



FFI Forsvarets
forskningsinstitutt

21/02754

FFI-RAPPORT

Laservåpen

– analyse av utvalgte anvendelser

Espen Lippert

Laservåpen

– analyse av utvalgte anvendelser

Espen Lippert

Emneord

Laservåpen

Droner

Modellering og simulering

FFI-rapport

21/02754

Prosjektnummer

1438

Elektronisk ISBN

978-82-464-3393-6

Engelsk tittel

Laser weapons – an analysis of selected applications

Godkjennerne

Halvor Bjordal, *forskningsleder*

Halvor Ajer, *forskningssjef*

Dokumentet er elektronisk godkjent og har derfor ikke håndskreven signatur.

Opphavsrett

© Forsvarets forskningsinstitutt (FFI). Publikasjonen kan siteres fritt med kildehenvisning.

Sammendrag

Utviklingen av laservåpen har foregått helt siden 60-tallet, men var lenge preget av at det var en løsning som hele tiden lå ti år frem i tid. Ambisjonene var store, men teknologien var upraktisk og resultatene var ikke tilfredsstillende. Det siste tiåret har det imidlertid skjedd en markant dreining mot mer praktisk teknologi i form av elektrisk drevne lasere, og mot mindre ambisiøse anvendelser. I denne rapporten skal vi analysere to anvendelser: Forsvar mot dronesvermer og forsvar mot kryssermissiler. Den første anvendelsen har helt klart et lavt ambisjonsnivå, mens den andre er i det øvre ende av skalaen av det som fremstår som realistisk.

Vi benytter et enkelt modellmiljø hvor bare de viktigste fenomenene som påvirker laservåpensystemets effektivitet er tatt med i betraktning. Til tross for dette tror vi analysen vil kunne gi et første inntrykk av hvilken virkning et laservåpensystem kan ha, og hvilke krav som vil stilles til det i form av lasereffekt og evne til å levere energi på målet.

Vi studerer både små droner, som flyr sakte og er sårbare, og noe større droner som flyr fortere og tåler mer. Konklusjonen når det gjelder de små dronene er at man i selvforsvar kan ta ut flere titalls droner uten store krav til lasersystemet, men at rekkevidden vil være begrenset til noen veldig få kilometer. Det kan virke som laservåpen kan være svært egnet i forsvar mot svermer av små droner. Mot større droner er ikke effektiviteten like god, og konvensjonelle våpen kan være like relevante side disse truslene er betydelig større.

I anvendelsen mot kryssermissiler så er utfordringen mye større. Man vil kreve et mye kraftigere laservåpen og virkningen er høyst usikker, særlig i et selvforsvarsscenario hvor man må angripe rett forfra der missilet må antas å være nokså robust. Det fremstår derimot som enklere å forsvare andre gjennom å ta ut missiler som passerer. Missilet er ikke like robust fra denne vinkelen, og på grunn av geometrien i angrepet så har man også noe bedre tid til rådighet. Med et lasersystem med noen hundre kW i utgangseffekt er det ikke urealistisk at noen lasere kan beskytte et område på noen få kilometer i utstrekning.

Summary

Development of laser weapons has been going on since the sixties, but for a long time it was a solution always ten years into the future. The ambitions were high, but the technology was impractical, and the results not satisfactory. However, in the last decade there has been a clear shift towards more practical technology in the form of electrically driven lasers, and less ambitious applications. In this report, we will analyze two such applications: Defense against drone swarms and defense against cruise missiles. The first has quite clearly a low ambition level, while the second one seems to be in the high end of the scale of realistic performance.

We are using a simple modelling environment, where only the most important phenomena influencing the effectiveness of the laser system, are taken into account. In spite of this, we believe that the analysis gives a first impression of the effectiveness that can be expected from a laser system, and which requirements that are placed on the system in terms of laser power and ability to deliver energy density on the target.

We study both small drones, which fly slowly and are vulnerable, and bigger drones flying faster and being less vulnerable. Regarding the small drones, the conclusion is that in self-defense it is possible to take out tens of drones without any difficult demands placed on the laser system, but the range will be limited to some very few kilometers. It seems that laser weapons can be very well suited in defense against swarms of small drones. Against larger drones, however, laser weapons are not as efficient. Conventional weapons might be just as relevant, since the threat systems are significantly larger.

When applying laser weapons in cruise missile defense, the challenge is much greater. You would need a much more powerful laser system, and the effect is very uncertain, especially in self-defense where you have to attack the missile head-on, where the missile must be assumed to be very robust. However, it seems simpler to defend others by taking out missiles passing by. From the side the missile is probably less robust, and due to the geometry, the engagement time can be longer. Using a laser system with a few hundred kW of laser power, it is not unlikely that a few laser carrying platforms can protect an area of a few kilometers in size.

Innhold

Sammendrag	3
Summary	4
1 Innledning	6
2 Laser som våpen	7
3 Droneforsvar med laservåpen	8
3.1 Forsvar mot dronesverm	9
3.2 Forsvar mot patruljerende stridshoder	12
4 Forsvar mot kryssermissiler	13
5 Konklusjoner	20
Vedlegg	21
A Modeller	21
A.1 Modell droner og missiler	21
A.2 Skademodell	22
A.3 Effektormodell	23
Referanser	27

1 Innledning

Ideen om at laseren på et eller annet tidspunkt i fremtiden skulle revolusjonere krigføring har vært med oss nærmest siden før laseren ble oppfunnet gjennom historier om strålevåpen i populærkulturen. Etter at laseren første gang ble demonstrert i 1960, tok det ikke lang tid før man startet forskningsprogrammer som hadde som mål å utvikle laservåpen med tildeles høye ambisjoner for ytelse. Under den kalde krigens mest intense periode var hovedfokuset på nedskyting av missiler på lang avstand, og for å kunne oppnå høye nok effekter satset man etter hvert på lasere som benyttet kjemiske reaksjoner som energikilde. Logistikken knyttet til disse kildene var svært krevende og systemene ble store og hadde begrenset utholdenhet. Dette utviklingsløpet kulminerte med skrotingen av programmet Airborne Laser i 2011. Da hadde man brukt 16 år og 5 milliarder dollar uten å oppnå tilstrekkelig ytelse [1].

Skrotingen av dette programmet ble et effektivt punktum for kjemiske lasere til laservåpenbruk, i hvert fall fra amerikansk side. Dette åpnet for muligheten til å satse på skalering av lasere som kunne drives direkte med strøm. Samtidig ble slike lasere også aktuelle i industrielle anvendelser, spesielt innen bilindustrien. Kombinert med at man nå også så på mindre ambisiøse anvendelser så fikk satsningen på laservåpen ny vind i seilene og ble samtidig en mulighet for andre nasjoner enn USA.

Til en viss grad er laservåpen fortsatt en løsning med flere nye egenskaper som er attraktive i militære anvendelser, som vi skal komme tilbake til i neste kapittel, men uten at det peker seg ut en «killer application». Snarer er det mange områder der det kanskje kan løse utfordringer på en ny og bedre måte enn mer konvensjonelle våpen.

I motsetning til tidligere satsninger, hvor målet har vært å løse oppgaver hvor det ikke fantes andre løsninger og man utnyttet laserens evne til å engasjere svært raske mål på lang avstand, så er den viktigste egenskapen nå den lave kostnaden forbundet med hver enkelt salve. Det argumenteres med at dette kan bryte den negative kostnadsspiralen hvor enkle trusler i stort antall krever stadig dyrere motmidler, noe som effektivt kan gjøre kostnadene for høye ved å operere i områder med slike trusler. En av de truslene som trekkes frem i slik sammenhenger er små droner som operere i svermer, og vi har derfor valgt å studere effekten av laservåpen mot denne trusselen.

FFI har i mange år fulgt utviklingen av laservåpen og utgitt rapporter som gir status for de kjente laservåpenprogrammene [2-5]. I 2016 startet FFI et prosjekt med ambisjon om å gjøre egne studier og utviklingsarbeider rettet mot laservåpen, og denne rapporten er del av dette prosjektet, og vil på bakgrunn av det man har lært om laservåpen i prosjektet forsøke å gjøre en første enkel analyse av effekten laservåpen kan ha i noe utvalgte scenarioer. Men først vil vi belyse de relevante egenskapene lasere har når de brukes som våpen.

2 Laser som våpen

I dette kapittelet vil vi forsøke å oppsummere egenskapene ved en laser som er relevante når den benyttes som en effektor i et våpensystem. Det er her naturlig å peke på hvordan den skiller seg fra mer konvensjonelle effektorer som benytter kinetisk energi eller sprengstoff til å bekjempe målet.

I kortform kan laserens våpenvirkning beskrives som: *Levering av varme på et lite areal, raskt, med høy presisjon og på betydelig avstand.*

Det er en viktig prinsipiell forskjell mellom måten laservåpen og konvensjonelle våpen overfører energi til målet. Et konvensjonelt våpen overfører energien i stor grad gjennom utveksling av impuls fra prosjektiler eller fragmenter over i målet. Massen og hastigheten til disse gjør at store krefter settes opp som river målet i stykker. Strålingen fra en laser bærer kun med seg helt neglisjerbar masse og impuls, og derfor kan i prinsippet energien reflekteres uten at noen motkrefter oppstår i målet. Den eneste prosessen man har for å overføre energi til målet er absorpsjon som gir oppvarming. En blank metallisk overflate vil ofte ha under 10% absorpsjon, og det mulig å realisere overflater med langt lavere absorpsjon enn dette, uten at det innebærer noe stor ulempe for målet. Denne effekten kan sterkt begrense virkningen til et laservåpen, men kanskje enda viktigere, gjøre effekten av våpenet usikker. Det som gjør at refleksjonsproblemet ikke er like ødeleggende som det synes ved første øyekast, er at selv en liten absorpsjon vil føre til noe oppvarming, og med økende temperatur så vil absorpsjonen øke for de fleste materialer. Denne effekten vil etter en viss tid løpe løpsk slik at det meste av strålingen blir absorbert. Det man da har oppnådd er en terskel i effekt og utsettelse av virkningen i målet, men dette kan, som vi skal se senere, være svært relevant for den operative effekten av et laservåpensystem. For at et laservåpen skal ha en tilfredsstillende våpenvirkning, er det derfor viktig at effekten er høy og at arealet som belyses er lite. En slik presisjon er mulig, og blir lettere jo kortere avstanden er, noe som gjør de fleste laservåpen til et kort-holds våpensystem.

Den tross alt begrensede effekten fra en laser, kombinert med den potensielt utsatte virkningen som beskrevet over, gjør at selv om et laservåpen leverer raskt så vil det ta tid (noen sekunder) før man oppnår virkning. Dette er noe som skiller det fra konvensjonelle våpen som har en nokså umiddelbar virkning når det treffer målet. Én enkelt laser kan heller ikke engasjere mer enn ett mål om gangen; kombinert med betydelig belysningstid på målet så er det derfor en fare for at lasersystemer kan mettes under koordinerte angrep med flere trusler. Vi skal se nærmere på dette i analysen av scenarioene.

Den raske levering av energi, med lysets hastighet, og en ekstrem evne til å følge målets bevegelser skiller laservåpen markant fra konvensjonelle våpen. For å kunne følge målets bevegelser trengs kun små bevegelser i et speil som kan realiseres med høye båndbredder. I praksis vil man ha en situasjon hvor dersom man kan se målet med en optisk sensor, så kan man også engasjere det med et laservåpen.

Som nevnt er et laservåpen best på kort hold. Tiden det tar å levere en gitt energitetthet på målet øker mer enn kvadratisk med avstanden, noe som gjør systemet svært effektivt på korte avstander og raskt dårligere dersom avstanden blir for stor. Hvor store avstander et laservåpen er effektivt på vil selvfølgelig avhenge av lasereffekten og størrelsen på optikken som benyttes. Store linser eller speil vil gjøre det mulig å fokusere strålingen til en mindre flekk på målet og gi høyere intensitet. Dessverre kommer man ganske raskt til en grense der det er turbulensen i atmosfæren og ikke optikken som bestemmer strålestørrelsen på målet. Denne effekten er avhengig av høyden over bakken eller sjøen, og for luftbårne systemer kan rekkevidden tenkes å bli flere ti-talls kilometer, mens i lave høyder vil turbulens begrense rekkevidden til noen få kilometer i de fleste tilfeller.

Som nevnt i innledningen, så er kanskje den mest markante forskjellen på et elektrisk drevet laservåpen og konvensjonelle våpen den ekstremt lave kostnaden per engasjement, det eneste som forbrukes er noen kWh med elektrisk energi. Dersom plattformen er i stand til å produsere og eventuelt lagre denne strømmen, så vil dette gi mulighet for å engasjere nærmest et ubegrenset antall mål.

Til slutt kan det også være relevant å peke på laserens evne til å gi en gradert og kontrollert effekt i målet. Denne graden av kontroll gjør det potensielt mulig å engasjere mål i situasjoner hvor det ikke er mulig å bruke konvensjonelle våpen på grunn av fare for egne styrker eller sivile. På lav effekt kan også systemet brukes til å blende eller ødelegge sensorsystemer som ikke er spesielt beskyttet, men uten at situasjonen eskalerer like fort.

I lys av disse egenskapene vil vi i denne rapporten analysere to anvendelsesområder der laserens styrker kan utnyttes. Dette vil vi gjøre med en forholdsvis enkel modell, men som likevel tar med seg de mest relevante fysiske egenskapene til en slikt våpensystem og den sammenhengen det skal brukes i. Dette vil gi en første indikasjon på hvordan det er realistisk å bruke laservåpen. Vi vil starte med å se på bruk mot droner som prøver å overbelaste et forsvarssystem gjennom et antall simultane angrep. Vi vil også analysere hva man kan forvente av ytelse dersom et laservåpen brukes mot supersoniske kryssermissiler. Begge områdene har fokus på selvforsvar siden det er her nærforsvaregenskapene kommer best til sin rett, men vi vil også se på muligheten for å beskytte andre gjennom en studie av kryssermissiler som passerer forbi.

3 Droneforsvar med laservåpen

I dagens og fremtidens stridsfelt kan droner utgjøre en trussel på flere måter. Ofte så skiller ikke droner seg fra andre trusler fra luften og vil i så måte kunne håndteres effektivt av tradisjonelt luftvern. Men noen typer droner oppfører seg annerledes og har andre egenskaper enn tradisjonelle trusler fra luften, noe som kan gjøre dem utfordrende å håndtere. Den mest

åpenbare forskjellen er størrelse og kostnad. Dette fører til at de kan være krevende å detektere og engasjere, og kan brukes i store antall uten å være veldig resurskrevende. Mot slike trusler kan det være riktig å vurdere om lasere kan spille en rolle på grunn av de lave kostnadene per salve og gode utholdenhet, noe som passer godt med utfordringen samtidig som truslene i utgangspunktet kan forventes å være relativt sårbare for laserstråling.

I analysene har vi benyttet et enkelt simuleringsmiljø hvor dronene beveger seg i rettlinjede forhåndsdefinerte baner med konstant hastighet. I modellen har dronene en skadeterskel i form av en eksponeringsgrense som vi skal komme tilbake til og et radartverrsnitt som gir en deteksjonsavstand for radarsystemet som også er en del av modellen. Når målene er detektert og klassifisert, så prioriteres de etter avstand og gis til et lasereffektorsystem. Dette systemet trenger en viss tid til å engasjere målet. Målet skades da av laserens rate som er avhengig av avstand og målets eksponeringsgrense. Vi skal komme tilbake til noen flere detaljer knyttet til dette simuleringsmiljøet. En grundigere beskrivelse er også gitt i appendiks A.

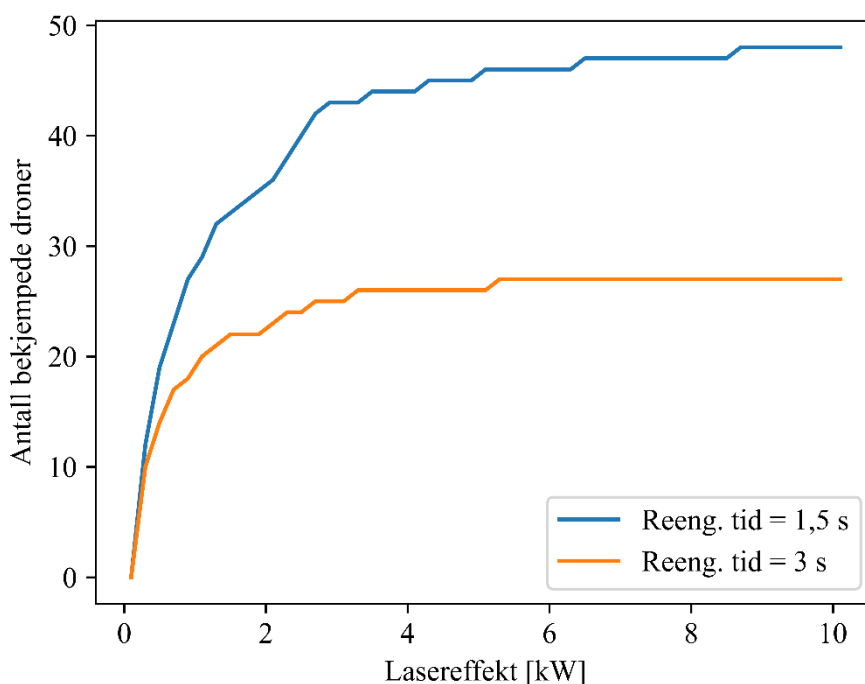
Målet med disse analysene er å gi et første estimat av hvilken lasereffekt som trengs for å stoppe et antall av de forskjellige dronene. Siden modellene er enkle og den detaljerte kunnskapen om dronenes sårbarhet ikke er tilgjengelig, så vil resultatene først og fremst belyse hvilke elementer som er viktige i en slik vurdering. Etter hvert som mer informasjon blir tilgjengelig, så kan modellene oppdateres og analysene gjentas.

3.1 Forsvar mot dronesvern

Droner er en relativt bred betegnelse på ubemannede farkoster ofte med noe grad av autonom oppførsel. I størrelse, hastighet og måte å operere på er variasjonene svært store; helt fra noen centimeter til mange meter, og hastigheter fra noen meter per sekund til høyt subsonisk. Vi skal her se på to typer droner som skiller seg markant både i størrelse og hastighet. For begge er situasjonen at de forsøker å angripe noe som er beskyttet med et laservåpensystem og utstyrt med en egnet sensor for å detektere truslene. Angrepet gjøres synkronisert for å øke penetrasjonsevnen, og vår analyse vil bestå i å studere hvor mange simultant angripende droner forskjellig forsvarssystemer kan håndtere.

I de senere årene har det oftere og oftere blitt omtalt teknologi for små droner som angriper mål på en koordinert måte. Den lave kostnaden av slike systemer gjør at det fremstår som aktuelt for mange statlige og ikke-statlige aktører verden over. Man ser for seg svermer på mange ti-talls små billige droner med sensorer og stridshoder som angriper et mål av høy verdi. I en slik situasjon kan et lasersystem utnytte sin lave kost per engasjement og høye utholdenhet til å bekjempe et stort antall trusler i rask rekkefølge. Vi har i vår analyse antatt at dronene er relativt sårbare, og at det derfor bare trengs 1 kJ/cm^2 for å stoppe dem [6]. Som for alle målene vi har analysert, har vi antatt at denne energitettheten må leveres med en intensitet som vil stoppe dronen i løpet av 10 s for kunne å bidra til å skade dronen. Lavere intensitet enn det antar vi ikke bidrar til å skade målet. Vi har satt det minste strålearealet til 1 cm^2 , selv for korte avstander. Et slikt minste stråleareal fører til to ting; for det første så sikrer det at skaden er stor nok i omfang til å ha en ødeleggende effekt og for det andre så vil ikke bekjempelsestiden bli

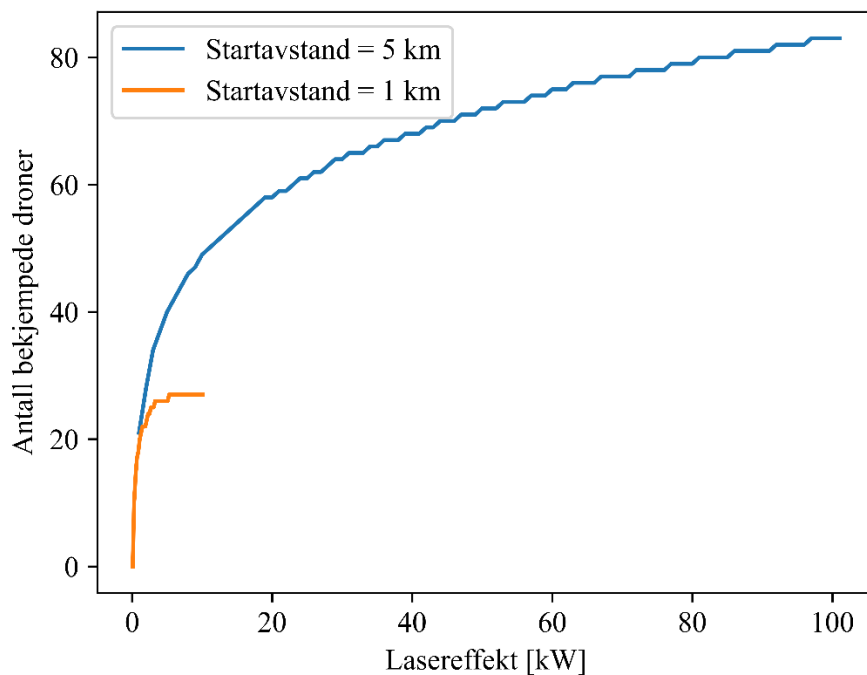
urealistisk kort på små avstander. I sum vil disse to kravene krever at intensiteten må være over 100 W/cm^2 og at totaleffekten på målet må være minst 100 W for å ha noen virkning. Slike små droner vil bevege seg relativt sakte, vi har her antatt 10 m/s . Siden dronene er sårbare så vil en ganske moderat lasereffekt raskt bekjempe en enkelt drone på relevante avstander. Det betyr at antallet droner som kan bekjempes raskt blir begrenset av tiden det tar å flytte seg til et nytt mål for så engasjere det. Vi har her brukt en gjennomsnittsverdi for denne tiden. I realiteten vil den variere avhengig av hvor langt systemet må flytte seg for å nå neste mål. I Figur 3.1 har vi fremstilt antall simultant angripende droner som kan bekjempes for to valgte tider mellom hvert engasjement ($1,5 \text{ s}$ og 3 s). Vi ser at allerede ved 5 kW lasereffekt så er antallet begrenset av denne tiden. Det fremstår som realistisk at den virkelige tiden vil ligge mellom disse verdiene, og at man kan forvente at et slikt system vil kunne bekjempe mellom 25 og 50 slike trusler som angriper simultant. I dette første scenarioet har vi antatt at alle dronene dukker opp på 1 km . Selv om det er å forvente at et egnet radarsystem vil kunne detektere målet på større avstander, så er det ikke urealistisk at de vil kunne holde seg skjult helt til de er nære målet.



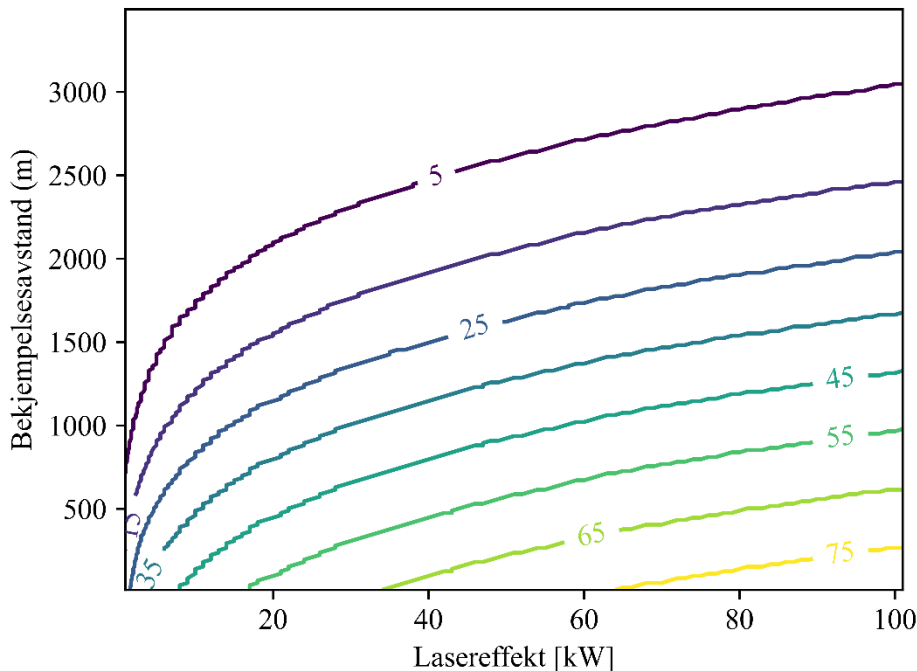
Figur 3.1 Antall bekjempede små droner som funksjon av lasereffekt for to valgte reengasjementstider (Blå: $1,5 \text{ s}$, Rød: 3 s). Dronene dukker opp på 1 km .

For å studere effektivitet i tilfeller der deteksjonsavstanden er sensorbegrenset så har vi brukt radarparametere fra [7] og et radartverrsnitt på $0,02 \text{ m}^2$ som er realistisk for små droner [8]. Dette resulterer i gjennomsnittlig deteksjonsavstand på $3,7 \text{ km}$. Gitt den lave hastigheten til dronen, har man god tid til å ta ut mange droner, men for å kunne utnytte den lange deteksjonsavstanden så må også lasereffekten økes betydelig. Figur 3.2 viser at med 100 kW så kan man bekjempe ca. 80 små droner. For å gi et inntrykk av på hvilken avstand dronene

bekjempes når de starter på 5 km og detekteres på ca. 3,7 km så har vi i Figur 3.3 fremstilt hvor mange droner som har blitt tatt ut på avstander lengre enn en gitt verdi som funksjon av lasereffekt.



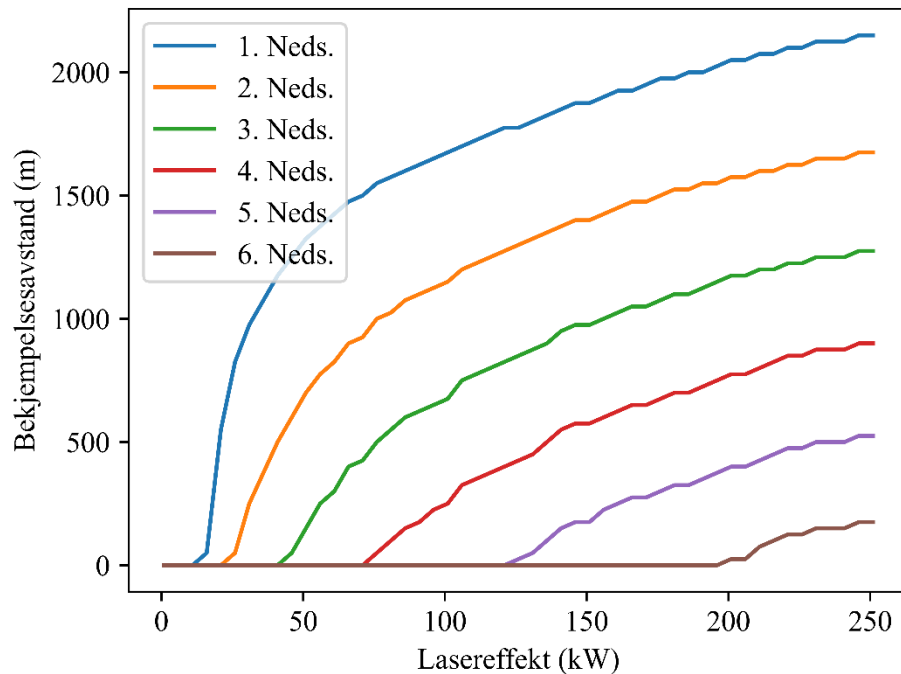
Figur 3.2 *Antall bekjempede små droner som funksjon av lasereffekt for en situasjon med detektorbegrenset deteksjonsavstand. Dronen starter på 5 km, detekteres typisk på 3,7 km.*



Figur 3.3 Antall bekjempede droner på avstander lengre enn en gitt verdi (y-aksen) som funksjon av lasereffekt.

3.2 Forsvar mot patruljerende stridshoder

I det neste tilfellet vil vi se på noe større droner av en type som ofte betegnes som «loitering munitions» eller patruljerende stridshoder. Disse har en betydelig rekkevidde og vil ofte patruljere et område for å angripe oppdukkende mål. Vi antar her at disse angriper med en hastighet på 100 m/s og at de på grunn av sin størrelse (1-2 m) er relativt robuste. Vi har derfor antatt at det trengs 10 kJ/cm² for å stoppe dronen [6]. Med 10 s som maksimal tid å fordele skaden over, vil det kreve at intensiteten må være over 1 kW/cm² for å ha noen virkning på målet. Vi har også brukt 10 cm² istedenfor 1 cm² som minste skadestørrelse. Dette er for å ta høyde for at skaden på den større dronen må være av en viss størrelse for å ha effekt. Resultatet av analysen er vist i Figur 3.4. Vi ser her at antallet droner systemet kan håndtere øker med lasereffekten, men at det etter 50 kW øker relativt sakte. Ved 50 kW så vil man kunne forsvare seg mot tre simultant innkommende droner. Dersom disse ikke er helt synkronisert, men spredd utover i tid, utover det som er tiden systemet trenger for å engasjere en ny trussel, så vil man kunne forsvare seg mot flere. Dersom tiden mellom hver drone er lengre enn tiden det tar å bekjempe den, er det få prinsipielle grenser for hvor lenge systemet kan holde ut. Denne utholdenheten er blant laservåpenets fremste styrker.



Figur 3.4 Avstand for bekjempelse av patruljerende stridshoder for varierende lasereffekt.

Denne enkle analysen av effektiviteten til et tenkt laservåpensystem viser at trusselen fra droner i svermer kan bekjempes relativt effektivt. Særlig for svermer med mange små droner vil nok laservåpen fremstå som et kostnadseffektivt alternativ sammenlignet med mer konvensjonelle løsninger. Det stilles heller ingen veldig strenge krav til effekten fra et laservåpen for denne anvendelsen, man kan bruke lasere utviklet for industrianvendelser, noe som har bidratt til at det finnes flere leverandører av slike våpensystemer allerede.

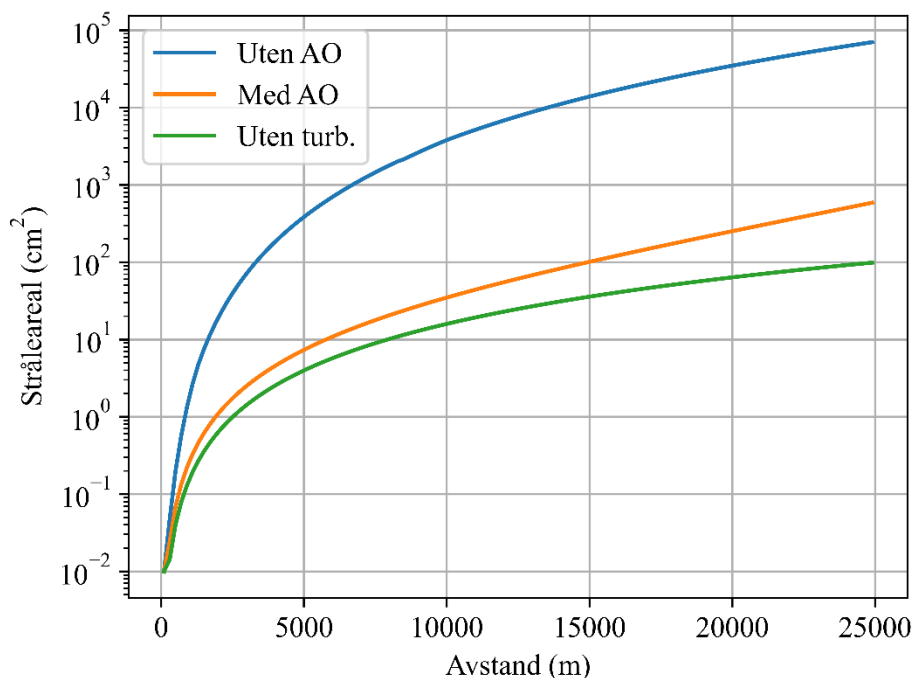
For mer robuste og raskere trusler som f.eks. «loitering munitions» viser vår analyse at laservåpen også kan ha en god effekt. Det vil kreves betydelig mer lasereffekt (50 -100kW), noe som ikke er kommersielt tilgjengelig fra industrisystemer, men det er utviklet systemer med slik effekt som er installert på flere amerikanske fartøy. Laser-systemer med 50 kW utgangseffekt blir også å finne på amerikanske *Stryker* kjøretøyer i løpet av 2022.

4 Forsvar mot kryssermissiler

Forsvar mot kryssermissiler fremstår som en svært krevende oppgave uavhengig av teknologi. Denne trusselen er karakterisert ved relativt store missiler som angriper i potensielt høy

hastighet og med en bane som er så lav at de lenge vil være bak horisonten eller skult av terreng. Hastigheten kan variere fra høy subsonisk til potensielt hypersoniske hastigheter ($> \text{Mach } 5$) [9]. Siden dette er krevende trussel for alle tenkelige forsvarssystemer, så er det nyttig å studere i hvilken grad også laservåpen kan ha en rolle i forsvaret mot slike trusler.

I vår analyse av denne anvendelsen av laservåpen er det mange ukjente faktorer; målet er derfor å peke på hvilke faktorer som er viktige og hvilken innvirkning de vil ha på ytelsen til et lasersystem. Vi har valgt relevante verdier for noen av disse ukjente faktorene, og i noen tilfeller har vi gjort en variasjonsanalyse for å se på effekten de har på forventet ytelse. De to sentrale problemstillingene er; den korte tiden som er tilgjengelig, og på grunn av den høye hastigheten, den store avstanden man må starte engasjementet på. Det er ikke mye åpent tilgjengelig informasjon om ytelsen til relevante radarsystemer mot slike trusler, men vi mener at det er realistisk at de kan detekteres i det de kommer over horisonten. Vi har derfor brukt en deteksjonsavstand på 25 km, noe som ikke fremstår som urealistisk ut fra typiske høyder på radarsystemer og flukthøyder for slike missiler. Det er svært krevende for et laservåpensystem å ha effekt på målet helt ut til 25 km. I første omgang så er det turbulensen som vil begrense rekkevidden. Selv med moderat turbulens blir strålearealet over 1000 cm^2 allerede ved ca. 7 km. Påvirkningen fra turbulens kan reduseres gjennom bruk av et adaptivt turbulenskorreksjonssystem, noe som kan bli nødvendig for denne anvendelsen. I et slikt system har man et sensorsystem som kan måle turbulenspåvirkningen frem til målet og en adaptiv optisk komponent som er i stand til å helt eller delvis å korrigere for den målte påvirkningen [10]. Det er mange komponenter som inngår i beregningen av effektiviteten av slike korreksjonssystemer, noe av dette er diskutert i appendiks A.3. I prinsippet kunne et slikt system gi ytelse helt til 25 km, dersom man greide å realisere det fulle potensialet i en slik teknologi, men likevel vil ikke rekkevidden bli så lang i praktiske situasjoner da spredning og absorpsjon i atmosfæren vil dempe strålen betydelig på slike avstander, nesten uansett hvor gode siktforhold det er. Som beskrevet i appendiks A.3.3 har vi i denne analysen gjort noen optimistiske, men realiserbare, antagelser knyttet til ytelsen av et turbulenskorreksjonssystem. I Figur 4.1 har vi fremstilt hvordan strålearealet øker med avstand med og uten et effektivt turbulenskorreksjonssystem.

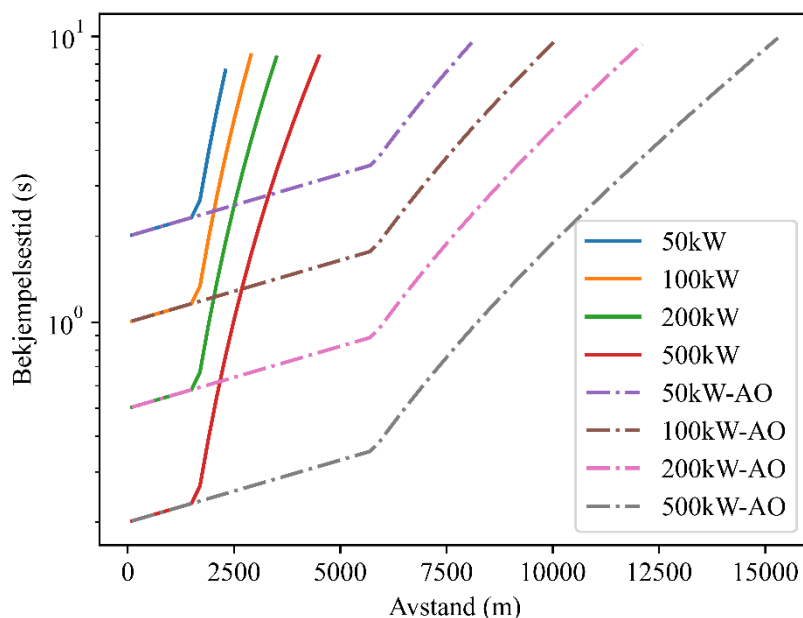


Figur 4.1 Stråleareal på målet som funksjon av avstand uten turbulenskorreksjon (blå), med turbulenskorreksjon (rød) og uten turbulens (grønn). Strålen har en diameter på 15 cm ved laseren og det er antatt en moderat turbulens.

Fra strålearealet, eksponeringsgrensen for skade og transmittansen kan tiden en gitt lasereffekt trenger på å bekjempe målet enkelt beregnes i vår modell. Dette er vist for en rekke lasereffekter, med og uten turbulens korreksjon i Figur 4.2. Her har vi antatt at eksponeringsgrensen til missilet er 10 kJ/cm² og at dempningen i atmosfæren på laserbølgelengden er 10 % per km, noe som tilsvarer relativt klare forhold uten å være urealistisk [11]. På lange avstander ser vi at bekjempelsestiden øker raskt. På kortere avstander øker bekjempelsestiden saktere i vår modell. Dette er fordi vi har satt en nedre grense for stråleareal på målet. Dette gjør at bekjempelsestiden bare øker på grunn av tap i atmosfæren som er her ganske lite. Derfor får vi en «knekk» i kurvene i Figur 4.2.

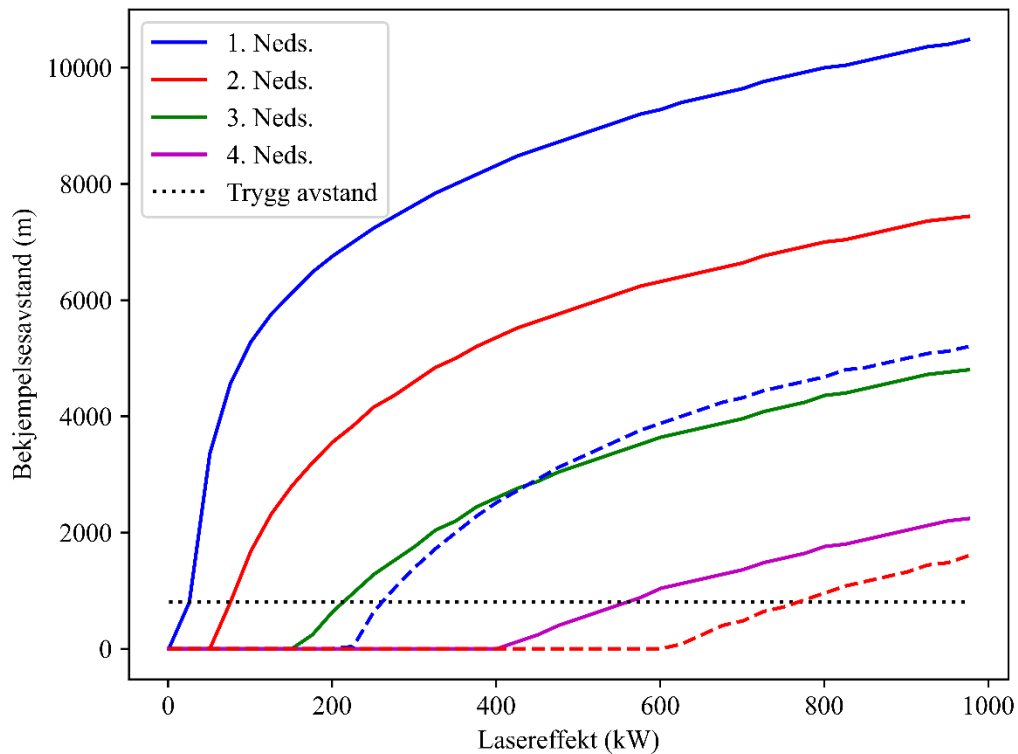
I et scenario hvor man skal forsvare seg mot innkommende kryssermissiler, må man angripe de rett forfra. De eksponerte flatene vil da nødvendigvis også være de flatene som er mest utsatt for aerodynamisk oppvarming og trykk. Disse vil derfor være robustifiserte for å kunne håndtere høy temperatur og det er derfor svært usikkert om antagelsen om 10 kJ/cm² eksponeringsgrense vil være relevant. Supersoniske missiler vil også ha et spisst neseparti, og på grunn av vinkelen mellom strålen og overflatene i nesepartiet vil strålens areal på målet øke betydelig. I sum er det ikke umulig at dette gir en skadeterskel som er en faktor 10 høyere enn vårt første estimat. Dessverre er det vanskelig å fastslå dette uten å gjøre målinger på de aktuelle strukturene. I Figur 4.2 finnes maksimal rekkevidde med 100 kJ/cm² eksponeringsgrense i vår modell ved å finne punktene som har en bekjempelsestid på 1s. Dette vil bli til 10 s siden bekjempelsestiden

er proporsjonal med skadeeksponeringen. Vi ser da at rekkevidden vil reduseres til det halve. I den videre analysen vil vi gjøre analyser for begge disse ytterverdiene.



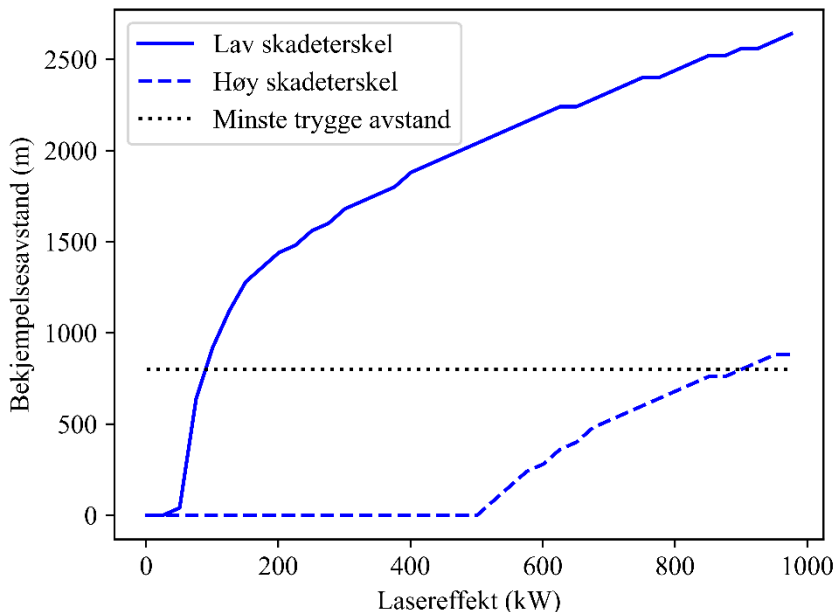
Figur 4.2 Tid som kreves for å bekjempe et mål med skadefluens på 10 kJ/cm^2 . Med og uten turbulenskorreksjon (AO).

I Figur 4.3 har vi vist bekjempelsesavstand som funksjon av lasereffekt, og for de to ytterpunktene i eksponeringsgrense. Laserstrålen vil ikke nødvendigvis stoppe missilet veldig effektivt selv om det setter det ut av spill. Derfor bør missilet bekjempes på en viss avstand for at man skal være relativ trygg. Hvilken avstand dette må være er vanskelig å si noe sikkert om. Vi har i Figur 4.3 indikert en avstand på 800 m som er det missilet vil fly på 1 s, uten at vi har noe sterkt grunnlag for en slik antagelse. Vi ser at den store usikkerheten i skadefluens har stor betydning for hvor effektivt et laservåpen kan være. Figuren viser at med lasereffekt på 200 kW så vil tre mål med 10 kJ/cm^2 eksponeringsgrense kunne stoppes, men dette ikke vil være nok til å stoppe noen med 100 kJ/cm^2 i eksponeringsgrense. Effektnivået må da økes betydelig, men med over 600 kW kan man stoppe to missiler med denne høye skadeterskelen og fire missiler med den lave skadeterskelen.



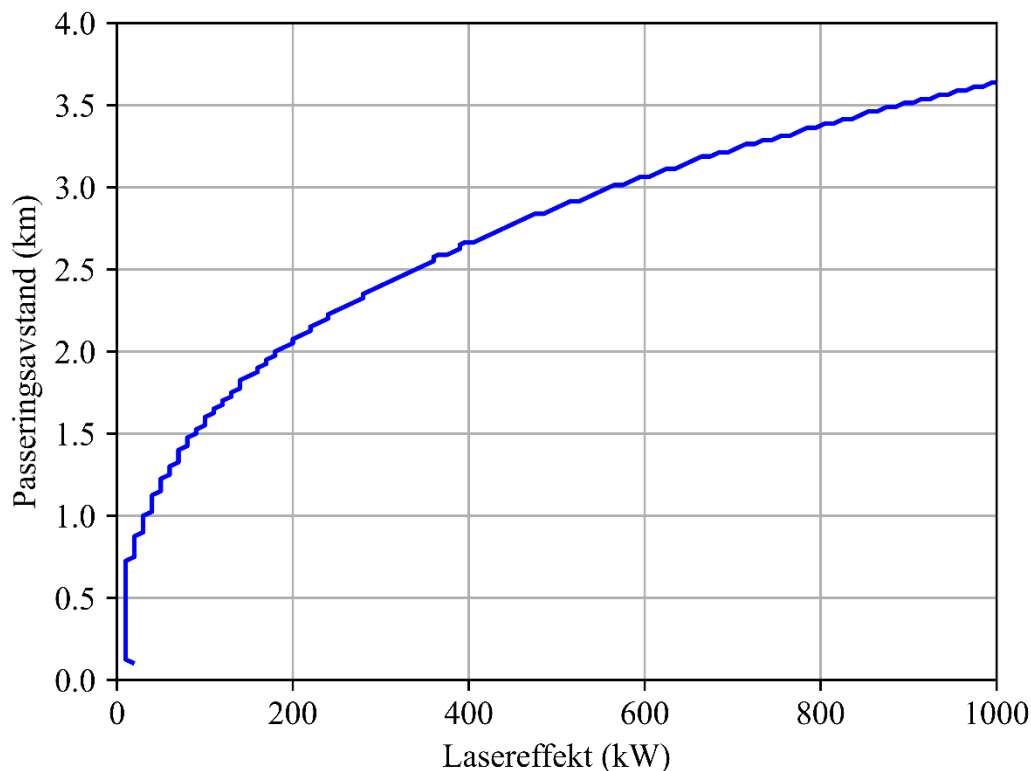
Figur 4.3 Bekjempelsesavstand som funksjon av lasereffekt med effektiv turbulenskorreksjon. Fargene representere rekkefølgen missilene engasjeres. De heltrukne linjene er med antagelse om 10 kJ/cm^2 eksponeringsgrense, mens de stiplede linjene er med 100 kJ/cm^2 . Den prikkede svarte linjen representere en tenkt trygg avstand.

Disse simuleringene er gjort med en antagelse om et effektivt turbulenskorreksjonssystem. Uten dette blir ytelsen svært mye dårligere. Dette er vist i Figur 4.4 og vi ser at mot den lave skadeterskelen vil man kunne ta ut ett missil fra 100 kW, mens man må opp mot 1 MW for å kunne få til det samme mot den høye skadeterskelen. Det er derfor svært usikkert om det er mulig å forsvare seg mot et supersonisk kryssermissil med et lasersystem som ikke har turbulenskorreksjon.



Figur 4.4 Bekjempelsesavstand som funksjon av lasereffekt uten turbulenskorreksjon. De heltrukne linjene er med antagelse om 10 kJ/cm^2 eksponeringsgrense, mens de stiplede linjene er med 100 kJ/cm^2 . Den prikkede svarte linjen representere en tenkt trygg avstand.

Så langt har vi studert selvforsvar med laservåpen, og konklusjonene er avhengig av hvor robust et missil er og i hvilken grad man effektivt kan korrigere for turbulens. Man kan også se for seg situasjoner der man kan bruke laservåpen til å beskytte andre mål. Da vil missilet passere forbi laseren i en eller annen avstand. I denne situasjonen vil man kunne belyse deler av missilet som ikke er like robust og man vil få en mer gunstig vinkel mot missilets overflate. Det er derfor sannsynlig at eksponeringsgrensen på 10 kJ/cm^2 er mer realistisk i denne situasjonen. Man har også noe mer tid til rådighet før det igjen er utenfor rekkevidde. Det vil også her være ønskelig med turbulenskorreksjon for å kunne være effektiv på lengre avstander, men i denne geometrien oppstår det en ekstra utfordring knyttet til hastighet gjennom lufta som ikke er like relevant i selvforsvarsscenarioet. Vind gjør at turbulensen endrer seg hurtig, jo høyere vindhastighet jo høyere båndbredde må systemet ha. Når man skal følge et missil som passerer forbi, vil den gjennomsnittlige vindhastigheten øke fra null og helt opp til halve missilhastigheten i det missilet passerer. Med så høye effektive vindhastigheter er det umulig for et turbulenskorreksjonssystem å følge med, derfor vil man i dette scenariet få liten nytte av turbulenskorreksjon. Vi har her sett på hvor lang avstand missilet kan passere på uten å slippe forbi laseren. Resultatene, vist i Figur 4.5, indikere at med 200 kW så kan et lasersystem stoppe et missil som passerer 2 km fra laseren. Med slike avstander er det mulig å beskytte et mål eller område med et lite antall lasersystemer. I disse beregningene har vi ikke antatt noen turbulenskorreksjon, noe som er et stor forenkling. Dersom man sammenligner Figur 4.4 og Figur 4.5 er det rimelig å konkludere med at passerende kryssermissiler er et enklere mål enn et som kommer rett mot laseren. Grunnen til det er først og fremst usikkerheten knyttet til hvor robust et missil vil være rett forfra.



Figur 4.5 Største avstand fra laseren hvor et kryssermissil kan stoppes når det passerer forbi.

Vi har i analysen av passerende kryssermissiler ikke studert hvor mange missiler som kan bekjempes i et koordinert angrep. En slik analyse vil måtte bli vesentlig mer kompleks fordi den vil innebære flere lasereffektorer som samspiller på en gitt måte, og antallet som kan bekjempes vil også avhenge av retningen for de innkommende missilene. Slike analyser er ikke uoverkommelig med dette modellverktøyet, men det er for stor detaljgrad til at vi har valgt å ta det med i denne første studien. Det er derfor viktig å gå videre med analyser av denne typen anvendelser i mer detalj for å danne seg et bedre bilde av den mulige effekten laservåpen kan ha. Man vil da også kunne få belyst andre utfordringer som for eksempel at ved bekjempelse av lavtflygende kryssermissiler over land, så kan det i enkelte terreng være utfordrende å finne en posisjon for laseren som kan følge relevante trusselbaner over lang nok tid. Det vil også være nødvendig å se hvordan et laservåpen kan samvirke med andre effektorer og sensorer i et mer fullstendig integrert luft- og missilforsvarskonsept.

5 Konklusjoner

Vi har her analysert to anvendelser av laservåpen ved å måle effektivitet uttrykt ved antall samtidige trusler i form av droner i det første scenarioet og kryssermissiler i det andre, som et laservåpensystem kan bekjempe. Modellen som er brukt er enkel, men tar likevel med seg viktig effekter. I dronescenarioet viser analysen at et laservåpen kan være svært effektivt mot dronesvermer uten at det stilles urealistiske krav til laseren selv sett i lys av teknologien som er kommersielt tilgjengelig i dag. Dette passer også godt med at flere store våpenleverandører i dag tilbyr slike systemer. Ut fra vår analyse er det lite sannsynlig at konvensjonelle våpen kan konkurrere med laservåpen for denne anvendelsen, spesielt dersom man forventer et koordinert angrep fra mange mindre droner. Det eneste som trekker ned i denne sammenhengen er at systemet må forventes å være relativt kostbart i anskaffelse sammenlignet med løsninger som f.eks. avskjæringsdroner eller detonerende granater. Så man vil nok kun se laservåpen i denne anvendelsen i situasjoner der denne trusselen er en stor utfordring.

Vi har også sett at laservåpen kan ha en viss effekt mot kryssermissiler, men at det er tydelig at her er utfordringene mye større i forhold til behovet for svært høy lasereffekt og potensielt behov for turbulenskorreksjonssystemer. Det knytter seg her også stor usikkerhet til hvor robuste kryssermissiler vil være mot laservåpen, siden de uansett må tåle mye varme fra aerodynamisk oppvarming. Etter vårt syn er det derfor sannsynlig at det vil finnes mer konvensjonelle løsninger i form av avskjæringsmissiler eller hurtigskytende kanoner som er like effektive. Men dersom man uansett vil ha et stort laservåpensystem om bord, så er det selvfølgelig verdifullt at det også kan ha en virkning mot kryssermissiler.

Vi har her bare analysert to anvendelser av laservåpen. Det finnes selvfølgelig flere som kan være relevante for Norge og andre nasjoner på et tidspunkt i fremtiden. For eksempel så er ikke anvendelsen mot interkontinentale missiler helt død på amerikansk side, men det virker på nåværende tidspunkt som om det er langt frem til en slik anvendelse er en realitet. Det jobbes også med å integrere laservåpen i fly eller i poder som kan bæres av fly. Man ser da for seg både luft-til-luft operasjoner og luft-til-bakke operasjoner. Man kan f.eks. se for seg kampfly med kraftige nok lasere til at man kan ta ut alle tenkelig luft-til-luft missiler i selvforsvar. Det er lett å se for seg at dette vil kunne ha en vesentlig innvirkning på kampen for luftherredømme.

Uavhengig av nøyaktigheten i vår analyse virker det nå som laservåpen er en så reell mulighet at det vil bli svært viktig at vi også i Norge vurderer hvilke muligheter og trusler det utgjør, både på kort og lang sikt. Slike modeller som brukt i denne rapporten vil kunne gi et godt bilde av dette, men det er avgjørende at vi bygger opp kunnskap knyttet til den reelle virkningen på relevante mål og med hvilken tetthet og presisjon man kan forvente å kunne levere energi i realistiske scenarioer.

Vedlegg

A Modeller

A.1 Modell droner og missiler

Dronene i vår modell har bare et minimum av egenskaper, nok til å kunne fungere i modellen. Det er i modellen brukt to forskjellige droner. En liten og en stor. Den første er modellert fra et lite multikopter som f.eks. DJI Phantom. Denne dronen beveger seg i lav hastighet og er sårbar for laserstråling. De andre, større dronene i vår analyse, er betydelig raskere og mindre sårbare enn de små dronene. Det er ikke lagt inn noen vinkelavhengighet i sårbarheten, og de antas at for disse systemene vil man alltid kunne lyse på et sårbart punkt som i stor grad vender mot laseren. Ett sammendrag egenskapene til dronen er gitt Tabell A.1

Egenskap	Liten drone	Stor drone	Kryssermissil
Angrepshastighet	10 m/s	100 m/s	800 m/s
Eksponeeringsgrense for skade	1 kJ/cm ²	10 kJ/cm ²	10 – 100 kJ/cm ² (nese) 10 kJ/cm ² /sin α (side)
Minste effektive skadeareal	1 cm ²	10 cm ²	10 cm ²
Radartverrsnitt	0,02 m ²	0,5 m ²	∞ *

Tabell A.1 Egenskaper for droner i simuleringmodell. *For kryssermissiler antas deteksjonsavstanden å være begrenset av horisonten.

Modellen inneholder også en enkel radarmodell som regner ut en deteksjonssannsynlighet per tid ut fra radartverrsnittet og noen oppgitte deteksjonsavstander, integrasjonstider og falskalarmerter for et referansemål med kjent tverrsnitt. Ut fra dette kan man regne ut deteksjonssannsynligheter for andre mål med kjent tverrsnitt [7]. Etter første deteksjon tar det en gitt tid før målet bekreftes, dette er for å gi radaren tid til å etablere et spor og klassifisere trusselen. Vi har i alle simuleringene antatt at dette tar 2 s, uten at dette er studert nøye, fremstår dette som er realistisk verdi.

Kryssermissilene er modellert mye på samme måten. Den eneste endringen er at det skilles på eksponeeringsgrensen på siden og på nesepartiet (rett forfra). På siden korrigeres det også for at strålen ikke treffer vinkelrett på siden. Dette gjøres ved å dele strålearealet med sinus til

vinkelen mellom missilaksen og den innfallende laserstrålen. For små vinkler mellom missilaksen og laserstrålen velges den høyste skaderaten av: sideangrep med liten vinkel og rett forfra med høy skadeterskel.

Deteksjon av kryssermissiler regnes det ikke detaljert på. Vi har her antatt at missilene kan detekteres når de kommer over horisonten sett fra radarsystemet. For et sett av flyhøyder (5 m) og radarhøyder (25 m) så blir dette ca. 26 km. Dette er ikke en viktig parameter siden rekkevidden til lasersystemet er mye kortere enn dette.

A.2 Skademodell

Skademodellen er også så enkel som mulig. I utgangspunktet er det en gitt eksponering (energi per areal) som skal til for å skade målet. Dette vil si at dronen er bekjempet når det laget et hull i overflaten. I modellen integrer vi irradiansen på målet opp til en normalisert eksponering, H_n , hvor målet regnes som skadet.

$$H_n(t) = \int_0^t D(z) dt' \tag{A.1}$$
$$D(z) = \frac{P_{laser}}{A(z)H_{max}} e^{-3.91 \frac{z}{VIS}}$$

Hvor D er skaderaten, A er strålearealet på målet, P_{laser} er lasereffekt, z avstanden, VIS sikten (2% transmittans) på laserbølglengden, H_{max} er eksponeringsgrensen for skade på målet og H_n er den normaliserte eksponeringen. Når H_n er større enn 1 så regnes målet som bekjempet.

På store avstander er strålen så stor på målet at antagelsen om at hullet som strålen lager uskadeliggjøre dronen er rimelig. På korte avstander (noen få hundre meter) vil strålen kunne bli så liten at enten så vil ikke et så lite hull nødvendigvis stoppe dronen eller så vil varmeledning spre varmen utover fra strålen. For ta med begge disse effektene har vi satt et minste areal som strålen kan ha på målet. Vi ha her satt dette arealet til 1 cm² for de små dronene og til 10 cm² for de store dronene og for kryssermissilene. Vi har også satt en nedre grense for skaderate som bidrar til eksponering. Det er opplagt at en lav irradians bare vil varme opp målet til det igjen er i likevekt med omgivelsene gjennom egenstråling, varmeledning eller konveksjon. I denne modellen har vi derfor satt alle skaderater under 0,1 s⁻¹ til 0.

Reflektiviteten til målet er ikke eksplisitt er med i skademodellen. Den kan variere veldig, men vil for mange overflater i utgangspunktet være betydelig. Det som derimot veldig ofte skjer når temperaturen stiger på grunn av oppvarming fra laseren er at reflektiviteten går ned, og man kommer til et punkt hvor overflaten skades og absorpsjonen raskt øker betydelig. Dette vil redusere innvirkningen av den initielle reflektansen til overflaten. På grunn av denne komplekse og ikke-lineære oppførselen så har vi valgt å la dette fenomenet inngå i den totale eksponeringsgrensen til målet. Denne effekten er også en grunn til å kreve at laseren skal ha en viss irradians på målet for å kunne skade det, noe vi oppnår ved å sette skaderater under 0,1 s⁻¹

til 0. Siden vi for mange av målene har en eksponeringsgrense på 10 kJ/cm^2 , så vil denne nedre grensen tilsvare 1 kW/cm^2 noe som er et nivå hvor man kan forvente at en overfalte tar skade.

Modellen for skade er absolutt så enkel som overhode mulig, men det tar likefullt høyde for viktige fysiske prosesser. Med mer kunnskap om hvordan relevante overflater og strukturer reagerer på laserstråling kan en slik modell raffineres betydelig.

A.3 Effektormodell

A.3.1 Tid til engasjement

Effektormodellen beskriver hvordan laserenergien når frem til målet. Den første komponenten i dette er tiden laseren bruker på engasjere målet etter at den har fått posisjon fra ett annet sensorsystem. En del av denne tiden brukes til å rette systemet mot målet. Deretter må den med en egen optisk sensor finne målet og etablere et stabilt treffpunkt på målet. Dette er i sum en prosess vi ikke kan ha helt oversikt over, og vi har derfor valgt å bruke en fast tid til hele denne sekvensen frem til målet er engasjert. I de fleste av tilfellene har vi brukt 3 s, noe som fremstår som realistisk dersom denne prosessen kan foregå nokså automatisk. Dersom det må menneskelig involvering til for å godkjenne eller styre prosessen så vil denne verdien kunne variere veldig avhengig av situasjonen og graden av involvering. Denne tiden er mest kritisk i en situasjon hvor man er utsatt for flere simultane angrep. I en slik sammenheng er det kanskje ikke urealistisk at også en menneskelig involvering kan være rask etter at det første målet er engasjert og operatøren har blitt oppmerksom på det koordinerte angrepet.

A.3.2 Dempning av strålen

Atmosfæren vil dempe strålen frem til målet. Dette tas inn i form av en siktparameter (VIS i (A.1)). I denne inngår molekylærabsorpsjon og spredning fra gasser i atmosfæren og spredning fra aerosoler. I likhet med den sikten som vi opplever i det synlige området så vil «sikten» på laserbølgelengden variere veldig med meteorologiske forhold. For å vite hvordan de meteorologiske forholdene påvirker sikten til laserstrålen, må vi vite nøyaktig hvilken bølgelengde som benyttes. I de fleste laservåpen som testes ut i dag benytter man bølgelengder noe over 1000 nm. Dette er fordi det er lett å lage mye lasereffekt på denne bølgelengden samtidig som diffraksjonen på denne bølgelengden er akseptabel. Rundt 1050 nm finnes bølgelengdeområder hvor det ikke er signifikant absorpsjon selv på 10 km. Det som da gjenstår er spredning, og på disse bølgelengdene vil sikten ligge mellom 10 og 40 km i lav høyde [12]. Under forhold med nedbør, tåke eller annen røyk vil selvfølgelig sikten bli betydelig kortere, noe som vil begrense rekkevidden til laservåpen spesielt i lav høyde.

A.3.3 Stråleforbredning

En faktor som i praksis begrenser laserens rekkevidde enda mer enn sikt er stråleforbredning. Helt uforstyrret vil det bare være diffraksjon som gjør at strålen vokser som funksjon av avstand. Under ideelle forhold (vakuum) vil strålestørrelsen på målet bestemmes av størrelsen på strålen ut av laseren i forhold til bølgelengden. Jo større strålen er der jo mindre blir den på målet. I vår modell er vi interessert i maksimal intensitet på målet. Derfor er forholdet mellom

den ideelle intensiteten og den reelle, som kalles Strehl-ratio, en viktig størrelse å beregne. Det er derfor hensiktsmessig å studere hvilke faktorer som påvirker Strehl-ratioen i et laservåpensystem for å kunne bestemme hvordan ytelsen påvirkes. De forskjellige faktorene brukt til å bestemme Strehl-ratio i vår modell er vist oppsummert i Tabell A.2.

Strehl komponent	Uttrykk	Typisk verdi	Ref.
Strålekvalitet	$(M^2)^{-2}$	0,5 – 0,8	[10]
Målfølgingsnøyaktighet	$\left(1 + \frac{\pi^2}{2} \frac{\sigma_{track}^2}{(\lambda / D)^2}\right)^{-1}$	0,85	[10]
Endelig målfølgingsbåndbredde	$\left(1 + \frac{\pi^2}{2} \left(\frac{f_T}{f_{track}}\right)^2\right)^{-1}$	Se Figur-A.1	[13]
Turbulens uten vinkelfeil*	$\left(\frac{w_{FS}}{w_{ST}}\right)^2$	Se Figur-A.1	[14]
Endelig antall frihetsgrader i turbulenskorreksjon**	$\exp(-\sigma_{HO}^2)$	0.97	[15]
Endelig båndbredde i turbulenskorreksjon	$\exp\left(-\left(\frac{f_G}{f_{AO}}\right)^{5/3}\right)$	Se Figur-A.1	[16]

Tabell A.2 Faktorer i beregning av Strehl-ratio for laserstråle ved propagasjon gjennom atmosfæren. *Faktorer som bare er med uten turbulenskorreksjon utover hurtig målfølgning. **Faktorer som bare er med ved turbulenskorreksjon.

En sentral størrelse i denne modellen er forventet strålestørrelse etter at pekefeil er fjernet (w_{ST} i Tabell A.2). Vi har her brukt analytiske uttrykk fra Fante som gir fire forskjellige uttrykk med forskjellige gyldighetsområder som vi har laget glidende overganger mellom [14]. Disse uttrykkene har i senere tid blitt kritisert på grunn av antagelser om statistisk uavhengighet mellom vinkelfeil og høyere ordens perturbasjoner. Det har blitt foreslått nye uttrykk som gir mye høyere Strehl-ratioer, men detaljerte simuleringer av turbulenspropagasjon antyder at virkeligheten ligger et sted mellom de to verdiene [17]. Dette er et tema som bør undersøkes videre, analytisk, numerisk og med eksperimenter. Det som derimot er helt klart er at de aller enkleste uttrykkene for turbulens som gjelder for lange tidsskalaer kan bli helt feil. Veldig stor

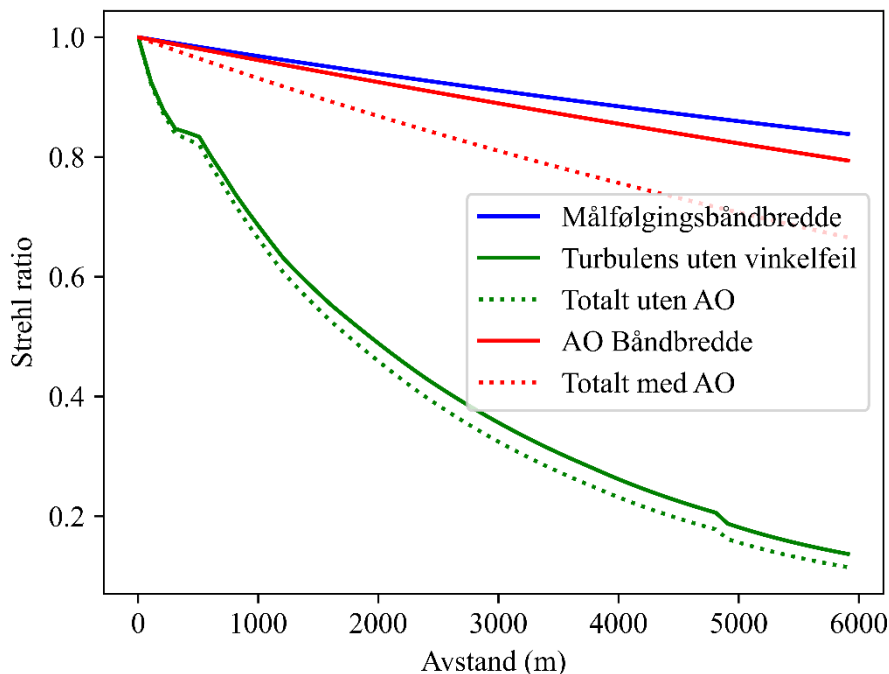
andel av bidraget til disse uttrykkene stammer fra vinkelfeil, noe et målfølgingsystem med høy båndbredde i stor grad vil fjerne.

Både reguleringen av vinkelfeil og høyere ordens turbulens vil ha en endelig båndbredde. Kravene til disse båndbreddene er gitt ved to karakteristiske frekvenser, f_T og f_G , som inngår i uttrykkene i Tabell A.2. Disse er gitt ved:

$$\begin{aligned} f_T &= 0.331 D^{-1/6} \lambda^{-1} \left(\int_0^L dz C_n^2(z)^2 V(z)^2 \right)^{1/2} \\ f_G &= 2.31 \lambda^{-6/5} \left(\int_0^L dz C_n^2(z)^2 V(z)^{5/3} \right)^{3/5} \end{aligned} \tag{A.2}$$

Hvor C_n^2 er turbulensstyrken, V er vindhastigheten, D er strålediameteren og L er propagasjonsavstanden. Som vi ser er disse frekvensene i hovedsak avhengig av vind og turbulensstyrke. Dersom vinden øker, blir kravene til båndbredde i reguleringen betydelige, spesielt vil f_G kunne bli problematisk dersom vinden øker. Ved 6 km, $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ og $V = 10 \text{ m/s}$ så blir $f_G = 250 \text{ Hz}$. Det betyr at reguleringsbåndbredden må være betydelig høyere enn det, og bilderaten til en bølgefrontsensor må kanskje være en faktor 10 høyere igjen. For da å kunne ha et fungerende turbulenskorreksjonssystem som virker på 6 km så må kanskje bilderaten til systemet være opp mot 10 kHz. Dette er nok utenfor rekkevidde for de kamerabaserte løsningene som benyttes for eksempel i astronomi. Det finnes derimot løsninger hvor mange lasere gjennom individuell fasekontroll låses til en felles fase på målet slik at de blir til én koherent stråle. Slike systemer er demonstrert ut til 7 km [18]. Dette var riktig nok på lav effekt og med et samarbeidende mål i form av en hjørnereflektor og vi er ikke kjent med at dette er demonstrert med mer realistiske effekter og mål.

Vinden i uttrykket vil ikke bare komme fra den naturlige vinden, men kan også komme fra hastigheter i både mål og effektor. Dersom man følger et kryssende mål, vil denne relative vinden raskt kunne bli svært betydelig. Dette gjør at det kan være krevende å realisere gode turbulenskorreksjonsløsninger i realistiske laservåpenanvendelser. Likevel kan mye oppnås med god og rask målfølgning siden kravene her er betydelig lavere. For de fleste avstander og turbulensstyrker vil kravet til målfølgingsbåndbredde bare være ca. 15 % av kravet til båndbredde for korreksjon av høyere ordens turbulens.



Figur A.1 Strehl-ratio bidrag fra turbulens uten vinkelfeil (grønn), turbulenskorreksjon med endelig båndbredde, her 300 Hz (rød) og endelig målfølgingsbåndbredde, her 100 Hz (blå). I beregningene har vi brukt $C_n^2 = 1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, vind = 5 m/s og strålediameter 5 cm (e^{-1}).

I Tabell A.2 har vi også oppgitt bidrag fra unøyaktighet i målfølgingen og feil i tilpasningen til den målte fasefronten på grunn av et endelig antall frihetsgrader i komponenten som kompensere for turbulensen. Denne vil typisk ha noen titalls aktuatorer noe som gir feil i fasefronten gitt som

$$\sigma_{HO}^2 = 0.29J^{-0.866} \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3}, \quad (\text{A.3})$$

hvor J er antallet frihetsgrader. Selv med bare 50 aktuatorer blir reduksjonen i intensitet bare noen prosent på grunn av denne effekten.

Et målfølgingsystem vil også ha en endelig presisjon. Feilene vil kunne komme fra flere kilder, som mekanisk presisjon og feil i posisjonsestimater. Dette vil gi en feil i pekeretningen uavhengig av turbulens. Vi har i våre simuleringer antatt at en varians på 3 μ rad i denne pekefeilen. Ut fra uttrykket for målfølgingsnøyaktighet i Tabell A.2 får vi en Strehl-ratio på 0,85 dersom vi antar en strålediameter på 10 cm.

Referanser

- [1] A. Butler. (2011, 12. des.) Lights out for the Airborne Laser. *Aerospace Daily & Defense Report*. Available: <https://aviationweek.com/awin/lights-out-airborne-laser-0>
- [2] B. Grandal, "En Orientering Om Laservåpen," FFI-rapport 82/70902, 1982.
- [3] R. Solstrand, S. E. Landrø og P. Narum, "Laser På Slagmarken," FFI-rapport 91/70302, 1991.
- [4] K. Stenersen og G. Arisholm, "Laser Weapons," FFI-rapport 05/04020, 2005.
- [5] G. Rustad, "Laser Weapons - Current Status, Future Trends and Possible Use," FFI-rapport 18/01978, 2018.
- [6] P. E. Nielsen, "Effects of Directed Energy Weapons," National Defense University, 1994.
- [7] J. Ochodnický, Z. Matousek, M. Babjak og J. Kurty, "Drone Detection by Ku-Band Battlefield Radar," in *2017 International Conference on Military Technologies (ICMT)*, 31 May-2 June 2017 2017, pp. 613-616, doi: 10.1109/MILTECHS.2017.7988830.
- [8] A. D. de Quevedo, F. I. Urzaiz, J. G. Menoyo, A. A. Lopez og Ieee, *Drone Detection and Rcs Measurements with Ubiquitous Radar* (2018 International Conference on Radar). 2018.
- [9] M. W. Haakestad og I. Tansem, "Hypersoniske Våpen - En Oversikt," FFI-RAPPORT 20/02143, 2020.
- [10] S. Nicolas, "Turbulence Mitigation Using Adaptive Optics - Beam Delivery Improvement," FFI-Rapport 17/16120, 2017.
- [11] R. A. McClatchey og J. E. A. Selby, "Atmospheric Attenuation of Laser Radiation from 0.76 to 31.25 μm ," Air Force Cambridge Research Laboratories, 1974.
- [12] F. G. Gebhardt, "High-Power Laser Propagation," *Applied Optics*, vol. 15, no. 6, pp. 1479-1493, 1976, doi: 10.1364/ao.15.001479.
- [13] G. A. Tyler, "Bandwidth Considerations for Tracking through Turbulence," *Journal of the Optical Society of America a-Optics Image Science and Vision*, vol. 11, no. 1, pp. 358-367, Jan 1994, doi: 10.1364/josaa.11.000358.
- [14] R. L. Fante, "Electromagnetic Beam Propagation in Turbulent Media," *Proceedings of the Ieee*, vol. 63, no. 12, pp. 1669-1692, 1975, doi: 10.1109/proc.1975.10035.
- [15] R. J. Noll, "Zernike Polynomials and Atmospheric-Turbulence," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 66, no. 3, pp. 207-211, 1976, doi: 10.1364/josa.66.000207.

-
-
- [16] D. P. Greenwood, "Bandwidth Specification for Adaptive Optics Systems," (in English), *Journal of the Optical Society of America*, Article vol. 67, no. 3, pp. 390-393, 1977, doi: 10.1364/josa.67.000390.
- [17] M. Charnotskii og G. Baker, "Optimization of Beam Geometry for Focusing through Turbulence," in *Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans V*, vol. 9979, A. M. J. VanEijk, C. C. Davis, and S. M. Hammel Eds., (Proceedings of Spie, 2016.
- [18] T. Weyrauch *et al.*, "Deep Turbulence Effects Mitigation with Coherent Combining of 21 Laser Beams over 7 Km," (in English), *Optics Letters*, Article vol. 41, no. 4, pp. 840-843, Feb 2016, doi: 10.1364/ol.41.000840.

Om FFI

Forsvarets forskningsinstitutt ble etablert 11. april 1946. Instituttet er organisert som et forvaltningsorgan, med særskilte fullmakter underlagt Forsvarsdepartementet.

FFIs formål

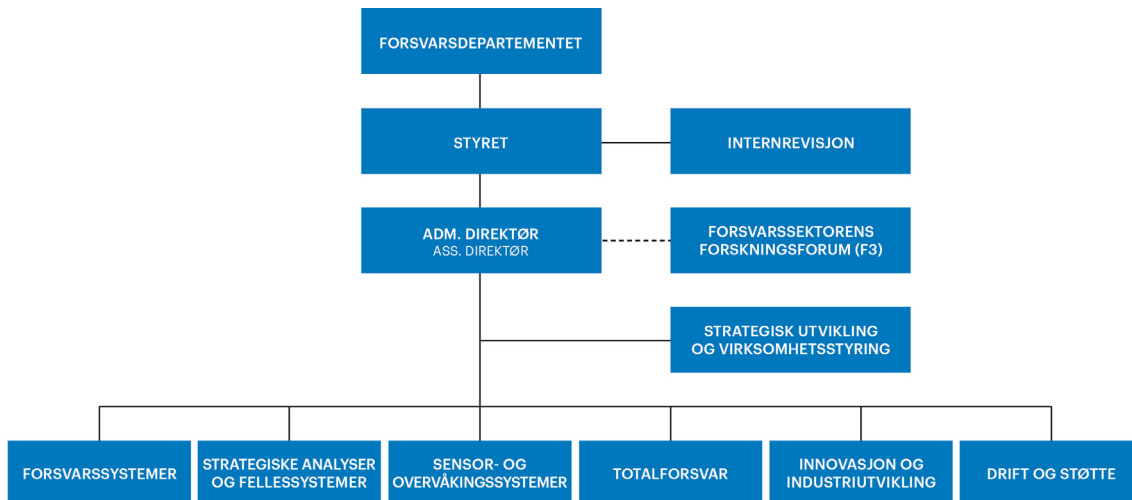
Forsvarets forskningsinstitutt er Forsvarets sentrale forskningsinstitusjon og har som formål å drive forskning og utvikling for Forsvarets behov. Videre er FFI rådgiver overfor Forsvarets strategiske ledelse. Spesielt skal instituttet følge opp trekk ved vitenskapelig og militærteknisk utvikling som kan påvirke forutsetningene for sikkerhetspolitikken eller forsvarsplanleggingen.

FFIs visjon

FFI gjør kunnskap og ideer til et effektivt forsvar.

FFIs verdier

Skapende, drivende, vidsynt og ansvarlig.



Forsvarets forskningsinstitutt
Postboks 25
2027 Kjeller

Besøksadresse:
Instituttveien 20
2007 Kjeller

Telefon: 63 80 70 00
Telefaks: 63 80 71 15
Epost: post@ffi.no

Norwegian Defence Research Establishment (FFI)
P.O. Box 25
NO-2027 Kjeller

Office address:
Instituttveien 20
N-2007 Kjeller

Telephone: +47 63 80 70 00
Telefax: +47 63 80 71 15
Email: post@ffi.no