



FFI-RAPPORT

16/01008

Additiv produksjon av prototyper og reservedeler i felt

forsøk under Cold Response 2016

—

Joakim Flathagen
Christian Duun Norberg
Jan Rune Nilssen
Guri Nonsvik
Jørgen H. Nordmoen

Additiv produksjon av prototyper og reservedeler i felt forsøk under Cold Response 2016

Joakim Flathagen
Christian Duun Norberg
Jan Rune Nilssen
Guri Nonsvik
Jørgen H. Nordmoen

Emneord

Materialer
Produksjonsteknikk
Spesialstyrker

FFI-rapport

FFI-RAPPORT 16/01008

Prosjektnummer

1354

ISBN

P: ISBN 978-82-464-2788-1

E: ISBN 978-82-464-2789-8

Godkjent av

Svein Rollvik, *forskningsleder*
Jon E. Skjervold, *avdelingsjef*

Sammendrag

Utviklingen av additiv produksjonsteknologi, eller 3D-printing, begynte på 1980-tallet. Siden den tid har teknologien primært blitt benyttet innen prototyp utvikling. Etterhvert som teknologien har blitt mer moden og utbredt har også andre anvendelser kommet til syne. Det er for eksempel mulig å bruke teknologien for serieproduksjon av enkelte komponenter. Teknologien gjør det dessuten mulig å produsere komponenter med komplekse geometrier, noe som åpner for en rekke nye produkter. Denne rapporten beskriver et annet interessant aspekt ved denne teknologien; nemlig at produksjonen kan foregå nær brukeren. Andre produksjonsformer er normalt sentraliserte, mens denne teknologien åpner for en distribuert produksjon. I forsvarssammenheng betyr dette at produksjon av reservedeler, prototyper, reparasjoner og annet kan foregå ute i felt, nær soldatene, under øvelser og i operasjoner.

For å kunne produsere reservedeler og prototyper i felt, har FFI utviklet en konseptuell mobil løsning bestående av ulike 3D-printere og annet verktøy. Den mobile løsningen er basert på en 20-fots kontainer. Det er fornuftig å benytte en standard kontainer som basis da det finnes en rekke egnede transportmidler for disse i Forsvaret. Uttestingen av løsningen ble gjennomført i løpet av to uker i mars 2016 under vinterøvelsen Cold Response. Fem aspekter av additiv produksjonsteknologi i felt har vært undersøkt: (1) utvikling av prototyper i samarbeid med brukeren, (2) produksjon av reservedeler under operasjoner, (3) 3D-modellering og printing av taktisk mål, (4) generelle tekniske utfordringer forbundet med additiv produksjon i krevende miljøer, og (5) konseptuell utvikling i samarbeid med brukeren.

Feltforsøket viste først og fremst at additiv produksjonsteknologi har stor verdi som prototypverktøy. I samarbeid med Forsvarets spesialstyrker ble det utviklet og produsert 32 ulike prototyper og deletilpasninger i løpet av de to ukene, og samarbeidet med operatørene var meget godt. 3D-modellering av ulike taktiske mål ble gjennomført ved hjelp av bilder fra ubemannede helikoptre. Slike modeller lar seg skrive ut med dagens printerteknologi og vil være nyttige i planleggingen av operasjoner.

Produksjon av reservedeler i felt er sannsynligvis det området hvor additiv produksjonsteknologi vil ha størst betydning for Forsvaret, både operasjonelt og økonomisk. Teknologien gjør det mulig å redusere lagerbehov og transportkostnader og vil gi operatører og vedlikeholdspersonell langt større tilgang på deler enn hva som er mulig med dagens forsyningskjede. Feltforsøket viste at det allerede i dag er mulig å produsere enkelte reservedeler i felt. Utvikling innen materialer og printerteknologi sammen med en større satsning på dette området vil kunne gjøre det mulig med en digital forsyningskjede i fremtiden. Dette forutsetter juridiske avklaringer om kopiering og lisensiering av deleproduksjon. I tillegg må selve produksjonsprosessen kvalitetssikres.

Summary

Additive Manufacturing (AM) was developed during the 1980s and has primarily been a tool for rapid prototyping. However, other applications have recently emerged. For example, mass production of specialty components using additive manufacturing is becoming a reality. Furthermore, since complexity comes for free with AM, new and innovative designs and products are appearing. This report describes a further advantage with AM; it is now possible to produce parts distributed, close to the consumer, as opposed to other production techniques that rely on centralized manufacturing. For the Armed Forces, this means that prototypes and spare parts can be produced in field, during an exercise or in a combat environment.

FFI has produced a conceptual and mobile solution for in-field AM production. This solution is based on a standard 20-foot shipping container. Such containers are easy to transport and handle. A two week trial was conducted during the main winter exercise Cold Response 2016. Five aspects of in-field AM were studied: (1) prototype development in collaboration with soldiers, (2) spare parts production, (3) 3D-modelling and printing of a tactical target, (4) various technical challenges related to AM in field-environments, and (5) conceptual development.

One of the main conclusions from the field trial was that AM is an excellent prototyping tool. In collaboration with the Norwegian Special Forces (NORSOF), 32 different prototypes were designed and produced. The collaboration with NORSOF was excellent and many creative ideas were discussed. We carried out 3D-modeling of different tactical targets. Some of these models were printed out. This is a possible useful tool during operational planning.

The greatest potential of AM is probably within the spare parts supply chain, both operationally and economically. AM can reduce the inventory and transport needs, and it can provide a vast number of possible spare parts for operators and maintenance personnel. The field trial demonstrated that it is in fact possible to produce spare parts in-field with AM today. There are some technical challenges related to material quality and versatility, as well as some intellectual property challenges concerning copying and producing parts in-field. In addition, quality control of the production process is an area that must be examined further.

Innhold

1	Innledning	7
2	Utvikling av kontainerløsning	9
3	Utvikling av prototyper i felt	11
4	Additiv produksjon i Forsvarets forsyningskjede	18
4.1	Introduksjon	18
4.2	Reservedelsproduksjon under Cold Response	18
4.3	Fremtidige muligheter	20
5	3D modellering av taktisk mål	22
5.1	Introduksjon	22
5.2	Eksperimentoppsett	22
5.3	Forsøk 1 – «Treningslandsby»	22
5.4	Forsøk 2 – «Gård»	23
5.5	Forsøk 3 - «Skur»	23
5.6	Resultater	24
6	Erfaringer med 3D-printing i krevende miljøer	25
7	Oppsummering og konklusjon	26
	Referanser	27



1 Innledning

Additiv produksjonsteknologi, eller 3D-printing, har gjennomgått en eksplosiv utvikling de senere årene på grunn av at kritiske patenter har løpt ut på tid, noe som har åpnet for at mange miljøer ut over de gruppene/firmaene som kontrollerte patentene har kunnet ta dem i bruk. Dette har, i tillegg til en rivende utvikling innen elektronikk, også medført større konkurranse og fallende priser, noe som igjen har åpnet nye markeder.

Innen forsvarssektoren har additiv produksjonsteknologi hovedsakelig blitt benyttet for utvikling av prototyper. Det videre potensialet innen dette feltet synes å være meget stort tatt i betraktning at maskinene stadig blir billigere, enklere å benytte, og materialkvaliteten stadig forbedret. En av de vesentlige fordelene med additiv tilvirkning er at det muliggjør korte iterasjonsrater, noe som reduserer tiden fra idéunngangelse til ferdig produkt. Denne muligheten bør utnyttes av Forsvaret, særlig med tanke på at soldatene i det norske forsvar har et godt utdanningsnivå, og oppfattes som innovative og iderike. Problemløsning under oppdrag og under trening leder ofte til gode idéer. Noen av disse idéene kan realiseres som prototype, uttestes, og etter noen iterasjoner, kan de muligens også industrialiseres. Teknologien gjør det dessuten mulig å flytte produksjonen ut i felt. FFI har benyttet 3D-printere i tidligere feltforsøk og funnet at dette er et meget godt verktøy for å gjøre tilpasninger og prototyp utvikling under en øvelse[1].

Det første kjente initiativet til en mobil prototypeløsning basert på additiv produksjon ble etablert av amerikanere. US Army Rapid Equipping Force sin Expeditionary Lab er en containerbasert kapasitet med 3D-printere, CNC-fresemaskiner, laserkutter, plasmakutter, vannskjærer og andre verktøy. I tillegg har løsningen strømforsyning, kjølesystem og satellittkommunikasjon. Kostnaden på løsningen er ca. 2.8 millioner USD og bemannes av to ingeniører og to soldater. Prototypelaboratoriet ble først uttestet i Afghanistan i 2011 og ble meget godt mottatt både av amerikanernes egne styrker og av allierte (deriblant nordmenn), som besøkte fasilitetene.

En mulig tilsvarende løsning for Norge er beskrevet i FFI-rapport [2], da med tanke på anvendelse mot de Norske spesialstyrker (FS). Herværende rapport beskriver utviklingen av dette konseptet, som er materialisert gjennom et samarbeid mellom FFI-prosjekt 1274 «Støtte til SOF materiellanskaffelser», FFI-prosjekt 1354 «Additiv produksjonsteknologi», samt FFIs prototypverksted (PTV). Første fase i utvikling og uttesting av løsningen ble gjennomført med tanke på deltakelse under Cold Response 2016, med Forsvarets Spesialstyrker som samarbeidspartner.

Uttestingen som beskrives i denne rapporten har hatt følgende hovedformål:

1. Undersøke bruk av additiv produksjonsteknologi for hurtigutvikling av prototyper i felt. De mest fremtredende fordelene med en slik kapasitet er beskrevet over. I tillegg til disse inkluderer konseptet en kommunikasjonsløsning som gjør det mulig å knytte distribuerte personellressurser og produksjonskapasiteter sammen. For eksempel ble det etablert et samarbeid med Tronrud Engineering som ble tilsendt konstruksjonsfiler og som under øvelsen produserte en prototype i titan. Utvikling av prototyper blir behandlet i kapittel 3.
2. En deployert produksjonsløsning kan ha en rolle i et fremtidig logistikkonsept. Additiv produksjon gir allerede i dag produkter av en kvalitet som kan konkurrere med produkter fra andre tilvirkningsprosesser. Det er derfor ikke et spørsmål om hvis, men heller om når,

additiv produksjon i en distribuert form, kan endre og effektivisere Forsvarets forsyningskjede for reservedeler. Det ble ikke gjennomført konkrete planlagte eksperimenter med lokal produksjon av reservedeler, men ved et eksempel ble et produkt på kort tid reparert ved hjelp av en 3D-printet del og kunne settes i drift i øvelsen. Dette temaet blir diskutert i kapittel 4.

3. Modellering av et taktisk mål. 3D-modelleringen ble gjennomført ved flyging av en UAV, og det ferdig modellerte objektet kunne da skrives ut. Dette blir behandlet i kapittel 5.
4. Uttesting av additiv produksjon i krevende miljøer. Transport og drift av 3D-printere utenfor etablerte verksteder byr på særegne utfordringer. I tillegg bør en slik løsning inkludere andre verktøy og materialer, og til en viss grad være selvforsynt under øvelsen. Den konseptuelle utviklingen er gjort i samarbeid med brukene. Deltakelsen på Cold Response 2016 ga verdifull kunnskap vedrørende hva som kreves ved deleproduksjon fjernt fra tradisjonelle mekaniske verksteder. Erfaringer vedrørende bruk av containerløsninger og fremtidige muligheter blir behandlet i kapittel 6.

Før vi beskriver disse ulike aspektene vil vi gjennomgå bakgrunnen for prosjektet, samt beskrive hvordan containerløsningen er oppbygd og dens bestanddeler.

2 Utvikling av kontainerløsning

Den mobile produksjonsløsningen ble av praktiske årsaker basert på en 20-fots kontainer. Slike containere er i utstrakt bruk til ulike formål i Forsvaret og det finnes en rekke organisatoriske transportkapasiteter som kan benyttes. Figur 2.1 viser den ferdige kontainerløsningen plassert ved siden av andre containere i øvelsen.



Figur 2.1 FFIs kontainer (blå) plassert i operasjonsområdet ved siden av andre logistikkcontainere.

Den viktigste og mest kostbare komponenten i den konseptuelle løsningen var 3D-printeren. Det finnes mange ulike printerteknologier i markedet, men ikke alle er egnet for mobil bruk. FDM-teknologien¹ er benyttet i tilsvarende forsøk av US Army og US Navy og på romstasjonen ISS, og ble vurdert som mest egnet for vårt formål. FDM baseres på at en oppvarmet dyse smelter en plaststreng som deretter deponeres lag på lag. Dette er en forholdsvis robust og velprøvd metode. Andre metoder er gjerne basert på sammensmelting av et fint pulver. Slike maskiner er gjerne vesentlig større i volum enn FDM-maskiner. Dessuten er håndtering av pulveret problematisk i mobile operasjoner.

FDM-maskinen som ble anskaffet var en Stratasys Fortus 250mc. Denne maskinen er i samme serie som eksisterende maskin på PTV og anses som en supplerende og nyttig kapasitetsøkning for FFI. Fortus 250mc har en maksimal byggeflate på 254 mm x 254 mm og en maksimal byggehøyde på 305 mm.

I tillegg ble det anskaffet en rensestasjon for å fjerne supportmateriale, benker, bord og diverse håndverktøy. Den totale kostnaden på prototypeløsningen var omlag 800.000 kroner derav 450.000 for printer. I tillegg til Stratasys-maskinen, ble det også benyttet to eldre 3D-printere til mindre arbeider: CubePro og Makerbot 2X. Figur 2.2 og figur 2.3 viser innsiden av kontaineren.

¹Fused deposition modeling



Figur 2.2 Innsiden av kontaineren. Stratasys Fortus 250mc til venstre i bildet.



Figur 2.3 Innsiden av kontaineren.

3 Utvikling av prototyper i felt

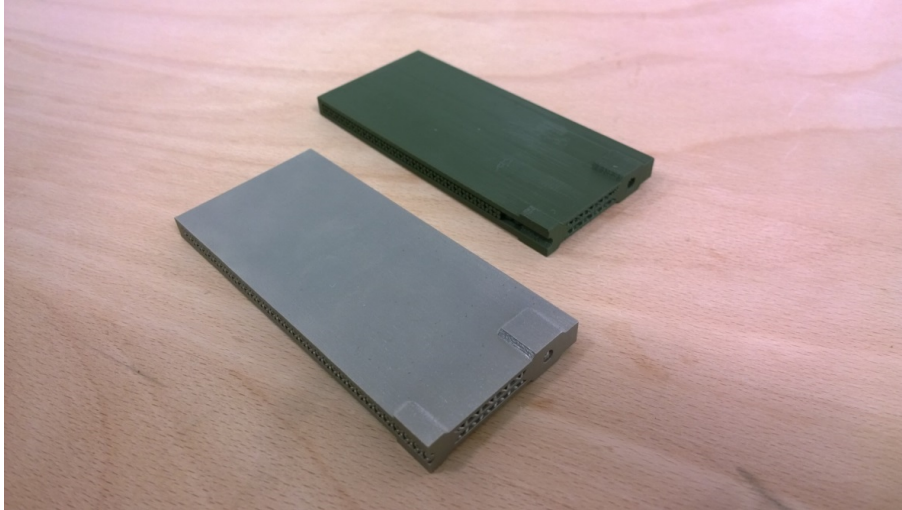
Tradisjonell produktutvikling foregår vanligvis over en lengre periode hvor man i første omgang søker å legge fram et så bredt utvalg av mulige løsninger som mulig for deretter å evaluere og velge en løsning basert på et på forhånd definert sett kriterier. Deretter blir den valgte løsningen videreutviklet og tilpasset formålet den skal tjene. I felt må denne prosessen skje i et mye kortere tidsrom. Det er ofte nødvendig å utvikle og produsere raskt og det er da avgjørende å ha tett kontakt med operatørene slik at utvikler har en god forståelse for hvordan utstyret skal brukes og hva det skal tåle av belastninger.

Å snakke «samme språk» og ha kjennskap til fagterminologien gjør at kommunikasjonen går lettere mellom utvikler og operatørene og man reduserer faren for misforståelser. Det kan også være en fordel ikke være helt ukjent med hvordan oppdragene til operatørene arter seg. Det er da lettere å ta de rette hensynene når man utvikler et produkt.

Denne type kunnskap får man best gjennom å være tilstede når operatørene trener på ulike operasjoner (såfremt det er praktisk mulig) og ved å snakke med operatørene. I de sammenhengene det er mulig å teste utstyret selv, vil det gi en helt annen forståelse for hva en må ta hensyn til i en utviklingsprosess enn dersom en må basere seg på litteratur som bakgrunnsinformasjon.

Et eksempel på hvordan god kjennskap til operatørene, hva de har av utstyr og hvordan de bruker det er en fordel, var da det, under øvelsen, ble adressert et behov for en flyteanordning til tre ulike båretyper. Løsningen baserte seg på å benytte flyteanordninger som operatørene allerede bærer med seg. Uten god oversikt over utstyrsparken ville det i beste fall tatt mye lengre tid å komme frem til samme løsning.

Under øvelsen Cold Response 2016 ble det utviklet hele 32 prototyper over en periode på to uker. De fleste av produktene ble utviklet på oppfordring fra og i tett samarbeid med brukerne av produktene som i all hovedsak var representanter fra Forsvarets Spesialstyrker. Figurene nedenunder viser et utvalg av disse prototypene.



Figur 3.1 *Prototype av kjøleplate. Produsert under øvelsen i ABS. Konstruksjonsfil sendt til Tronrud og produsert i titan.*



Figur 3.2 *Prototype av veggledning («Le bomba») for utplassering av C4. Sikrer at tre detonatorer får lik innbyrdes plassering i forhold til et senterpunkt. Potensiale for redusert bruk av sprengstoff i forhold til dagens løsning. Løsningen kan skaleres og flere veggledninger kan monteres sammen i en sirkelformasjon.*



Figur 3.3 Modifikasjon av Alford Breacher's boot, som er dagens eksisterende dørladning. Løsningen har en ny ergonomi og monteringsmulighet, blant annet er det forbedret innfesting mellom lokk og bunn. Løsningen kan dessuten skaleres etter anvendelsesområde.



Figur 3.4 Vertikalgrep tilpasset operatørens hånd. Konstruert ut fra bilder og mål av hånden.



Figur 3.5 6-skudds magasin for MRAD. Det originale magasinet kan butte i bakken når våpenet er montert på 2-fot. Dette kortere magasinet løser problemet. I front av bildet sees modifikasjon av eksisterende utløsermekanisme som forhindrer utilsiktet utløsning av magasin.



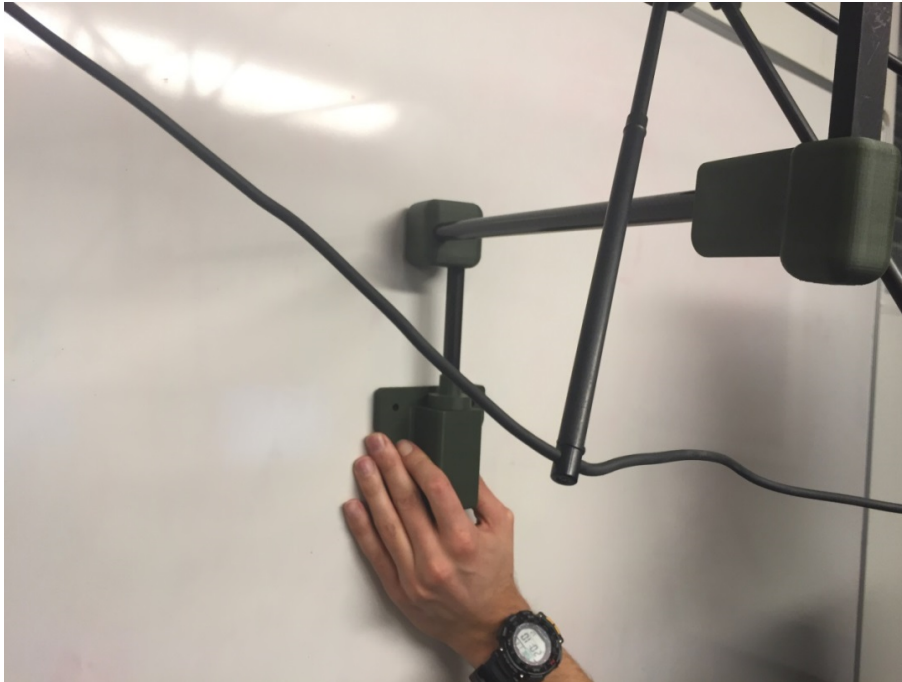
Figur 3.6 Kinnstøtte for HK416. Tilpasning for å forbedre anlegg. Prototyper er konstruert i ulike størrelser.



Figur 3.7 Kinnstøtte for HK417.



Figur 3.8 Antennefeste for Tacsat. I enkelte tilfeller er det er ønskelig med en fast montering i stedet for midlertidig stativløsning. Beskytter utstyret og gir mer stabil kommunikasjon.



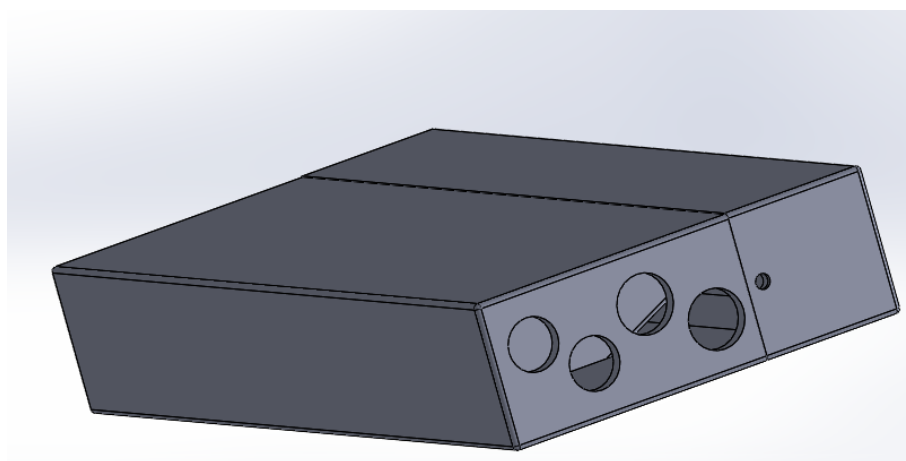
Figur 3.9 Antennefeste for Tacsat liten. Liten og lett monteringsløsning med verktøyløs og selvlåsende justeringsmulighet. Bygd med 3D-printede fester og karbonfiberstenger.



Figur 3.10 Spesieltilpasning av C8 kolbe. Lavere vekt og tilpasset brukerens ergonomi.



Figur 3.11 Montasjeskinne for kamera og annet utstyr på hund.



Figur 3.12 Kompakt sambandsboks. Første versjon av prototyp.

4 Additiv produksjon i Forsvarets forsyningskjede

4.1 Introduksjon

En av de mest ambisiøse visjonene forbundet med additiv produksjon er påstanden om at teknologien vil gjøre det mulig å endre dagens forsyningskjede radikalt. Slike visjoner er lansert både for sivile og militære forsyningskjeder. Hovedkonseptet går ut på å produsere reservedeler nære forbrukeren i stedet for å sende dem over landegrensene og via langsomme, kostnads- og sikkerhetskrevede transportruter. Med lokal additiv produksjon vil selve produktdesignet overføres digitalt, mens kun råmaterialene må transporteres via fysiske kanaler. For de aller fleste produktkategorier kan konseptet foreløpig betraktes som en fjern visjon.

Det er opplagt at det ikke vil være mulig å skrive ut en dieselmotor eller en artillerigranat ved behov. Likefullt finnes det en rekke kritiske komponenter som er nødvendige for å opprettholde driften av kjøretøy, våpen, og andre systemer, som både er små og har begrenset materialkompleksitet. Mange slike deler kan allerede i dag tilvirkes med additiv produksjon. Sett at man tilrettelegger for at disse komponentene kan beskrives digitalt og skrives ut ved behov, er det mulig å redusere både lagringsbehov og transportkapasitet. Og selv om dagens 3D-printere er relativt langsomme, vil en forsyningskjede basert på additiv produksjon med stor sannsynlighet være mere effektiv enn tradisjonell transport og etterforsyning. I alle fall dersom den kritiske komponenten ikke finnes på det fjerne lageret, og uansett må produseres før den sendes til sitt endelige bestemmelsessted.

De fleste vesentlige forsvarsmakter undersøker nå muligheter for bruk av additiv produksjon som en del av forsyningskjeden, og visjonen er til og med uttalt av den amerikanske presidenten:

«We want suppliers to be able to collaborate with customers in real-time, test their parts digitally, cut down on the time and money that they spend producing expensive prototypes. We want our manufacturers to be able to custom-design products tailored to each individual customer. We want our troops to be able to download digital blueprints they can use to 3D print new parts and repair equipment right there in the field.»

President Obama, 2014 .

4.2 Reservedelsproduksjon under Cold Response

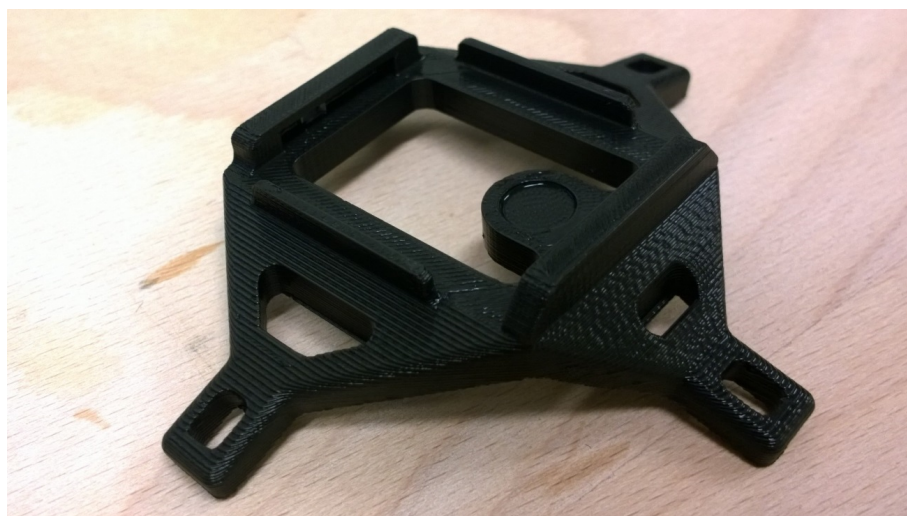
Selv om reservedelsproduksjon med additiv tilvirkning utvilsomt har et betydelig potensiale i fremtidens forsyningskjede for Forsvaret, var det i utgangspunktet ikke lagt opp til produksjon av reelle reservedeler under øvelsen. Dette var primært fordi reservedelsproduksjon i felt krever at man har tilgang på en designfil som beskriver den angitte delen. Forsvaret har per i dag ingen elektronisk reservedelsdatabase med tilhørende designfiler. En slik løsning vil dessuten kreve at man har rettigheter til å produsere kopier lokalt, enten i form av fri bruk eller ved lisensiering. Dette er langt mer en juridisk utfordring enn en teknisk utfordring, hvor det kan trekkes analogier til tilsvarende problemstillinger innen kopiering av tekst, musikk, og film.

I mangelen av reelle designfiler ble det tegnet kopier av en del eksisterende produkter der originaldelene var mal. Bruk av 3D-skanner er en alternativ metode, men dette ble ikke prøvd under øvelsen. Som tidligere nevnt vil produksjon av slike kopier, enten det foregår ved tegning eller skanning, sannsynligvis bryte med rettighetshavernes interesser. Men det er verdt å poengtere at det sjelden tas hensyn til slike begrensninger i strid. Tradisjonelt vil de verktøy og muligheter som er tilgjengelige bli benyttet slik at stridsdyktigheten kan opprettholdes. Det bør tilrettelegges for en pragmatisk holdning slik at kopiering, reparasjoner og produksjon av reservedeler kan gjennomføres raskt og uten unødvendige juridiske hindre.

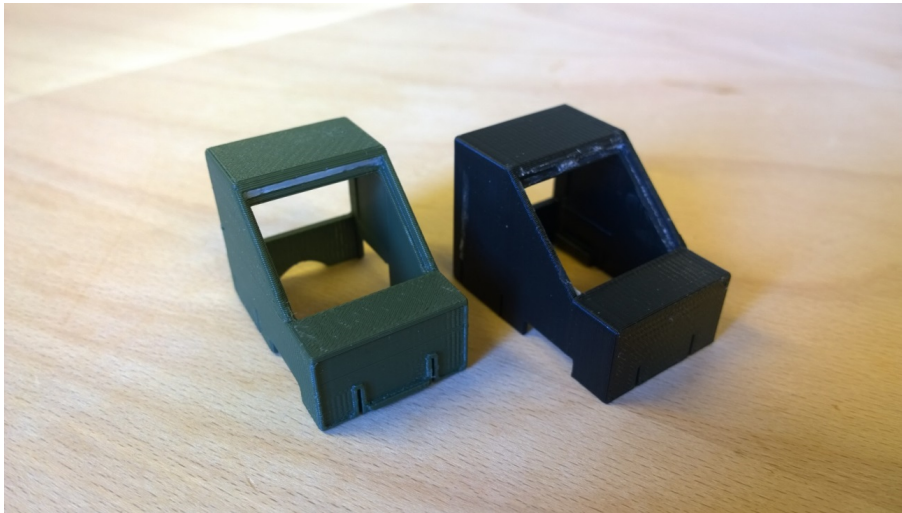
En annen problemstilling er materialkvalitet. Materialeegenskapene til en kopi vil naturligvis ikke samsvare med egenskapene til det originale produktet. Av disse grunnene ble det derfor vurdert som interessant og viktig, å undersøke hvilke muligheter som finnes for kopiering av utprinting av reservedeler i en mobil enhet.



Figur 4.1 Monteringsløsning for kompass og stoppeklokker ved angrepssvømming.



Figur 4.2 Ny versjon av Wilcox Schroud for montering av NVG på hjelm.



Figur 4.3 *Trijicon RMR Jellyfish cover, Rødpunktsiktet er sårbart for vann og skitt, noe som gir spalting av lys og flere rødprikker. Løsningen beskytter siktet mot elementene.*

Det ble konstruert navigasjonsbrett for undervannssvømming, deksel til rødpunktsikte og brakett for montasje av nattbrille (Se Figurer 4.1 - 4.3). Alle disse delene var erstatning for eksisterende deler. Kvaliteten på disse komponentene ble ikke testet, men de ble alle vurdert som fullt brukbare som erstatningskomponenter.

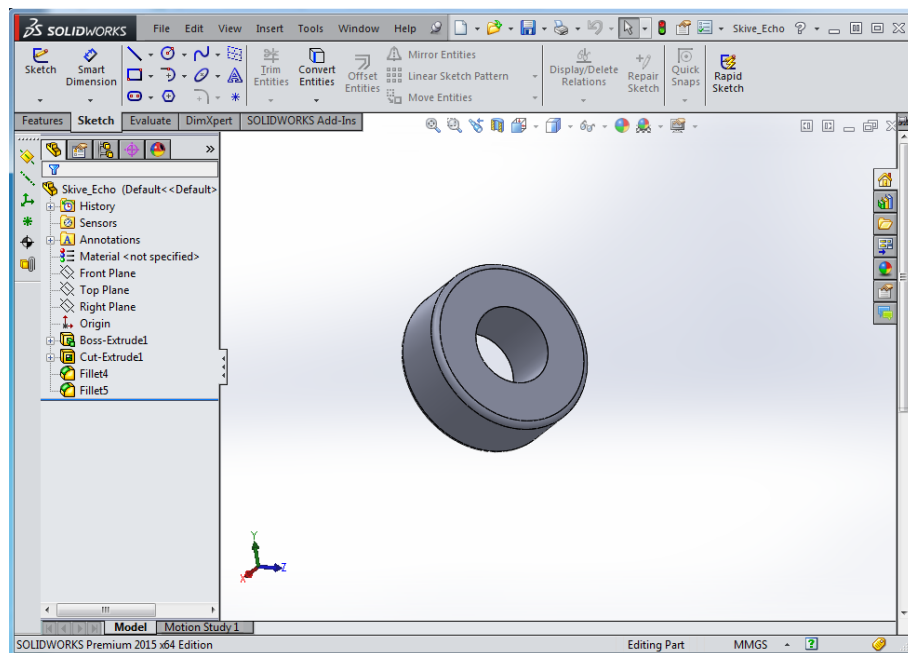
Et eksempel på en enkel, men likevel helt essensiell del for å opprettholde stridsdyktigheten, var et avstandsstykke for å montere FLIR kamera på Goldfish HPRIB (se Figur 4.4). Dette avstandsstykket manglet idet kameraet skulle monteres, og ble dermed tegnet og printet ut i løpet av 30 minutter. Kameraet kunne deretter monteres og båten kunne settes ut i øvelsen. Dette var et oppdukkende eksempel på at små deler kan ha stor effekt og minner om at det er særdeles viktig å etablere et system i Forsvaret slik at manglende eller ødelagte deler kan erstattes på kortest mulig tid.

4.3 Fremtidige muligheter

En fremtidig løsning for bruk av additiv produksjonsteknologi i Forsvaret kan bestå av:

1. Database over et sett aktuelle reservedeler. Delene er representert som digitale objekter og tilhørende konstruksjonsfiler. For kritiske komponenter bør det dessuten være gjort styrkeanalyser og det bør være et parametersett knyttet opp mot egnet printertype.
2. Et nettverk av fabrikker som kan ta i mot bestillinger. En slik fabrikk kan lokaliseres nær sagt hvor som helst og kan bestå av flere distribuerte enheter, eller være sentralisert. En slik fabrikk også kan basere seg på eksisterende sivile kapasiteter.

Det finnes allerede i dag en rekke fabrikker som tilbyr seg å lage 3D-printede objekter basert på STL-designfiler. Materialise og Shapeways er eksempler på de internasjonalt mest kjente, og kan produsere deler i en rekke materialtyper. Det finnes også norske selskaper som tilbyr generell produksjon av 3D-printede deler. De fleste slike selskaper betjener i dag kunder som ønsker



Figur 4.4 Eksempel på en liten reservedel som ble designet på få minutter i Solidworks. Delen er et avstandsstykke tilpasset montering av FLIR-kamera på Goldfish HPRIB.

prototypetjenester med additiv produksjon, men det er også en økende interesse og marked for produksjon av reservedeler. For at Forsvaret skal kunne benytte seg av slike tjenester, må imidlertid materialkvaliteten være på tilfredsstillende og kjent nivå. Dette vil kreve testing, standardisering og sertifisering. Det henvises til rapport [3] for ytterligere diskusjoner.

5 3D modellering av taktisk mål

5.1 Introduksjon

3D modellering av bygninger og områder er en kapasitet som er lite i bruk i forsvaret selv om teknologi eksisterer for å tilby dette. Modelleringen kan utføres med tilgang til enkle UAV-er med kamerasystem. Bildene kan brukes av programvare for å gjenskape området i en prosess kalt fotogrammetri. Denne prosessen kan gi detaljerte modeller av bygninger og områder som kan benyttes for bedre situasjonsforståelse eller under planleggingsfasen før en operasjon.

Fordelen med fotogrammetri er at teknikken er skalerbar i forhold til alle fysiske parametere. Kvaliteten på 3D-modellen er bare avhengig av kvaliteten på kamerasystemet som benyttes, noe som gjør at innhenting av bilder kan utføres av nesten alle tilgjengelige systemer. Dette gjør at fotogrammetri er en veldig egnet teknikk når man ikke kan garantere at alle systemer har helt like sensorpakker.

For å demonstrere muligheten og vise resultatene som kan komme ut av 3D-modelleringsprosessen, ble et enkelt eksperiment utført under øvelsen.

5.2 Eksperimentoppsett

Eksperimentet tok utgangspunkt i billig utstyr for å kunne demonstrere modellering og 3D-printing av et utvalgt taktisk mål. Hensikten var å kunne vise hvordan man ved hjelp av eksisterende utstyr kan skape bedre situasjonsforståelse ved å skape en printbar 3D-modell. Alt utstyr som ble benyttet finnes tilsvarende i Forsvaret, og programvare som ble benyttet er også tilgjengelig for forsvaret. Under eksperimentet ble det benyttet en UAV av typen 3DR-Solo² sammen med utendørskamera GoPro Hero3+³. For å kontrollere UAV-en ble det også benyttet en Android mobiltelefon med tilhørende 3DR-Solo programvare.

For å generere 3D-modelene ble CapturingReality⁴ programvare benyttet. Denne programvaren ble anskaffet av Trym Vegard Haavardsholm på prosjekt 1261 («Teknologier og metoder for multimodal avbildning») som stod for opplæring, kompetanse på fotogrammetri og har jobbet for å anskaffe programvaren til operativ bruk. For utregning ble det benyttet en HP Workstation Z820 med Nvidia GTX Titan grafikkort.

5.3 Forsøk 1 – «Treningslandsby»

Det første forsøket ble utført på en skytebane sør for Værnes. Det ble her fløyet rundt en oppsatt treningslandsby i et forsøk på å generere en modell over bygningene. Flyvningen startet ved at

²<https://3dr.com/solo-drone/>

³<https://gopro.com>

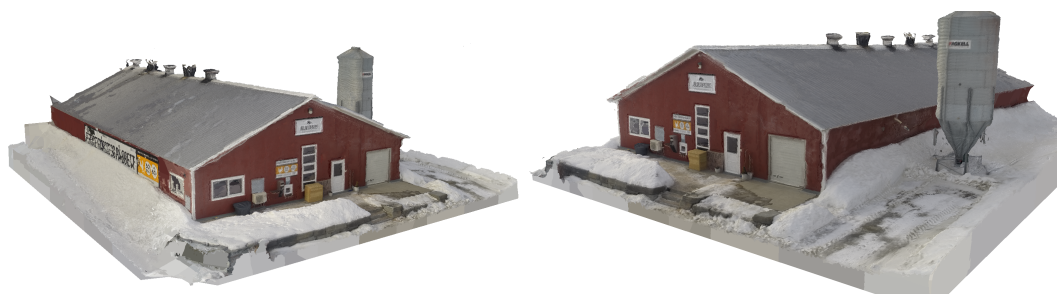
⁴<https://www.capturingreality.com>

operatøren tok av UAV-en og fløy over bygningen det var ønskelig å modellere. Deretter ble den tilhørende Android applikasjonen benyttet for å sette UAV-en i «orbit»-mode. Denne moden forteller UAV-en at den skal fly rundt et punkt med punktet som fokus for kamera. UAV-en vil så fly i en sirkel rundt punktet i en gitt høyde og avstand.

UAV-en oppførte seg fint helt til operatørfeil gjorde at den havnet inntil noen greiner og måtte lande. Operatøren byttet posisjon for å bedre kunne bedømme avstand til området rundt målet og startet på nytt. De påfølgende flyvningene fungerte helt fint og UAV-en fløy i «orbit»-mode rundt flere bygninger uten flere hendelser. Dessverre viste det seg at kameraoppsettet ikke fungerte som det skulle, og det ble ikke tatt mange nok bilder til å kunne lage en 3D-modell.

5.4 Forsøk 2 – «Gård»

Det andre forsøket ble utført på en gård ikke langt unna første forsøk. I forkant av flyvningen ble det avklart med gårdseier at man kunne fly. Da bygningen som ble ønsket modellert var noe annerledes enn foregående bygninger, ble det bestemt at UAV-en skulle styres av operatør. Operatøren styrte da posisjonen på UAV-en og kameraet slik at det ble tatt mange overlappende bilder av bygningen. Grunnet noe vanskelig posisjon for flyvningen og bygningens utforming ble det fløyet på én side av bygningen slik at operatøren hadde full sikt til UAV-en på en hver tid. Med mer avansert programvare for styring kunne dette vært gjort bedre, men på da værende tidspunkt var dette ikke tilgjengelig.



Figur 5.1 3D-modell av gård.

Totalt ble det over 1000 bilder av bygningen som tilsvarte en detaljert modell, se Figur 5.1. Denne modellen ble etterpå printet slik at 3D-modell og fysisk produkt kunne fremvises.

5.5 Forsøk 3 - «Skur»

Det siste eksperimentet ble utført på en BMX-treningsbane sør for Værnes og ble utført for å sikre nok bilder til en ordentlig 3D-modell. Det ble funnet et lite skur som det ble fløyet i «orbit»-mode flere ganger. UAV-en utførte alle flyvninger uten problemer og alle UAV-systemer fungerte som de skulle. Det ble opplevd litt problemer med kamerasystemet da dette både er koblet til UAV, men også styrt av operatør før avgang. For å sikre bilder til modellering ble kameraet satt til å ta kontinuerlig enkeltbilder. Dette er en innstilling som ikke er godt støttet av UAV og det ble opplevd at UAV-en gjennom sitt styringssystem kunne skru av kameraet under spesielle omstendigheter. Bortsett fra disse problemene fungerte alt, og 3D-modell ble produsert.



Figur 5.2 UAV-flyvning. 3D-modell fra denne flygningen vises Figur 5.1.

5.6 Resultater

Med bildene fra forsøk 2 og 3 ble det skapt 3D-modeller. CapturingReality ble benyttet og alle bildene av mål ble valgt ut for rekonstruksjon. Programvaren anses som enkel i bruk, og det viktigste er å velge ut bilder som passer. I dette steget er det nok å se over bildene og påse at det er samme mål som er dekket. Dette gjør det raskere og enklere for programvaren å gjenskape en 3D-modell. Prosessen med utvelgelse av bilder tar under fem minutter å utføre. Programmet vil deretter finne punkter i alle bildene som passer sammen for å skape et raskt inntrykk for operatør over modellen. Dette tok mellom 10 minutter og 1 time avhengig av antall bilder. Operatøren kan deretter bestemme omfanget av 3D-modellen for så at programmet beregner en modell. Beregningen av modell er en tung prosess og tok mellom to og åtte timer. Modellene som ble skapt er av høy kvalitet og mye detaljer kan utpekes.

6 Erfaringer med 3D-printing i krevende miljøer

I hovedsak fungerte konseptet med mobil kontainerbasert produksjonskapasitet meget bra. De største utfordringene med den konseptuelle løsningen er listet under:

1. Strømvbrudd. Under øvelsen ble det opplevd flere strømvbrudd. Et strømvbrudd avbryter produksjonen i 3D-printeren, og komponenten som produseres må som regel kastes. I tillegg er det tidkrevende å gjøre maskinen klar for produksjon når strømmen kommer tilbake. Dysen kan tettes ved strømvbruddet, og i tillegg må maskinen varmes opp dersom den er nedkjølt, og den må ofte kalibreres på nytt. Strømvbrudd er langt fra uvanlige, verken i øvelser eller i reelle operasjoner. Det er med andre ord behov for en batteribasert strømforsyning som kan tre i kraft når strømmen avbrytes.
2. Produksjonstid. Tiden 3D-printeren bruker for å produsere en komponent er sterkt begrensende for hvor mye som kan produseres. De største komponentene hadde produksjonstid på over 40 timer. I tillegg går det med tid til fjerning av støttemateriale. Ved prototyp utvikling vil dyktige ingeniører kunne bruke langt kortere tid på å tegne en komponent enn den tiden det tar å produsere den. Kontainerløsningen bør dermed utstyres med raskere maskiner, eventuelt flere maskiner. Utviklingen innen dette feltet pågår stadig, og nyvinninger innen FDM-teknologien kan muliggjøre langt raskere produksjon enn hva som er mulig i dag. Andre printerteknologier kan også vurderes.
3. Materialer. Under øvelsen var vi begrenset til ulike ABS-plastmaterialer og nylon. Selv om det er mulig å lage erstatningskomponenter for mange deler i ABS er det opplagt at andre materialtyper er nødvendige i en endelig løsning. 3D-printere for metall må også vurderes på noe lengre sikt.
4. Arbeidsforhold. Selv under en øvelse er det krevende å arbeide lange dager i en trang kontainer. Arbeidsbelysning, vinduer og luftkvalitet påvirker arbeidsforholdene. I en operativ situasjon blir dette spesielt viktig. Ergonomien på arbeidsplassen er dessuten avgjørende for å kunne arbeide effektivt og smidig. Kanskje bør det legges til rette for noe mer fleksibilitet i plasseringen av de ulike komponentene inne i kontaineren.

7 Oppsummering og konklusjon

Feltforsøket viste først og fremst at additiv produksjonsteknologi har stor verdi som prototypverktøy. Det ble i samarbeid med Forsvarets spesialstyrker utviklet og produsert 32 ulike prototyper og deletilpasninger under de to ukene forsøket varte, og samarbeidet med operatørene var meget godt. Ved ulike anledninger har operatører og soldater i Forsvaret etterspurt et system for å innhente og videreutvikle kreative idéer. En mobil produksjonsløsning vil være et naturlig «nav» i et slikt system.

3D-modellering av ulike taktiske mål ble gjennomført ved hjelp av bilder fra ubemannede helikoptre. Fysiske modeller ble skrevet ut under øvelsen. Slike fysiske modeller antas å være spesielt nyttige under planleggingen av operasjoner.

Produksjon av reservedeler i felt er sannsynligvis det området hvor additiv produksjonsteknologi vil ha størst betydning for Forsvaret, både operasjonelt og økonomisk. Teknologien gjør det mulig å redusere lagerbehov og transportkostnader og vil gi operatører og vedlikeholdspersonell langt større deletilgang enn hva som er mulig med dagens forsyningskjede. Utvikling innen materialer og printerteknologi vil kunne aktualisere en ny forsyningskjede i fremtiden, spesielt dersom det lar seg gjøre å produsere metallkomponenter i felt. Men feltforsøket viste at det allerede i dag er mulig å produsere enkelte reservedelskomponenter i felt. Gjennom økt bruk og satsning vil kunnskapsnivået øke betraktelig og således også operativ nytte. Samtidig finnes det en del juridiske avklaringer vedrørende kopiering og lisensiering av deleproduksjon som må avklares. I tillegg må selve produksjonsprosessen kvalitetssikres.

Videre arbeid med konseptet vil derfor måtte inkludere både tekniske, juridiske og produksjonstekniske problemstillinger samt praktiske forsøk innen flere arenaer. En analyse av hvilke komponenter som er mest egnet for additiv tilvirkning er gjennomført for Forsvarets Spesialstyrker av Norberg og Østereng [4] (kortversjon er vedlagt i [3]). Dette arbeidet bør videreføres og inkludere andre forsvarsgrener slik at det etableres en oversikt over hvilke oppdragskritiske deler som kan og bør tilrettelegges for additiv tilvirkning i felt.

Referanser

- [1] H. Hovland, "Feltmessig bruk av 3D-printer - 3D-printing før og under Trial EMBOW 14," FFI-Rapport-2016/02233, Begrenset, 2016.
- [2] M. Huseby, L. H. Bakstad, J. Flathagen, T. Haavardsholm, E. Larsen, F. Lillevold, K. Longva, S. E. Rustad, B. Sagsveen, Å. G. Solheim, N. Størkersen, M. Söderblom, O. H. Arnesen, L. Asak, T. Berger, E. Berg-Knutsen, P. Dalsjø, T. Frømyr, H. Gullbekk, O. E. Hegdal, A. Johnsen, S. Kristoffersen, G. Nonsvik, R. Otnes, H. Rosslund, O. J. Sendstad, T. Skauli, C. Solberg, F. B. Steder, A. Strømseng, I. Tansem, "Behovsorientert teknologi for spesialstyrkene," FFI-Rapport-2015/00697, Konfidensiell, 2015.
- [3] J. Flathagen, J. R. Nilssen, "Deltakelse på «AVT-258 Specialists Meeting on Additive Manufacturing for Military Hardware»," FFI-Reisenotat-2016/01001, 2016.
- [4] C. D. Norberg og P. T. Østereng, "Additive Manufacturing in the Spare Parts Supply Chain of Military Organisations," Norwegian School of Economics, 2015.

About FFI

The Norwegian Defence Research Establishment (FFI) was founded 11th of April 1946. It is organised as an administrative agency subordinate to the Ministry of Defence.

FFI's MISSION

FFI is the prime institution responsible for defence related research in Norway. Its principal mission is to carry out research and development to meet the requirements of the Armed Forces. FFI has the role of chief adviser to the political and military leadership. In particular, the institute shall focus on aspects of the development in science and technology that can influence our security policy or defence planning.

FFI's VISION

FFI turns knowledge and ideas into an efficient defence.

FFI's CHARACTERISTICS

Creative, daring, broad-minded and responsible.

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.

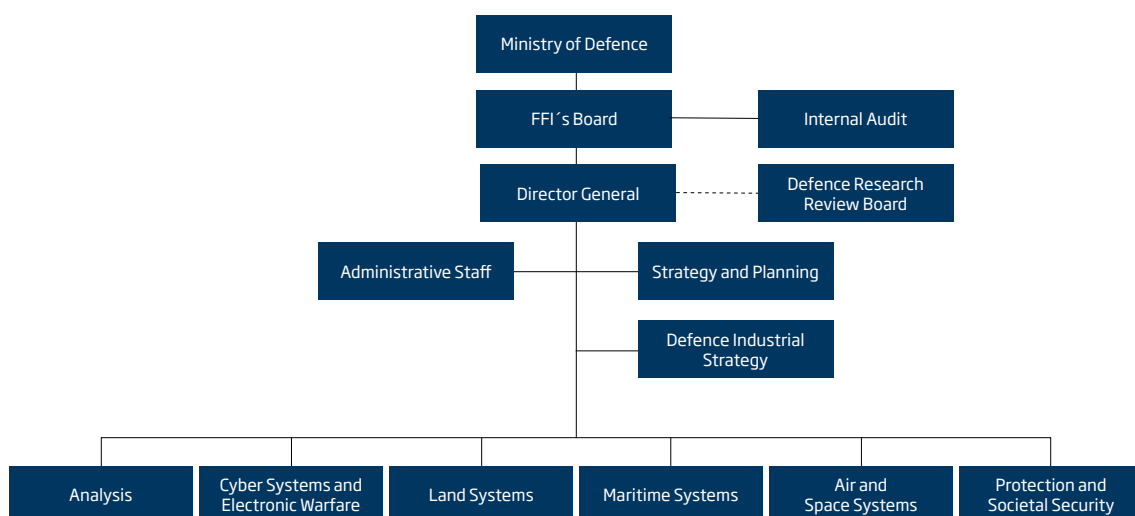
FFIs VISJON

FFI gjør kunnskap og ideer til et effektivt forsvar.

FFIs VERDIER

Skapende, drivende, vidsynt og ansvarlig.

FFI's organisation



Forsvarets forskningsinstitutt
Postboks 25
2027 Kjeller

Besøksadresse:
Instituttveien 20
2007 Kjeller

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