
1500	16,4474	16,4474	13,1868	13,1470	114,2068	125,5290	19,3924	19,3482
1550	16,9956	16,9956	13,6264	13,5852	118,0137	129,7133	20,0388	19,9932
1600	17,5439	17,5439	14,0659	14,0234	121,8206	133,8976	20,6852	20,6381
1650	18,0921	18,0921	14,5055	14,4617	125,6275	138,0819	21,3316	21,2831
1700	18,6404	18,6404	14,9451	14,8999	129,4344	142,2662	21,9780	21,9280
1750	19,1886	19,1886	15,3846	15,3381	133,2413	146,4505	22,6244	22,5729

1800	19,7368	19,7368	15,8242	15,7764	137,0482	150,6348	23,2708	23,2179
1850	20,2851	20,2851	16,2637	16,2146	140,8551	154,8191	23,9173	23,8628
1900	20,8333	20,8333	16,7033	16,6528	144,6620	159,0034	24,5637	24,5078
1950	21,3816	21,3816	17,1429	17,0911	148,4689	163,1877	25,2101	25,1527
2000	21,9298	21,9298	17,5824	17,5293	152,2758	167,3720	25,8565	25,7976
2050	22,4781	22,4781	18,0220	17,9675	156,0827	171,5563	26,5029	26,4426
2100	23,0263	23,0263	18,4615	18,4058	159,8896	175,7406	27,1493	27,0875
2150	23,5746	23,5746	18,9011	18,8440	163,6965	179,9249	27,7957	27,7325
2200	24,1228	24,1228	19,3407	19,2822	167,5033	184,1092	28,4421	28,3774
2250	24,6711	24,6711	19,7802	19,7205	171,3102	188,2935	29,0886	29,0223
2300	25,2193	25,2193	20,2198	20,1587	175,1171	192,4778	29,7350	29,6673
2350	25,7675	25,7675	20,6593	20,5969	178,9240	196,6621	30,3814	30,3122
2400	26,3158	26,3158	21,0989	21,0352	182,7309	200,8464	31,0278	30,9572
2450	26,8640	26,8640	21,5385	21,4734	186,5378	205,0307	31,6742	31,6021
2500	27,4123	27,4123	21,9780	21,9116	190,3447	209,2150	32,3206	32,2471
2550	27,9605	27,9605	22,4176	22,3499	194,1516	213,3993	32,9670	32,8920
2600	28,5088	28,5088	22,8571	22,7881	197,9585	217,5836	33,6134	33,5369
2650	29,0570	29,0570	23,2967	23,2263	201,7654	221,7678	34,2599	34,1819
2700	29,6053	29,6053	23,7363	23,6646	205,5723	225,9521	34,9063	34,8268
2750	30,1535	30,1535	24,1758	24,1028	209,3792	230,1364	35,5527	35,4718
2800	30,7018	30,7018	24,6154	24,5410	213,1861	234,3207	36,1991	36,1167
2850	31,2500	31,2500	25,0549	24,9792	216,9930	238,5050	36,8455	36,7616
2900	31,7982	31,7982	25,4945	25,4175	220,7999	242,6893	37,4919	37,4066
2950	32,3465	32,3465	25,9341	25,8557	224,6068	246,8736	38,1383	38,0515
3000	32,8947	32,8947	26,3736	26,2939	228,4137	251,0579	38,7847	38,6965
3050	33,4430	33,4430	26,8132	26,7322	232,2205	255,2422	39,4312	39,3414
3094	33,9254	33,9254	27,2000	27,1178	235,5706	258,9244	40,0000	39,9090
3100	33,9912	33,9912	27,2527	27,1704	236,0274	259,4265	40,0776	39,9863
3150	34,5395	34,5395	27,6923	27,6086	239,8343	263,6108	40,7240	40,6313
3200	35,0877	35,0877	28,1319	28,0469	243,6412	267,7951	41,3704	41,2762
3250	35,6360	35,6360	28,5714	28,4851	247,4481	271,9794	42,0168	41,9212
3300	36,1842	36,1842	29,0110	28,9233	251,2550	276,1637	42,6632	42,5661
3350	36,7325	36,7325	29,4505	29,3616	255,0619	280,3480	43,3096	43,2111
3400	37,2807	37,2807	29,8901	29,7998	258,8688	284,5323	43,9560	43,8560
3450	37,8289	37,8289	30,3297	30,2380	262,6757	288,7166	44,6025	44,5009
3500	38,3772	38,3772	30,7692	30,6763	266,4826	292,9009	45,2489	45,1459
3550	38,9254	38,9254	31,2088	31,1145	270,2895	297,0852	45,8953	45,7908

GSD-NIIRS -vertailutaulukko

GSD	alle 10 cm	10-20 cm	20-40 cm	40-75 cm	75-120 cm	120-250 cm	250-450 cm	450-900 cm	yli 900 cm
NIIRS	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	Erottaa yksittäiset ruuvit, pulkit ja niitit	Tunnistaa pommikoneen niittilinjan	Tunnistaa yksityiskohtia ja muotoja hävittäjälentokoneista	Tunnistaa antennien muodot (parabolien, suorakaide)	Erottaa toistaan ajoneuvo- tai perävaunualustaisen tutkan.	Tunnistaa suuret hävittäjät mallin tarkkuudella (esim. Fencer, F-15, F-18)	Tunnistaa suuren lentokoneen siipien muodon.	Havaitsee suuret lentokonesuojat	Keskikokoinen satama
	Havaitsee antennin sa olevat keraamiset eristeet	Tunnistaa olkapääohjauksen (esim. STINGER, STRELA, IGLA)	Erottaa portaita, tikapuita ja tuuletusaukkoja	Tunnistaa keskikokoinen kuorma-auton varapyörän	Tunnistaa tyyppin mukaan ballististen ohjusten laukaisualustat (esim. 9K79)	Havaitsee yksittäisen suuren tutka-antennin	Havaitsee helikopterin laskeutumisalustan	Havaitsee suuret tutka-asemat (esim. AN/FPS 108 COBRA DANE, PECHORA, HENHOUSE)	Erottaa rullausten kiitotiestä suurella lentokentällä
	Erottaa autojen rekisterinumero	Erottaa liitokset ja hitsausaummat.	Havaitsee panssarintorjuntaohjuksen kiinnityskohtaan (Esim. panssarivaunun kannelta)	Tunnistaa automallin	Tunnistaa ilmavalvontatutkan tyyppit suurilla sota-alueilla.	Tunnistaa yleisellä tasolla tela-ajoneuvot, kenttätykistön, silta-/ponttoniajoneuvot, suuret pyörä-ajoneuvot	Tunnistaa suurten pintalusten tyyppin (esim. hävittäjä, apualue, kaupallinen alus)	Havaitsee sotaharjoitusalueet	
	Havaitsee nosturin vajjerin	Erottaa yksittäisen rautatien				Havaitsee avoimen ohjussiilon luukun	Havaitsee rautatiellä liikkuvan junan (mutta ei erota yksittäisiä vaunuja)	Havaitsee suuret rakennukset.	
	Erottaa ajoneuvon tuulilasinpyyhkijät					Tunnistaa yksittäiset tiet, kaksi- tai useampikiskoisien rautatien, vartiotornit			

Materiaalien tuhoutumiseen tarvittavat intensiteetit

	Alumiini	Hiilikuitu	Polykarbonaatti	ABS
Aika (s)/Energia(J)	36574	126764	368	170
1	7449	25818	75	35
2	3724	12909	37	17
3	2483	8606	25	12
4	1862	6454	19	8,7
5	1490	5164	15	6,9
6	1241	4303	12	5,8
7	1064	3688	11	4,9
8	931	3227	9,4	4,3
9	828	2869	8,3	3,8
10	745	2582	7,5	3,5
Aika (s) / Lähtöteho (W)				
1	36574	126764	368	170
2	18287	63382	184	85
3	12191	42255	123	57
4	9144	31691	92	43
5	7315	25353	74	34
6	6096	21127	61	28
7	5225	18109	53	24
8	4572	15846	46	21
9	4064	14085	41	19
10	3657	12676	37	17

Intensiteetit on laskettu kaavalla:

$$I = \frac{P}{A} = \frac{E}{A \cdot t}$$

Laskuissa on käytetty pinta-alan arvona 491 mm², joka on muunnettu muotoon 4,91 cm². Näin ollen intensiteetin yksikkö on muodossa W/cm².

Intensiteetin muodostamiseen tarvittavat tehot on laskettu kaavalla:

$$P = \frac{E}{t}$$

Lyhenteet ja määritelmät

Miehittämätön ilma-alus

Miehittämättömällä ilma-aluksella tarkoitetaan siviili-, viranomais- tai sotilaskäyttöön tarkoitettua lentävää laitetta, jonka kyydissä ei ole miehistöä. Miehittämätön ilma-alus voi lentää itsenäisesti sille määritellyn reitin mukaisesti tai kauko-ohjaimella ohjattuna. [78] Siviilikäyttöön suunnitellut ilma-alukset ovat pääsääntöisesti pienempiä, heikommin suojattuja ja edullisempia kuin sotilas- tai viranomaiskäyttöön suunnitellut ilma-alukset. Termi kattaa helikopterityypit, multikopterit ja kiinteäsiipiset miehittämättömät ilma-alukset. Synonyymejä tai lähes samaa tarkoittavia termejä ovat UAV (Unmanned Aerial Vehicle), UAS (Unmanned Aerial System), drone, lennokki.

Lennokki

Tässä tutkimuksessa termi kattaa miehittämättömät ilma-alukset riippumatta siitä, ovatko ne kiinteä- vai pyöriväsiipisiä.

Elektromagneettinen säteily/sähkömagneettinen säteily

Sähkömagneettinen säteily on etenevää aaltoliikettä, joka etenee valon nopeudella c . Sähkömagneettinen säteily voi edetä väliaineessa tai tyhjiössä. Aallonpituuden λ ja taajuuden f tulo vastaa etenemisnopeutta, sähkömagneettisen säteilyn tapauksessa siis valon nopeutta c . Sähkömagneettinen säteily voidaan esittää kaavalla $c = f\lambda$, jossa taajuus on määrätty, kun tunnetaan aallonpituus ja päinvastoin. [9; 19]

DEW

Directed Energy Weapons, eli suunnatun energian aseet. Käsitteellä tarkoitetaan ei-kineettiseen vaikuttamiseen perustuvia asejärjestelmiä tai -teknologioita, joissa toimitetaan energiaa jossakin muodossa suoraan haluttuun kohteeseen. Suunnatun energian aseet voidaan jakaa suuren tehon mikroaaltoaseisiin ja laseraseisiin [15, s. 3]

HPM

High Power Microwave, mikroaalloilla toimivat, suuritehoiset, aseet. Voidaan rajata vaikutusta tiettyyn suuntaan, mutta ei kuitenkaan yhtä tarkasti kuin laser- tai kineettisillä asejärjestelmillä. Mikroaaltoaseiden toiminta perustuu kohteen elektroniikan tuhoamiseen tai häiritsemiseen sähkömagneettisilla pulsseilla.

HEL

High Energy Laser. Tähän luokkaan kuuluvat aseet perustuvat suurella teholla toimivaan laseriin. Laserin tuhovaikutus perustuu sokaisuun, sähköjärjestelmien lamauttamiseen tai koko kohteen tuhoamiseen lämmittämällä se korkeaan lämpötilaan.

HPRF

High Power Radio Frequency. Termillä tarkoitetaan yleisesti suurella teholla toimivia, sähkömagneettisia aseita. Termi on harvoin käytössä ja rinnastetaan usein HPM-aseisiin. [22]

CUAS

Counter Unmanned Aerial System. Miehittämättömien ilma-alusten torjunta. Sisältää kaikki vastatoimet uutta ja kehittyvää suorituskykyä, lennokkeja, vastaan. Voidaan toteuttaa ampuamalla lennokkia kineettisillä tai suunnatun energian aseilla, elektronisella vaikuttamisella lennokkiin tai ohjaussignaaliin tai vaikuttamalla suoraan lennokkia lennättävään henkilöön.

Sensori

Tässä tutkimuksessa sensorilla tarkoitetaan tavallista päiväkameraa, koska kaikissa esimerkkilennokeissa on tai niihin on saatavilla valokuvia sekä videokuvaa ottava kamera.

Uhka	Mitä lennokilla pyritään saavuttamaan?	Torjuntaetäisyys	Lennoikin toimintaa rajoittavat tekijät	Torjuntaan vaikuttavat tekijät
Tiedustelu	Selvittää lennoikin sensoreiden avulla kohteella tapahtuvaa toimintaa, henkilöstöä tai kalustoa.	Satoja metrejä → kilometrejä	<ul style="list-style-type: none"> - Vaatii hyvän näkyvyyden kohteelle - Kova tuuli heikentää lennoikin vakautta - Lennoikilla on rajallinen kyky kantaa sensorin lisäksi muuta hyötykuormaa 	<ul style="list-style-type: none"> - Puolustusvoimista säädetyn lain 15§ sallii voiman käytön, mikäli lennokka aiheuttaa vaaraa Puolustusvoimille - Poliisi saa puuttua sivullisia vaarantavan lennoikin kulkuun poliisilain 11§:n perusteella.
Epäsuora	<ul style="list-style-type: none"> - Lennättäjän vahinko tai lennätysvirhe, jonka johdosta lennokka törmää henkilöön tai materiaaliin tai aiheuttaa vaaraa ilmailulle. - Torjunnan seurauksena putoavan lennoikin aiheuttama vaaratilanne. 	Kosketusetäisyys	<ul style="list-style-type: none"> - Lennoikin varsinainen tehtävä (kuten tiedustelu) on epäonnistunut - Lennokka on havaittu tai havaitaan viimeistään sen aiheutettua vaaratilanteen 	<ul style="list-style-type: none"> - Kansainvälisten lakien perusteella vain ihmisen sokaisemiseen tarkoitetut suunnatun energian aseet ovat kiellettyjä - Suuritehoiset suunnatun energian aseet aiheuttavat riskin siviili- ja sotilasilmailulle.
Aseellinen	<ul style="list-style-type: none"> - Lennokkiin lisätty räjähdysaine, ase tai muu väline, jolla on tarkoitus vahingoittaa henkilöstöä tai materiaalia. - Muuttamaton lennokka, jolla lennetään tarkoituksella esimerkiksi helikopterin reitille tai päin jotakin kohdetta. 	Kosketusetäisyys → kymmeniä metrejä	<ul style="list-style-type: none"> - Lennokkiin lisätty kuorma heikentää sen toiminta-aikaa ja lento-ominaisuuksia → Aikaa kohteella toimimiseen ei jää paljoa - Lennoikilla on päästävä lähelle kohdetta 	<ul style="list-style-type: none"> - Suunnatun energian aseiden kantama on korkeintaan muutamia kilometrejä - Etenkin pienten lennokkien havaitseminen ja maalinosoittaminen vaativat järjestelmältä suorituskykyä