



FFI Forsvarets
forskningsinstitutt

24/01108

FFI-RAPPORT

Syntetisk biologi og bioteknologi i forsvarssektoren

Anne Ohren Nordraak
Else Marie Fykse

Syntetisk biologi og bioteknologi i forsvarssektoren

Anne Ohren Nordraak
Else Marie Fykse

Emneord

Syntetisk biologi
Bioteknologi
Teknologiske trender
Forsvarssektoren

FFI-rapport

24/01108

Prosjektnummer

160701

Elektronisk ISBN

978-82-464-3564-0

Engelsk tittel

Synthetic biology and biotechnology for Defence

Godkjennerne

Marius Dybwad, *forskningsleder*
Janet Martha Blatny, *forskningsdirektør*

Dokumentet er elektronisk godkjent og har derfor ikke håndskreven signatur.

Opphavsrett

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

Sammendrag

Syntetisk biologi og bioteknologi er et felt i rask utvikling som forventes å få bred anvendelse innenfor mange områder i samfunnet, både sivilt og militært. Teknologiene løftes frem av Nato Science and Technology Organization (STO) som banebrytende og fremvoksende teknologier (Emerging and Disruptive Technologies, EDTs) som forventes å få stor betydning for militære operasjoner i fremtiden. Denne rapporten peker på teknologiske trender innenfor syntetisk biologi og bioteknologi som kan være aktuelle for forsvarssektoren. De utvalgte teknologiene er basert på åpent tilgjengelig ugradert faglitteratur innenfor bioteknologi og syntetisk biologi.

Samtidig som teknologien forventes å få stor betydning, kan den samme teknologien også utnyttes av dem som har onde hensikter. I denne rapporten fremheves de positive mulighetene innenfor syntetisk biologi og bioteknologi. Vi har satt søkelys på følgende:

- Bioteknologi og menneskelig forbedring er vitenskapelige prioriteringsområder i Nato, og det inkluderer bruk av både bioteknologiske og ikke-bioteknologiske metoder for å overgå normale menneskelige begrensninger eller evner.
- Bruk av gensekvensering er en effektiv metode for deteksjon, identifikasjon og monitorering (DIM) av trusselstoffer og genetisk endrede mikroorganismer.
- Biosensorer for rask diagnostikk og deteksjon av biologiske trusselstoffer i laboratorier og i felt er viktig for at Forsvaret skal være operativt, men også avgjørende for det sivile samfunn.
- Nye materialer kan for eksempel gjøre det mulig for Forsvaret å operere i miljøer med ekstreme temperaturer eller å benytte seg av materialer som avgir lave signaturer og er vanskelig å detektere (kamouflasje).
- Miljø og klima er ikke viktig bare for det sivile samfunn, men også for Forsvaret. Viktige teknologiområder i denne sammenhengen er utviklingen av innovative energibærere og miljøvennlig bioremediering og biosensorer til miljøovervåking.
- Norge har et strengt regelverk for bruk av bioteknologi og genmodifiserte organismer (GMO). Reglene for GMO-begrensninger varierer fra land til land, og det er viktig at det kommer på plass et rammeverk for bioteknologi og syntetisk biologi som er harmonisert med andre land. Det vil føre til at det blir lettere å utnytte bioteknologi og syntetisk biologi til nyttige formål på tvers av landegrensener.
- Syntetisk biologi er viktig for at samfunnet når FNs bærekraftsmål innenfor områder av særskilt betydning for Forsvaret og sivilsamfunnet.

Vi anbefaler at Forsvaret og sektoren styrker samarbeidet med sivile forskningsinstitusjoner og utnytter kunnskapene og bioteknologien til å forbedre nasjonal forsvarsevne.

Summary

Synthetic biology and biotechnology are rapidly developing fields that are expected to be widely used in many areas of society, both civil and military. These technologies are highlighted by NATO Science and Technology Organization (STO) as Emerging and Disruptive Technologies (EDTs) and are expected to be important to military operations in the future. This report points to technological trends within synthetic biology and biotechnology that may represent relevant technological investments for the defence sector. We provide an overview of selected technology trends, available in open literature, within biotechnology and synthetic biology.

Synthetic biology is expected to be important to both civil and military use in the future. However, the same technology can also be exploited to cause harm. Our report is limited to identifying the positive opportunities of synthetic biology and biotechnology. We have focused on the following:

- Biotechnology and human enhancement are scientific priority areas in NATO, and this includes the use of both biotechnological and non-biotechnological methods to overcome normal human limitations or abilities.
- Sequencing technologies can be used for detection, identification and monitoring (DIM) of hazardous biological compounds and genetically modified microorganisms.
- Development of biosensors for rapid diagnostics and detection of biological threats in the laboratory and field is important for the Armed Forces and for the civil society as well.
- Trends in synthetic biology point towards the development of new materials that could enable the Armed Forces to operate in environments with extreme temperatures or to use materials that emit low signatures and are difficult to detect (camouflage).
- The environment and climate are important not only for civil society but also for the Armed Forces. Technologies include innovative energy solutions and methods for more environmentally friendly bioremediation and biosensors for environmental monitoring.
- Norway has strict regulations for the use of biotechnology and genetic modified organisms (GMO). The rules for GMO restrictions differ from country to country, and it is important that a harmonized framework for biotechnology and synthetic biology is put in place within other countries. This would enable the use of biotechnology and synthetic biology across national borders for useful purposes. Synthetic biology is important for society to achieve the UN's sustainability goals in areas of particular importance to the Armed Forces and civil society.

We recommend that the defence sector strengthens its collaboration with civilian research institutions to better monitor the developments in science and technology and leverage knowledge and technology to enhance defence capabilities.

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	3
Summary	4
Forord	7
Forkortelser og begreper	8
1 Innledning	9
1.1 Syntetisk biologi og definisjoner	10
1.2 Syntetisk biologi og FN's bærekraftsmål	13
1.3 Utnyttelse av syntetisk biologi til ikke-fredelige formål («Dual-Use»)	14
1.4 Syntetisk biologi og bioteknologi i forsvarssektoren – Hvilke muligheter finnes?	15
1.5 Rapportens oppbygging	19
2 Soldatforbedring	20
3 Vern mot kjemiske og biologiske trusselstoffer	21
3.1 Deteksjon og identifikasjon av biologiske trusselstoffer	21
3.2 Medisinske motmidler mot biologiske trusselstoffer	22
3.3 Rens (hazard management)	22
3.3.1 Enzymer	22
4 Biosensorer	24
5 Materialer og tekstiler	25
5.1 Kjemikalieproduksjon	26
5.2 Syntetiske tekstiler	26
5.3 Adhesiver	27
5.4 Funksjonelle materialer	27
5.4.1 Signaturreduksjon og aktiv kamuflasje	27
5.4.2 Andre smarte/levende egenskaper	28
5.5 Biosement	28
6 Miljø og klima	29
6.1 Energibærere	29
6.1.1 Biodrivstoff	29

6.1.2	Mikrobielle brenselceller	30
6.2	Bioremediering	30
6.2.1	Mikroplast	30
6.2.2	Eksploder	31
6.3	Miljøovervåking	31
7	Regulering	32
8	Oppsummering og anbefalinger	33
	Referanser	35

Forord

Denne rapporten er en leveranse i forskningsprosjektet 1607 og inngår i aktiviteten syntetisk biologi og bioteknologi forsvarssektoren. Formålet med rapporten er å undersøke mulighetsrommet syntetisk biologi og bioteknologiens utvikling gir for forsvarssektoren. Rapport 23/01821 tok utgangspunkt i mulighetene som ligger i utnyttelsen av denne utviklingen innenfor medisin og CBRN-teknologier. Disse rapportene er en videreføring av NATO STO langtidsstudien av teknologisk utvikling innenfor CBRN-vern, ledet av FFI.

Vi ønsker å takke bidragsyterne til denne rapporten. En spesiell takk til kollega ved Forsvarets forskningsinstitutt, Dr. Kristian Blindheim Lausund, for verdifulle og viktige innspill.

Kjeller, 12. november 2024

Anne Ohren Nordraak
Else Marie Fykse

Forkortelser og begreper

CB	Kjemisk og biologisk
CBRN	Kjemisk, biologisk, radionukleær
DIM	Deteksjon, identifikasjon og monitorering
DNA	Deoksyribonukleinsyre
DoD	US Department of Defense
EDT	Emerging and disruptive teknologier (banebrytende og fremvoksende)
HFM	Human Factors and Medicine
Point-of-care diagnosikk	Medisinsk diagnostisk test på eller i nærheten av pasienten
RNA	Ribonukleinsyre

1 Innledning

Analyse av teknologiske trender er viktig for å identifisere nye forsvarsrelevante teknologier som kan ha innvirkning på militære operasjoner og forsvaret av Norge. Bioteknologi og menneskelig forbedring er fremhevet i rapporter fra NATO Science and Technology Organization (STO) og forsvarsforskningsinstitusjoner som banebrytende (disruptive) med potensial til å ha stor innvirkning på fremtidige militære operasjoner [1-3].

I NATO Science and Technology Trend-rapporten for 2023-2043 blir bioteknologi og syntetisk biologi fremhevet som vitenskapelige prioriteringsområder for forsvar og sikkerhet. Dette inkluderer teknologier som raske gensekvenseringsteknologier, biosensorer, bruken av syntetisk biologi innenfor motiltak mot kjemiske- og biologiske trusselstoffer og produksjon av forbrukerprodukter som biodrivstoff og medisiner [1].

I første halvdel av 2024 kom Nato ut med sin strategi for bioteknologi og menneskelig forbedring, der det predikeres at disse områdene vil kunne påvirke økonomi, samfunn, sikkerhet og forsvar på uante måter [4]. Forsvaret må derfor holde seg løpende oppdatert om, og raskt og effektivt utnytte, syntetisk biologi og bioteknologiske fremskritt til egen fordel. Syntetisk biologi er identifisert som et teknologiområde innenfor bioteknologi av NATO STO og har blitt studert i panelet Human Factors and Medicine (HFM).

En arbeidsgruppe i Nato¹ har sett på hvilke muligheter utnyttelse av ny teknologi har for Natos forsvarsstruktur og forsvarsevne, og hva som kan skje hvis slik teknologi ikke tas i bruk [5]. Eksempler på teknologier som med stor sannsynlighet vil påvirke fremtidige militære operasjoner er produksjon av drivstoff, medisiner og materialer, soldatforbedring, vern mot kjemiske og biologiske trusselstoffer, utvikling av biosensorer, jordbruk og koding og computere [5].

CBRN er en forkortelse for kjemiske (C), biologiske (B), radionukleære (RN) trusler. Det inkluderer alt fra virus og bakterier til kjemiske stridsmidler, giftstoffer (toksiner) og radiologiske stoffer. En NATO STO langtidsstudie ledet av FFI på CBRN-vern [6] analyserte nåværende og fremtidige CBRN trusler frem til 2030 med fokus på nye vitenskapelige og teknologiske fremskritt. Syntetisk biologi, bioteknologi, kunstig intelligens og maskinlæring og synergier mellom disse teknologiene ble trukket frem som fremvoksende og banebrytende teknologier, men utnyttelse av slik teknologi blir også sett på som en mulig sikkerhetsutfordring («dual use»). Denne rapporten er en oppfølging av langtidsstudien der vi har et bredere teknologisk fokus.

Den teknologiske utviklingen går raskt og antall publiserte artikler som nevner syntetisk biologi har vokst dramatisk de siste 10 årene. I PubMed databasen² (24.10.2024) rapporteres det totalt 45.875 publiserte artikler som nevner syntetisk biologi, hvorav 12.468 av disse kommer fra Kina og 10.309 fra USA. Skillet mellom sivil og militær teknologi blir mindre og industriell utnyttelse av bioteknologi og syntetisk biologi er raskt økende. Det er anslått at sektoren vil vokse til 100 milliarder USD innen 2025 [7]. Flere land utvikler strategier for å posisjonere seg for denne utviklingen. Det amerikanske forsvarsdepartementet³ ga i 2023 ut en strategi for biobasert produksjon («biomanufacturing») basert på bioteknologi og syntetisk biologi [8]. Formålet med

¹ NATO STO RTG HFM-305 Synthetic Biology for Defence

² <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>

³ US Department of Defense (DoD)

strategien er at bioteknologi og bioproduksjon skal styrke forsyningskjeder, forbedre logistikk og produsere nye materialer som Forsvaret trenger. I 2024 publiserte EU en handlingsplan til støtte for bioteknologi og bioproduksjon innenfor EU [9] med formål om å modernisere landbruk, skogbruk, energi, mat og fôrproduksjon og industri innenfor EU-land. Danmark har utviklet en nasjonal strategi for grønne arbeidsplasser og bio-løsninger som skal opprettholde og styrke Danmarks ledende posisjon innenfor bioproduksjon i landbruket og matproduksjon [10]. Storbritannia har lansert en nasjonal visjon for bioteknologi og syntetisk biologi for å peke ut videre satsing innenfor området [11].

1.1 Syntetisk biologi og definisjoner

Syntetisk biologi er et felt i rask og sterk utvikling. Begrepet gjenspeiler at man kan fremstille lange DNA-tråder (syntetisk DNA). Kombinert med stadig økende mengder av genetisk informasjon, også kalt stordata, kan man ved hjelp av syntese av genetisk materiale designe og fremstille helt eller delvis kunstige biologiske systemer med nye egenskaper, fra enkeltmolekyler til hele organismer. Syntetisk biologi er en kraftig effektivisering av genteknologi, som har eksistert i flere tiår, og bygger på fagdisipliner og teknologier som bioteknologi, genteknologi, molekylærbiologi og datateknologi

Mulighetene teknologiene kan gi er enorme. Ved redesign av eksisterende organismer og biologiske strukturer kan celler omprogrammeres til å få helt nye egenskaper, for eksempel bli til nyttige fabrikker (såkalt «biomanufacturing» eller bio-produksjon) som produserer alt fra kjemikalier til biodrivstoff. Flere gener satt sammen til en enhet kan eksempelvis tilsvare flere trinn i en biokjemisk reaksjonsvei og være en «funksjonspakke» som kan settes inn i flere ulike organismer for å introdusere den ønskede egenskapen. Slike «funksjonspakker» kalles ofte for en gen-kassett eller «biobricks». Denne egenskapen kan for eksempel være å produsere kjemikalier, biodrivstoff eller andre ting. Kunstig intelligens og maskinlæring bidrar til prosessen og gjør den mer effektiv.

Prinsippet om å se på gener og grupper av gener som en type «biobricks» som kan flyttes rundt, er et kjennetegn ved syntetisk biologi [12]. Forståelse av biologiske mekanismer og hvordan disse kan modifiseres ved hjelp av bioteknologi er grunnlaget for at teknologien kan brukes til å produsere miljøvennlig energi, nye materialer, batterier, nye medisiner, til behandling av sykdommer og gi nyttige anvendelser innenfor landbruk. Integreringen av beregninger med kunstig intelligens i biologi bidrar til forståelse av hvordan genetiske forskjeller påvirker utviklingen av levende organismer, mottakelighet for sykdommer, reaksjoner på medisiner og behandlinger. Automatisering og utvikling av roboter som utfører eksperimenter er under utvikling og vil gjøre eksperimenter lettere å utføre. Andre viktige teknologier er nanoteknologi og additiv tilvirkning (3D-printing).

I faktaboksen defineres viktige begreper som benyttes ved omtale av syntetisk biologi og bioteknologi.

Definisjoner

Biobricks: Biologiske systemer i en celle er bygget opp av flere gener som virker sammen. Slike byggeklosser er standardisert og kan settes sammen på ulike måter for å lage nye systemer.⁴

Biokjemi: «Læren om kjemiske strukturer og kjemiske prosesser i levende organismer (det molekylære grunnlaget for liv). Biokjemi tar for seg strukturen og funksjonen av cellulære komponenter, slik som proteiner, karbohydrater, lipider, nukleinsyrer og andre biomolekyler».⁵

Bioremidiering: Prosesser der mikroorganismer brukes til å fjerne uønskede kjemiske forbindelser fra miljøet.

Bioteknologi: «Samlebetegnelse på virksomheter og teknologi der man bruker mikroorganismer, planter eller dyr til å fremstille produkter».⁶

Biomanufacturing: Bruk av celler eller mikroorganismer til produksjon av kommersielt viktige produkter (biobasert produksjon). Eksempler er vaksiner, monoklonale antistoffer, proteiner, kjemikalier.

DNA og RNA: DNA og RNA finnes i alle celler. DNA er arvemateriale og bestemmer hvilke gener som det kodes for. RNA bidrar til å dekode DNA og bestemmer hvilke gener som kommer til uttrykk.

Funksjonell genomikk: Teknologi for å knytte gener til spesifikke funksjoner og andre typer metadata for mennesker, dyr, planter og mikrober.⁷

Genetikk: «Et fag i biologien hvor man studerer gener, genenes variasjon og hvordan genene arves fra én generasjon til den neste. Gener, også kalt arveanlegg, er oppskrifter for egenskaper hos levende organismer slik som fargen på en blomst, at insekter har seks ben, høyden på et tre, hårfarge, og mange andre ting».⁸

⁴ Kilde: [Syntetisk biologi - Bioteknologirådet \(bioteknologiradet.no\)](https://www.bioteknologiradet.no)

⁵ Sitat - Kilde: Biokjemi – Wikipedia

⁶ Sitat - Kilde: [Ordforklaringer - Bioteknologirådet \(bioteknologiradet.no\)](https://www.bioteknologiradet.no)

⁷ C. Caudai *et al.*, "AI applications in functional genomics," *Computational and Structural Biotechnology Journal*, vol. 19, pp. 5762-5790, 2021.

⁸ Sitat - Kilde: [Genetikk – Store norske leksikon \(snl.no\)](https://snl.no)

Genomikk: «Genomikk er studiet av alle genene til en organisme (genomet), inkludert hvordan genene samspiller med hverandre og miljøet.»⁹

Genteknologi: «Teknologi hvor man jobber med arvematerialet (DNA) i laboratoriet for å endre organismers genetiske sammensetning. Genteknologi består av mange forskjellige teknikker hvor genspleising og genomredigering står sentralt».¹⁰

Kunstig intelligens (KI): «Kunstig intelligente systemer utfører handlinger, fysisk eller digitalt, basert på tolkning og behandling av strukturerte eller ustrukturerte data, i den hensikt å oppnå et gitt mål. Enkelte KI-systemer kan også tilpasse seg gjennom å analysere og ta hensyn til hvordan tidligere handlinger har påvirket omgivelsene».¹¹

Molekylærbiologi: «Et fagfelt innenfor biologien som studerer strukturen og funksjonen til biologiske molekyler og makromolekyler, og hvordan molekylene påvirker hverandre og samhandler. Biologiske molekyler er forbindelser som stammer fra og fungerer som byggesteiner i alle levende organismer, som for eksempel deoksyribonukleinsyre (DNA) og ribonukleinsyre (RNA)».¹²

Syntetisk biologi: «Bruk av genteknologiske metoder for å designe og fremstille kunstige biologiske systemer med nye egenskaper, fra enkeltmolekyler til hele organismer».¹³

Syntetisk DNA: DNA er arvemateriale i alle celler. Det syntetiseres fra fem byggestener (fire baser og et sukkermolekyl). Syntese av DNA skjer i alle celler ved celledeling. DNA kan også syntetiseres utenfor cellene i laboratorier og kalles da syntetisk DNA.

⁹ Sitat - Kilde: [Ordforklaringer - Bioteknologirådet \(bioteknologiradet.no\)](https://www.bioteknologiradet.no/ordforklaringer)

¹⁰ Sitat - Kilde: [genteknologi – Store medisinske leksikon](https://www.storemedisinskeleksikon.no/genteknologi)

¹¹ Sitat - Kilde: [Hva er kunstig intelligens? | Digdir](https://www.digdir.no/hva-er-kunstig-intelligens/)

¹² Sitat - Kilde: [Molekylærbiologi – Store medisinske leksikon \(snl.no\)](https://www.storemedisinskeleksikon.no/molekylarbiologi)

¹³ Sitat - Kilde: [Ordforklaringer - Bioteknologirådet \(bioteknologiradet.no\)](https://www.bioteknologiradet.no/ordforklaringer)

1.2 Syntetisk biologi og FN's bærekraftsmål

Forsvarssektoren har ambisjon om å løse sine oppgaver i tråd med FN's bærekraftsmål, som også er uttrykt i langtidsplanen for Forsvaret¹⁴. Syntetisk biologi kan bidra til at samfunnet når FNs bærekraftsmål innenfor områder av særskilt betydning for Forsvaret og sivilsamfunnet. Generelt kan mange av bærekraftsmålene direkte eller indirekte påvirkes av utviklingen innen syntetisk biologi og bioteknologi, spesielt innen utvikling og produksjon av materialer og råvarer og medisinske fremskritt (Tabell 1.1).

Tabell 1.1 Eksempler på hvordan syntetisk biologi og bioteknologi kan bidra til å nå noen av FNs bærekraftsmål [14].

Bærekraftsmål	Hvordan syntetisk biologi og bioteknologi kan bidra til å nå bærekraftsmålene
2. Utrydde sult, oppnå matsikkerhet, bedre ernæring og bærekraftig landbruk	Utvikling av genmodifiserte planter som er motstandsdyktige mot skadedyr og tørke, samt utvikling av mer næringsrike avlinger.
3. Sikre helse og sunne liv	Utvikle mer presise og tilgjengelige diagnostiske verktøy, vaksiner og behandlingsmetoder for ulike sykdommer.
7. Sikre bærekraftig energi som alle kan ha råd til	Utvikling av biobrensel og andre former for bærekraftig energi.
9. Bygge infrastruktur, fremme inkluderende og bærekraftig industrialisering og bidra til innovasjon	Utvikling av nye metoder for produksjon og utvikling av nye materialer.
10. Sikre bærekraftig forbruk, og gode produksjonsmetoder	Utvikling av bioteknologiske metoder for å redusere avfall og forurensning innen industriell produksjon, samt mer bærekraftige produksjonsmetoder og produkter.
14. Bevare hav og marine ressurser	Utvikling av bioteknologiske metoder for å overvåke og beskytte marine økosystemer, samt utvikle bærekraftig havbruksteknologi.
15. Beskytte og fremme økosystemer og naturressurser på en bærekraftig måte	Gjenoppretting av ødelagte økosystemer ved hjelp av syntetiske biologiske metoder, samt utvikling av bærekraftig skogbruk og jordbrukspraksis.

¹⁴ Prop87S(2023-2024) (regjeringen.no)

1.3 Utnyttelse av syntetisk biologi til ikke-fredelige formål («Dual-Use»)

Fremvoksende teknologier som syntetisk biologi, kunstig intelligens, bioinformatikk, utnyttelse av stordata og nye biologiske designverktøy [15] kan benyttes til mange nyttige og fredelige formål både sivilt og militært, men har også et potensial for misbruk [16-18]. Det er økt bekymring for ondssinnet bruk av disse teknologiene («dual-use») på grunn av åpen tilgang til patogeners genomsekvenser, økt tilgjengelighet av teknologien, lavere kostnader og de muligheter som konvergens av kunstig intelligens og syntetisk biologi gir [19]. Dette understreker nødvendigheten av å holde seg oppdatert på teknologiske fremskritt for å effektivt motvirke mulige ondssinnede anvendelser.

Utvikling av dataprogrammet AlphaFold¹⁵ regnes som en «game-changer» innenfor prediksjon av proteinstruktur basert på sekvensdata [15]. Det kan blant annet brukes til å designe nye DNA-sekvenser med nye funksjoner, finne mønstre i store datasett og til å forutsi effekter av endring av DNA-sekvensen, samt designe nye forbindelser med ønskede egenskaper (for eksempel antibiotika). Bekymringen er at uforsiktig eller ondssinnet bruk av syntetisk biologi kan få ødeleggende konsekvenser hvis den brukes til å utvikle nye biologiske eller kjemiske stridsmidler.

Ved hjelp av syntetisk biologi kan gamle og nye virus syntetiseres og gjenskapes i laboratoriet. Eksempler på syntese av virus er poliovirus [20, 21], influensavirus type H1N1 (spanskesykevirus) [22], Ebola virus [23] og flere [24, 25]. Allerede i 2001 ble en vaksineresistent variant av Muekoppe laget [26]. Senere er også hestekoppeviruset syntetisert og gjenskapt [27]. Publisering av dette arbeidet skapte mye debatt, og kritikerne mente at publisering av dette nærmest var å publisere oppskriften på hvordan man kan gjenskape koppeviruset [28, 29]. Gjentatte epidemier med koppevirus herjet i verden i flere hundre år og sykdommen var svært dødelig [30]. Ved hjelp av vaksine ble sykdommen utryddet i 1980 [31]. Offisielt finnes koppeviruset kun i to laboratorier i verden, i USA og Russland. Det er frykt for at viruset skal vende tilbake og spre sykdom i en befolkning der store deler ikke er vaksinert. Gjenskaping av viruset ved bruk av syntetisk biologi gir økt frykt for at dette skal skje [32]. I tillegg til å syntetisere og gjenskape virus som er farlig for mennesker kan mikroorganismer endres og gjøres mer smittsomme mellom mennesker, mer dødelige, mer resistente mot behandling og mer stabile slik at mikroorganismene lettere overlever, noe som gjør dem mer egnet som biologiske våpen [33, 34]. Denne type forskning omtales ofte som «Gain of Function, GOF».

Teknologier for menneskelig forbedring utgjør også forsvars- og sikkerhetsrisikoer som Norge og våre alliansepartnere må beskytte seg mot. Det finnes en rekke aktører som ikke opererer etter de samme etiske prinsippene som vi gjør, og gjerne er villig til å gå langt for å oppnå strategiske fordeler. Dette inkluderer styrking av eget personell, samt forsøk på å svekke motstanderens styrker ved å utnytte kognitive, fysiske eller teknologiske sårbarheter for å oppnå militære fordeler [4].

I 2023 publiserte den Britiske regjeringen en strategi for å øke beredskap mot biologiske trusler [35]. Formålet med strategien er å beskytte samfunnet mot biologiske trusler, uavhengig av om truslene er naturlig sykdom, stammer fra uhell (for eksempel utslipp fra et laboratorium) eller vilde handlinger inkludert bruk av organismer syntetisert eller modifisert ved hjelp av syntetisk biologi.

¹⁵ AlphaFold: AI-system utviklet av Google DeepMind som kan predikere et proteins 3D-struktur ved hjelp av aminosyresekvensen.

1.4 Syntetisk biologi og bioteknologi i forsvarssektoren – Hvilke muligheter finnes?

For best å nyttiggjøre seg ny teknologi må forsvarssektoren øke evnen og viljen til å utnytte nye og eksisterende teknologier, og få den hurtig ut til brukerne. I FFI-rapport 23/01821 «Synthetic biology and biotechnology for military medicine and chemical and biological defence - current state and future perspectives» [36] blir utnyttelsen av teknologier innen syntetisk biologi og bioteknologi innenfor militær medisin og vern mot kjemiske og biologiske midler (CB-vern) gjennomgått mer detaljert. Her har mulighetsrommet disse teknologiene gir blitt sett på i et forsvarsperspektiv, heller enn de negative konsekvensene som kan medfølge denne utviklingen. Kapabiliteter innenfor nye medisinske motmidler, biosensorer, persontilpasset medisin, regenerativ medisin og deteksjon, identifikasjon og monitorering (DIM) blir trukket frem. Innenfor medisinske motmidler blir spesielt problemstillingen rundt antibiotikaresistens og mulige løsninger på dette lagt vekt på. Det er foreslått å bruke genredigeringsverktøyet CRISPR/Cas, bakteriofager eller antimikrobielle peptider til å ta knekken på antibiotikaresistente bakterier. Genredigerte harmløse bakterier har også blitt trukket frem som preventive tiltak mot infeksjoner og generelt dårlig helse, da tarmfloraen knyttes til mange sykdommer [37, 38]. Med tanke på forebyggende tiltak er også vaksiner sentralt, og i fremtiden kan vi se universelle vaksiner som beskytter mot flere typer virus og bakterier. Et eksempel på en tilnæringsmåte basert på syntetisk biologi på enkleste nivå, var fremstillingen av koronaviruser [39]. Dette gjennombruddet vil få stor betydning for utvikling av vaksiner fremover. I fremtiden ser en for seg en utvikling der ikke bare genmodifiserte mikroorganismer kan produsere ønskede proteiner og metabolitter, men det er også mulig å fremstille ulike komponenter uten å gå veien om en produserende celle, ved såkalte cellefrie produksjonssystemer. Et eksempel er bruk av mikrobioreaktorer i felt. På lang sikt er det mulig å se for seg at en kan produsere nødvendige medikamenter ute i felt eller i områder der resursene er begrenset ved hjelp av små bioreaktorer basert på levende organismer eller cellefrie biologiske systemer [40].

Innenfor DIM-området har syntetisk biologi og bioteknologi potensiale til å bidra til utvikling av biosensorer som kan integreres i bekledning og materiell og raskt kunne detektere trusselstoffer i omgivelsene, eller til bruk i diagnostikken. Biosensorer er analytiske sanseenheter som kombinerer biologiske gjenkjennelselementer med en fysiokjemisk transduser. Å bruke biosensorer har mange fordeler fremfor tradisjonelle deteksjonsmetoder ved at de er rimelige, sensitive, fleksible, bærbare og de har ikke det samme behovet for avansert instrumentering og faglærte brukere [41]. Disse egenskapene vil gjøre deteksjon av for eksempel patogene mikroorganismer raskere, slik at tiltak for å begrense smittespredning og gi raskere diagnostisering og igangsettelse ved biologiske hendelser eller utbrudd. Nye og forbedrede løsninger for deteksjon og diagnostikk av trusselstoffer er også viktig.

Hensikten med denne rapporten er å belyse teknologiske trender innenfor syntetisk biologi og bioteknologi som kan være nyttig og aktuell teknologisk satsning på kort, mellomlang og lang sikt for sektoren. Ved hjelp av åpen ugradert litteratur har vi utarbeidet en oversikt over hvordan teknologinyvinger innen syntetisk biologi og bioteknologi kan ha positiv påvirkning på Forsvaret og sektoren. Aktuelle teknologiområder er soldatforbedring, vern mot kjemiske og

biologiske trusselstoffer inkludert påvisning og identifikasjon, biosensorer, materialer, og miljø og klima.

Nato har utpekt syntetisk biologi som et viktig teknologiområde i sin strategi for bioteknologi og menneskelig forbedring [4]. Den teknologiske utviklingen gir store muligheter til å styrke Forsvaret, inkludert vern mot kjemiske og biologiske trusler ved å muliggjøre nye og bedre, samt mer kostnadseffektive løsninger. Teknologiske løsninger og anvendelser som i dag benytter syntetisk biologi eller bioteknologi må konkurrere med dagens teknologi og produksjonsmetoder når det gjelder kostnader og tilgjengelighet av teknologien, men den raske utviklingen gjør at det hele tiden skjer nye gjennombrudd som fører til at kostnadene går ned.

Tabell 1.2 Aktuelle teknologiområder der syntetisk biologi og bioteknologi kan spille en rolle for forsvarsevnen.

Områder	Teknologi	Eksempler
Soldatforbedring	Prestasjonsfremmende midler/tiltak	Medikamenter som gir økt yteevne/bedre søvn/bedre opptak av næring med mer Probiotika Modifikasjon av immunsystemet, mikrobiomet, genomet
	Biometrics/genetics til beslutningstaking/overvåking av soldater	Bruk av biologisk data til individuelt tilpasset trening, kosthold og medisiner (persontilpasset) Biosensorer til helseovervåkning
CBRN-vern	DIM	DNA-/RNA-sekvensering Lab-on-a-chip Biosensorer
	Rens/dekontaminering	Enzymer
	Motmidler	
Medisin	Nye medisiner/motmidler/behandlinger	«On-demand» produksjon Vaksiner/profylakse Stamceller

		<p>Probiotika</p> <p>Antimikrobielle midler</p> <p>Syntetisk produsert blod</p>
	Additiv tilvirkning	<p>Dyrking/printing av vev/organer/ implantater/organioder</p> <p>Organ/lab-on-a-chip (mikrofluidikk)</p>
Materialer/tekstiler	Funksjonelle/smarte materialer	<p>Aktiv kamuflasje</p> <p>Selvrensende/-dekontaminerende materialer</p> <p>Selvrepurerende materialer</p> <p>Lydabsorberende materialer</p> <p>Bioetterlignende materialer</p>
	Erstatte/forbedre kjemisk fremstilte materialer og forbindelser	<p>Kevlar, overflatebehandlinger</p> <p>Fornybar/mer miljøvennlig produksjon (uten bruk av petrokjemiske forbindelser)</p> <p>Erstatte tekstiler som nylon, polyester med f.eks. syntetisk silke</p>
	Overflatebehandlinger	Økt holdbarhet (f.eks. ved å hindre tilvekst av biofilm, korrosjon)
	Festemidler/adhesiver	<p>Klebe sammen våte/skittene overflater</p> <p>Produksjon av (nye) kjemikalier til adhesiver</p>
Miljø/klima	Bioremediering	Genredigering av planter og mikroorganismer til remederings-formål (rensing av luft, vann og jord for forurensende stoffer)

		Bakterier til å omgjøre avfall til verdifulle ressurser som brennstoff, mat, strøm osv. Inkludert nøytralisering av farlig avfall
	Overvåkning	Mikroorganismer og planter til å «føle» miljøforurensinger
	Produksjon av kjemikalier	Bruk av biologiske systemer er mer miljøvennlig enn konvensjonell syntetisk kjemi
Energibærere	Biodrivstoff	Utnyttelse av ikke-spiselige planter, lignocellulose og mikroalger ved mikrobiell nedbrytning
	Mikroorganismer som “batterier”	F.eks. gjennom fotosyntese, fermentering, enzymatisk reduksjon av energitette substanser Levende, oppladbar energi produksjon og lagring

1.5 Rapportens oppbygging

Denne rapporten deles inn i kapitler etter hvilket teknisk område som beskrives. Tabell 1.2 viser en oversikt over teknologiområder der syntetisk biologi og bioteknologi kan spille en rolle for fremtidens forsvar. Listen inneholder utvalgte eksempler. Kapittel 1 i rapporten inneholder en kort introduksjon til syntetisk biologi. I kapittel 2 beskrives eksempler på teknologi og kapabiliteter som kan påvirke soldaters yteevne i fremtidige militære operasjoner. I kapittel 3 gjennomgås teknologier som er nyttig for vern mot kjemiske og biologiske trusler med fokus på deteksjon og identifikasjon, medisinske motmidler og rens. Kapittel 4 beskriver teknologi og metoder for rask diagnostikk og deteksjon av biologiske trusselstoffer i laboratoriet og i felt med fokus på biosensorer. En viktig trend innenfor syntetisk biologi er utvikling av nye materialer. I kapittel 5 beskrives utvikling av nye materialer som for eksempel kan gjøre det mulig for Forsvaret å operere i miljøer med ekstreme temperaturer eller benytte seg av materialer som avgir lave signaturer og er vanskelig å detektere (kamouflasje) Kapittel 6 ser på teknologiske trender innen miljø og klima, som ikke bare er nyttig for det sivile samfunn, men er også viktig for Forsvaret. Eksempler som gis er miljøvennlig biodrivstoff og utviklingen av innovative energiløsninger. Andre eksempler er metoder for bioremediering og biosensorer til miljøovervåking. Kapittel 7 omtaler lovgivning og regulering rundt utslipp av genmodifiserte organismer (GMO) til naturen, og kapittel 8 inneholder oppsummering og konklusjoner.

2 Soldatforbedring

Menneskelig forbedring er et område som Nato satser stort på, og det inkluderer bruk av både bioteknologiske og ikke-bioteknologiske metoder for å overgå normale menneskelige begrensninger og evner [4]. Hvordan bioteknologi kan utnyttes til å gi forbedret soldattyttelse er presentert i NATO-STO-rapporten «Biotechnology, Human Enhancement & Human Augmentation: A comprehensive overview of its topical content» (HFM-335) [42]. Rapporten gir et innblikk i bioteknologiske kapabiliteter og hvordan disse vil påvirke soldatsystemer, militærmedisin og soldattyttelse og -beskyttelse. Tabell 2.1 oppsummerer hvordan syntetisk biologi kan påvirke soldattyttelse og hvilke applikasjoner som virker lovende. Mulighetene strekker seg fra å kontinuerlig kunne overvåke soldatens helse ved bruk av biosensorer til å gå inn i genomet å gjøre endringer som gir økt ytelse. Disse områdene overlapper med andre temaer i denne rapporten og i FFI-rapport 23/01821 [36]. For eksempel vil det som inngår i CBRN-vern også høre innunder beskyttelse av soldaten, slik som biosensorer, point-of-care diagnostikk (medisinsk diagnostisk test på eller i nærheten av pasienten) og medisinske motmidler er eksempler på. Funksjonelle materialer og biosensorer til overvåkning av soldatens ve og vel er også eksempler på kapabiliteter som vil kunne gi økt soldattyttelse og som utypes mer i etterfølgende kapitler.

Tabell 2.1 Oppsummering av kapabiliteter som drar nytte av syntetisk biologi og bioteknologi som kan kunne påvirke soldattyttelse i fremtidige militære operasjoner.

Syntetisk biologi kan potensielt forbedre soldattyttelse i militære operasjoner ved å:	Lovende applikasjoner:
<ul style="list-style-type: none">➤ Forstå, måle og påvirke fysiologi➤ Forbedre fysiske og kognitive kapabiliteter➤ Øke motstandsdyktighet➤ Opprettholde soldaters yteevne for fremtidige operasjoner	<ul style="list-style-type: none">➤ Mikrobiommodifikasjon➤ Biosensorer for helseovervåking➤ Organ-on-a-chip teknologi➤ Medisinutvikling og -produksjon➤ Nevroproteser➤ Responderende materialer

3 Vern mot kjemiske og biologiske trusselstoffer

NATO STO langtidsstudien ser på hvordan utfordringer med CBRN-midler kan motvirkes ved å benytte den raske utviklingen innen vitenskap og teknologi til å styrke CBRN-vernet frem mot 2030 [6]. Syntetisk biologi og bioteknologi nevnes blant disse teknologiene, sammen med teknologiske trender som digitalisering, miniatyrisering, bærbar teknologi, tingenes internett, nanoteknologi, kunstig intelligens, autonomi, automasjon, robotisering og stordata [43]. Som en konsekvens av utviklingen endres kravene som må stilles til et effektivt CBRN-vern. Forsvaret må være forberedt på at nye og ukjente kjemiske og biologiske stridsmidler kan tas i bruk og evnen til å påvise og identifisere, beskytte oss mot og rense må ivaretas. Natos CBRN «defence policy» uttrykker at Nato må ha de militære kapabilitetene som er nødvendig for å motstå CBRN midler, samt å kunne operere i forurenset miljø [44]. Bioteknologi og syntetisk biologi bidrar med viktig teknologi innenfor disse områdene. I dette kapitlet vil vi fokusere på deteksjon og identifikasjon av biologiske trusselstoffer, medisinske motmidler mot biologiske trusselstoffer og teknologi som kan benyttes til rens av kjemiske og biologiske trusler. Deteksjon og identifikasjon er også omtalt i kapitlet om biosensorer.

3.1 Deteksjon og identifikasjon av biologiske trusselstoffer

Metoder for rask diagnostikk og deteksjon av biologiske trusselstoffer både i laboratoriet og i felt, er viktig for at Forsvaret skal ha tilgang på kapabiliteter som sikrer den operative evnen, men også av avgjørende betydning for det sivile samfunn. Et eksempel på det er covid-19-pandemien der prøvetaking og rask deteksjon var avgjørende for å begrense smittespredningen i samfunnet. Forsvaret må ha teknologi som kan benyttes til foreløpig, bekreftende og utvetydig identifikasjon av gamle og nye trusselstoffer. Dette er beskrevet i SIBCRA AEP-66.¹⁶

Gullstandarden for rask biodeteksjon og identifikasjon er PCR, som i dag brukes til rask og nøyaktig identifikasjon av de fleste organismer basert på deres nukleinsyrer (DNA eller RNA) [45]. Moderne sekvenseringsteknologi kan brukes til patogenidentifikasjon, og har den unike fordel av å kunne identifisere alle patogene mikroorganismer som er tilstede inkludert genmodifiserte organismer. Ved hjelp av bioinformatikk kan en søke i store kataloger av genetisk informasjon som finnes på internett. Bioinformatikk omfatter lagring, innhenting, organisering og analyse av biologiske data. Nylige fremskritt innen sekvenseringsteknologier, som Nanopore-sekvensering [46], gjør det nå mulig for brukeren å sekvensere prøver i felt med begrensede ressurser i stedet for å være begrenset til en avansert metode i laboratoriet. Bruk av sekvensering for DIM-formål er rimelig og effektivt, og teknologien bidrar også til utvetydig identifikasjon av trusselstoffer, inkludert genmodifiserte organismer. Ny sekvenseringsteknologi kombinert med bioinformatikk blir spesielt viktig for identifikasjon av genetisk endrede mikroorganismer. Flere detaljer og eksempler på DIM-teknologier kommer frem i FFI-rapport 23/01821 [36].

¹⁶ SIBCRA AEP-66: NATO Handbook for Sampling and Identification of Biological, Chemical and Radiological Agents.

3.2 Medisinske motmidler mot biologiske trusselstoffer

Siden antibiotikas inntog for over hundre år siden har de spilt en avgjørende rolle i moderne medisin og bekjempelse av bakterielle infeksjoner. Etter oppdagelsen av penicillin i 1928 har stadig flere antibiotika blitt oppdaget, samtidig som at forekomsten av resistens mot disse har blomstret opp og ledet til antibiotikaresistens-krisen vi er inne i nå [47]. Flere teknologier innenfor syntetisk biologi vil være viktige for å forstå resistensmekanismer bedre og i utviklingen av nye og/eller forbedrede antibiotika. Det samme gjelder innen vaksineutvikling. Dette feltet har utviklet seg raskt med blant annet mRNA-vaksinene som ble brukt under covid-19-pandemien. Tidligere kunne utviklingen og uttestingen av nye vaksiner ta flere år, mens med mRNA-vaksineteknologien ble to Covid-19-vaksiner produsert og tatt i bruk på under ett år [48].

Samtidig som at nye motmidler vil kunne utarbeides ved hjelp av syntetisk biologi er det mulig å se for seg nye produksjonsplattformer for disse medikamentene og andre terapeutika. Et eksempel på dette, som vil ha stor nytteverdi for militære operasjoner og sivilbefolkning i ressursvake områder, er produksjon av biomolekyler i felt etter behov. Disse molekylene kan inngå i vaksiner som kan benyttes ved lokale utbrudd av infeksjose sykdommer, i antibiotika til behandling av infeksjoner eller i andre medikamenter. Flere av plattformene som har blitt testet er basert på frysetørkede, cellefrie systemer, som tar liten plass og som kan lagres ved romtemperatur frem til bruk. Dette gjør behovet for lagring og transport mindre, noe som er gunstig i felt [49]. Eksempler på bærbare bioreaktorer er nærmere beskrevet i FFI-rapport 23/01821 [36].

3.3 Rens (hazard management)

Det er et stort behov for effektive og miljøvennlige dekontamineringsteknologier som sørger for selektiv og effektiv rens av biologiske og kjemiske trusselstoffer. Ideelt sett burde de være tilgjengelige i fast form, være enkle å transportere, være hurtigvirkende og ha få krav med tanke på lagring [50].

Harmløse mikroorganismer produserer en rekke metabolitter som kan virke antimikrobielt på andre mikroorganismer. Et eksempel er *Lactobacillus*, melkesyrebakterier, som har vært brukt til konservering av blant annet melkeprodukter i lang tid. Disse kan kontrollere uønsket vekst av sopp og dermed forurensing av mycotoksiner (soppgifter) ved at de blant annet produserer hydrogenperoksid, organiske syrer, fenolkomponenter og hydroksylfettsyrer. Den viktigste effekten er reduksjon i pH, som gir dårlige vekstvilkår for en rekke bakterier og sopp. Også vanlig gjærsopp, *Saccharomyces cerevisiae*, kan virke hemmende på mycotoksinproduserende sopp [51].

3.3.1 Enzymer

Syntetiske organofosfat (OP)-forbindelser er svært giftige kjemikalier som opprinnelig var utviklet som plantevernmidler (pesticider), men som raskt ble tatt i bruk i kjemiske stridsmidler. Som nervegifter inhiberer de enzymet acetylcholinesterase (AChE) som fjerner acetylcholin fra nerveendene. AChE er essensielt for at nervesignalene skal deaktiveres etter at de er overført.

Flere studier av enzymatisk detoksifisering av OP-forbindelser funnet i naturen har vært gjort for å finne et rimelig, bærekraftig og effektivt alternativ til konvensjonelle metoder slik som kjemiske behandlinger og høy varme. Flere enzymer har vært funnet å ha nedbrytende og potensielt inaktiverende effekt på OP-forbindelser. Problemet med flere av disse er at de er lite stabile og har varierende aktivitet. Syntetisk biologi sammen med kunstig intelligens og proteinkjemi kan bidra til å løse dette [52].

Enzymer som bryter ned sennepsgass har også blitt oppdaget. Bakteriene som produserer disse enzymene, har vist seg å kunne benytte seg av sennepsgass som deres eneste kilde til svovel. Selv om nedbrytningshastighet, selektivitet og substratkonsentrasjonen er lavere enn ved kjemiske rensemetoder representerer mikrobiell nøytralisering en lovende tilnærming til behandling av miljøer forurensset av sennepsgass og andre kjemiske agens [53].

4 Biosensorer

Biosensorer er analytiske sanseenheter som kombinerer biologiske gjenkjennelselementer, slik som vev, mikroorganismer, organeller, cellereseptorer, enzymer, nukleinsyrer og antistoffer, med en fysiokjemisk transduser, som kan være optisk, akustisk, elektrokjemisk, magnetisk eller lignende. Interaksjon mellom målanalytten og det biologiske elementet fører til en fysiokjemisk endring som detekteres av transduserelementet slik at vi får et målbart signal, gjerne proporsjonalt med konsentrasjonen av analytten. Biosensorer kan monitorere endringer i omgivelsene, detektere og måle konsentrasjoner av spesifikke bakterier og helsefarlige kjemikalier, måle surhetsgrad (pH) og så videre [54]. Biosensorer gjør det mulig å raskt diagnostisere og respondere på syntetiske og naturlige patogener og kjemikalier i tillegg til real-time (sann-tid) monitorering av medisinsk behandling og fysiologiske markører [55]. Biosensorer har mange fordeler fremfor tradisjonelle deteksjonsmetoder, derav pris, bærbarhet, fleksibilitet og lite krav til utstyr og spesialisert personell [41]. Utvikling og bruk av biosensorer er ytterligere beskrevet i FFI-rapport 23/01821 [36]. Noen eksempler på bruk av biosensorer er til point-of-care diagnostikk, deteksjon av kjemiske stoffer, biologiske agens og eksplosiver, kontroll av mat, drikkevann og miljø. Biosensorer integrert i bekledning og integrerte biosensorplattformer kan skaffe essensiell sanntidsmonitorering av soldaters ve og vel og detektere potensielle trusler og gi en omfattende tilnærming til trusseldeteksjon [1]. Hurtigere diagnostikk av infeksjøs sykdommer vil gi raskere igangsettelse av medisinske behandling og adekvat utbruddshåndtering. Dette fører til at færre blir syke og økt operasjonell effektivitet.

I NATO STO sin rapport om teknologiske trender og fremvoksende og banebrytende teknologier er kunstig intelligens og kvanteteknologier viktige områder [1]. Synergien mellom biosensorer og bioteknologi generelt og kunstig intelligens og stordata vil ha stor innvirkning på verdensøkonomien og helse. Kunstig intelligens kan optimalisere utviklingen av sensorer som baserer seg på levende systemer. Samtidig vil bruk av biosensorer til overvåkning av miljø og personell generere store mengder data, som ved hjelp av kunstig intelligens og avansert stordata-analyser kan gi økt situasjonsforståelse og bedre beslutningsstøtte [1]. Bruk av kvanteteknologi i utvikling av kvantesensorer vil ha stor betydning for Nato fremover.¹⁷

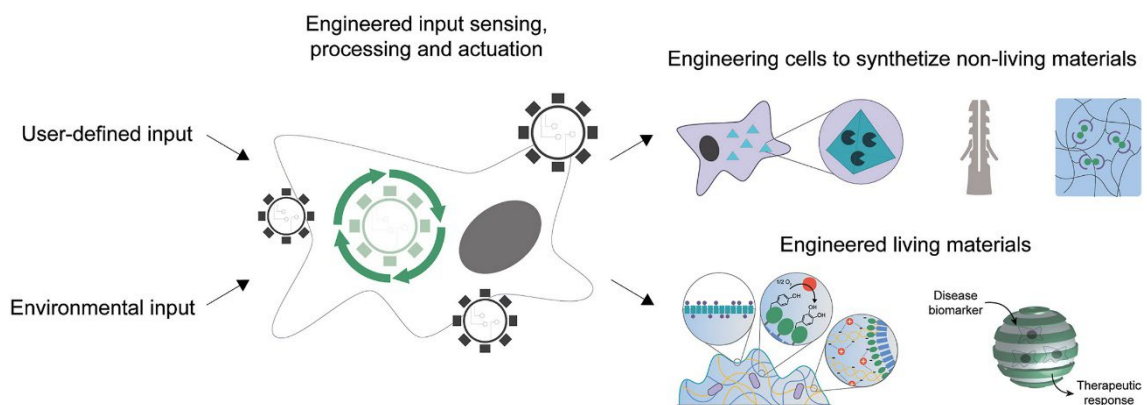
¹⁷ [NATO og Danmark åbner center for kvanteteknologi i København](#)

5 Materialer og tekstiler

Trender innenfor syntetisk biologi peker mot utvikling av nye materialer som for eksempel kan gjøre det mulig for Forsvaret å operere i miljøer med ekstreme temperaturer eller benytte seg av materialer som avgir lave signaturer og er vanskelig å detektere (kamouflasje).

Materialer i naturen har mange verdifulle egenskaper. De kan være programmerbare og multifunksjonelle i tillegg til å ha levende egenskaper som gjør at de kan tilpasse seg, vokse, fornye og reparere seg selv. Materialer i naturen er også bygget opp av fornybare ressurser, benytter seg av energi fra omgivelsene og kan brytes ned. Dette er egenskaper som også er ønskelige i menneskeskapte materialer, og som kan dekke behov innen materialteknologien som ikke dekkes med dagens teknologi. Mer miljøvennlig produksjon, redusert utslipp av miljøskadelige stoffer og økt grad av biodegraderbarhet gir mer bærekraftige materialer, en miljøfordel som også er relevant for Forsvaret hvor fokuset på bærekraft og miljø har økt betraktelig de senere årene. For å integrere egenskaper hos materialer funnet i naturen med syntetiske materialer kan syntetisk biologi og bioteknologi tas i bruk gjennom to ulike tilnærminger (se Figur 5.1):

- 1) Programmere/designe celler til å produsere utgangsstoffer til påfølgende syntese av materialer. Dette kan være materialer som tradisjonelt er laget av petrokjemiske stoffer eller andre ressurser eller materialer der de biobaserte komponentene kan bidra med helt unike egenskaper.
- 2) Programmerte levende materialer oppbygd av celler eller der celler bidrar med spesifikke funksjoner og der cellene/cellekomponentene forblir en integrert del av materialet [56].



Figur 5.1 *Levende organismer kan brukes på ulike måter i materialer; enten ved at den programmeres til å produsere ikke-levende forbindelser som kan benyttes i produksjonen av materialet eller at levende komponenter kan integreres i materialet [56].*

Mye av forskningen på bruk av syntetisk biologi i materialteknologien har vært rettet mot biomedisinsk bruk, der materialene skal være kompatible med biologisk vev. Samtidig har syntetisk biologi stort potensiale til å påvirke neste generasjons avanserte materialer for bruk utenfor medisinen, slik som biopolymere, fibre, optiske materialer og adhesiver [57]. Områdene beskrives i kapitlene 5.1 til 5.5.

5.1 Kjemikalieproduksjon

Mange av kjemikaliene som brukes under produksjonen av ulike materialer, løsninger og stoffer er i dag basert på petrokjemikalier. Denne produksjonen er svært ressurskrevende og kommer med store utslipp. Et godt alternativ til denne industrien er å benytte seg av syntetisk biologi og biologiske systemer til å produsere kjemikalier og utgangsstoffer til kjemikalier. Biologiske prosesser krever mildere forhold og benytter seg av fornybare og naturlig forekommende råvarer [57]. Til dette formålet kan mikroorganismer programmeres til å produsere ønskede forbindelser i bioreaktorer, som senere ekstraheres og renses. Å ta i bruk denne produksjonsformen har mange fordeler fremfor tradisjonell industri, enten som et supplement eller som en erstatning. Det er rimeligere og krever mindre ressurser, er mer bærekraftig både med tanke på råmaterialer og utslipp. Det kan også tilføre nye egenskaper til materialet som igjen vil ha positiv innvirkning på det ferdige produktet [5]. For å utnytte mulighetene bioproduksjon gir må det investeres i forskning og utvikling, samarbeid mellom industri og academia må fremmes og regulatoriske rammeverk for å sørge for sikkerhet og pålitelighet må etableres [1].

5.2 Syntetiske tekstiler

Nye tekstiler med ulike egenskaper forventes å få økt betydning [5]. Tekstilene vil ha innebygde egenskaper som gir bedre isolasjon, mer effektiv kamuflasje og styrket motstandsdyktighet. Silke er et eksempel på en fiber som har blitt mye brukt i soldatutrustning gjennom historien, blant annet på grunn av dets holdbarhet, styrke, lave vekt og mykhet. Silke er tradisjonelt innhentet fra kokongene spunnet av silkeormen *Bombyx mori*, men et tusentalls av leddyr produserer også ulike typer silke med forskjellige egenskaper, der spesielt edderkopper produserer silke med stor styrke og fleksibilitet. Å drive oppdrett av edderkopper lar seg ikke gjøre, men forskere har brukt rekombinant DNA-teknologi til å produsere silkeproteiner uten edderkopper i bakterier og gjærsopp, planter og transgene silkeormer. En har enda ikke klart å produsere silke med samme mekaniske styrke som edderkoppsilke, men dette kan la seg gjøre ved å fortsette å kombinere syntetisk biologi med materialteknologi og polymerkjemi. Syntetisk biologi gjør det mulig å lage silke med egenskaper utover de egenskapene edderkoppsilke har, tilpasset sitt formål [57]. Syntetiske tekstiler basert på biologisk produksjon kan erstatte mange av de syntetiske tekstilene vi omgir oss med i dag og som har negativ innvirkning på miljøet. I tillegg kan de ha egenskaper som er fordelaktige for blant annet Forsvaret, deriblant pustende egenskaper, lett vekt og god isolasjon.

5.3 Adhesiver

Organismer produserer ulike typer adhesiver (klebemidler) med ulike funksjoner og bruksområder, for eksempel til kolonisering av overflater, fangst av byttedyr, bevegelse og som forsvarsmekanisme. Adhesivene funnet i naturen har egenskaper det er vanskelig å gjenskape, slik som adhesjon under vann, motstandskraft, biokompabilitet, adhesjon til både polare og upolare overflater med mer. På grunn av de små mengdene hver organisme produserer av disse stoffene egner det seg ikke å ekstrahere og rense stoffene direkte. Stoffene er også ofte irreversibelt bundet til andre forbindelser. Ved hjelp av syntetisk biologiske metoder kan genene for de spesifikke adhesivene identifiseres og lages i laboratoriet. Genene kan da settes inn i plasmider og vertsorganismer for produksjon. Dette kan ha spesielt stor innvirkning på biomedisinen hvor biokompatible og vannresistente adhesiver kan revolusjonere sårheling, regenerering av vev og systemer for kontrollert levering av legemidler [57]. På grunn av disse midlenes evne til å binde overflater med ulik polaritet, vann- og fettløselighet, egner de seg også godt i «skitne» miljøer som Forsvaret ofte står overfor, slik som i felt, til havs og i katastrofeområder.

Et annet bruksområde for Forsvaret er bruk av slike midler i skuddsikre materialer, som er kompositter av glass, polymerer og keramikk, hvor et transparent og sterkt bindemiddel er nødvendig for å opprettholde nødvendig styrke. Den best karakteriserte klebemekanismen blant naturlige adhesiver tilhører adhesive-proteiner fra blåskjell (*Mytilus edulis*). Det er fortsatt mye som gjenstår før de syntetisk produserte adhesivene gjenspeiler de som er funnet i naturen, men med utvikling av teknologier som automasjon, robotikk, «high-throughput» screening og maskinlæring vil oppdagelse og optimalisering av adhesiver gå raskere og vi vil få bedre adhesiver som kan erstatte petroleum-baserte midler som brukes i dag [57].

5.4 Funksjonelle materialer

Funksjonelle materialer spenner over et bredt spekter av innovative teknologier og inkluderer alt fra avansert kamuflasje med aktive og reaktive fargeendrende egenskaper til overflater med varierende refleksjon og gjennomsiktighet. I tillegg finner vi høytfungerende lydabsorpsjon, selvrengjørende eller selvdekontaminerende overflatebelegg, samt selvreparerende materialer. Disse innovasjonene gir materialer muligheten til å utføre oppgaver utover sine tradisjonelle grenser, noe som åpner for spennende anvendelser i ulike bransjer. Materialteknologi viser kontinuerlig hvordan materialer kan utfordre grensene for hva de kan oppnå, gjerne i synergi med syntetisk biologi og bioteknologi. Disse materialene har potensial til å revolusjonere mange sektorer, fra militære applikasjoner til bygg og medisin, ved å tilby løsninger som tilpasser seg omgivelsene og forbedrer funksjonaliteten [1].

5.4.1 Signaturreduksjon og aktiv kamuflasje

I utviklingen av militært utstyr har overflatematerialer med lav signatur vært viktig. For eksempel ble en stor del av kostnadene for utviklingen og produksjonen av jagerflyene F-35 brukt på å gjøre den elektromagnetiske signaturen minst mulig ved hjelp av spesifikt vinklede overflater og

radarabsorberende materialer [57]. Neste generasjons signaturreduksjon kan være å ta i bruk aktiv kamuflasje slik som ulike organismer i naturen kan.

Organismer slik som blekkspruter har evnen til å tilpasse utseendet (fargen) etter omgivelsene. De har ulike celledag i huden som kontrollerer transmisjonen og refleksjonen av innkommende lys ved at mengden reflektinproteiner i cellene reguleres av et signalmolekyl. Forskere har studert hvordan disse proteinene kan integreres i optisk aktive materialer der tykkelsen på materialet avgjør bølgelengdene på lyset som reflekteres. Ved at materialet kan endre tykkelse vil også bølgelengden på lyset som reflekteres endres. I tillegg til produksjon av reflektin, et protein med høy kompleksitet, må også materialet ha et like sofistikert kontrollmaskineri, som endrer tykkelsen på materialet basert på omgivelsene det er i [57].

5.4.2 Andre smarte/levende egenskaper

Det er stor interesse for å lage materialer med såkalte smarte eller levende funksjoner, altså at de for eksempel kan reparere og utvikle seg selv som respons på ytre påvirkninger [58], slik som beskrevet over. Materialer som er utsatt for ytre påkjennelser krever jevnlig vedlikehold og/eller erstatning. Bakteriesporer har eksempelvis vært forsøkt å bruke i betong for å gjøre den selvreparerende. Tanken er da at når det blir sprekker i betongen og sporene utsettes for oksygen og fuktighet, vil de aktiveres og produsere stoffer som vil tette sprekke [56].

Forskere har også sett på ulike overflatebehandlinger for beskyttelse mot korrosjon og begroing, spesielt i maritime miljøer. I tillegg til å skade materialene over tid, vil også fremkommeligheten til fartøy påvirkes av slitasje og begroing. Neste generasjons syntetisk biologiske materialer kan virke beskyttende mot dette ved hjelp av biologiske funksjoner tatt ut av sine naturlige settinger, for eksempel biocider [58]. Å spille på lag med biofilmdannelse og gjøre materialoverflater mer motstandsdyktige kan resultere i lavere operasjonelle kostnader, økt materiallevetid og til syvende og sist gi økt beredskap.

5.5 Biosement

Byggebransjen står for store mengder utslipp av drivhusgasser, deriblant gjennom produksjon av betong. Konvensjonell betongproduksjon går ut på å varme opp kalkstein til 1450 °C som resulterer i store utslipp av CO₂. Ny teknologi gjør det mulig å bruke forskjellige bakterier til å bryte ned kalksteinen i stedet for å bruke oppvarming. Denne sementen er per nå ikke like robust som konvensjonell sement, men vil være god nok i mange tilfeller. I tillegg er produksjonen av biosement mer kostnadseffektiv enn sementen som produseres i dag [59, 60]. Ved å integrere bakteriebasert betong i militære prosjekter kan man oppnå mer bærekraftig og kostnadseffektive løsninger som støtter både operasjonell effektivitet og miljømål.

6 Miljø og klima

Forsvarssektoren har nylig utarbeidet en strategi for klima og miljø, med en tilhørende handlingsplan [61]. For å nå målene i denne strategien, kan og bør Forsvaret utnytte teknologiske trender innenfor syntetisk biologi og bioteknologi. Eksempler er utvikling av metoder for opprydning i skyte- og øvingsfelt etter øving og trening gjennom miljøvennlig bioremediering og overvåking av klima- og miljøpåvirkning ved bruk av biosensorer. Syntetisk biologi kan bidra til økt matsikkerhet og mer bærekraftig matproduksjon ved å forbedre landbruket på ulike måter som gir økt produktivitet med lavere utslipp. Dette kan gjøres ved å øke avlingsutbyttet, næringsinnholdet og motstandsdyktigheten mot patogener ved å genmodifisere plantene som brukes i matproduksjon.

6.1 Energibærere

Miljøvennlig biodrivstoff og utviklingen av innovative energiløsninger er sentrale fokusområder både innenfor sektoren og i det sivile samfunnet. Den økende avhengigheten av slike bærekraftige alternativer reflekterer et globalt behov for å redusere miljøpåvirkningen og sikre en mer bærekraftig fremtid. I fremtidens forsvar blir redusert størrelse og økt ytelse avgjørende elementer for energiløsninger, spesielt innen batteriteknologi, som forventes å spille en essensiell rolle i å møte energibehovet på en effektiv og miljøvennlig måte [62].

6.1.1 Biodrivstoff

Så langt har en klart å produsere biodrivstoff basert på biodiesel og etanol fra sukker og stivelse som et forsøk på å produsere fornybart og bærekraftig drivstoff. Denne biodieselen har flere ulemper, deriblant at den kommer fra planter som ellers kunne vært brukt som mat og at den har kjemiske egenskaper som gjør den uegnet til mye av dagens infrastruktur. Nye tilnæringer der ikke-spiselige planter, lignocellulose og mikroalger kan benyttes blir forsøkt i fremstillingen av biodrivstoff. Der spiller syntetisk biologi og bioteknologi en viktig rolle. Spesielt to strategier kan tas i bruk når syntetisk biologi skal involveres i biodrivstoffproduksjon,

- 1) Mikrobiell produksjon av drivstoff fra plantematerialer
- 2) Utnyttelse av mikrobiell fotosyntese fra CO₂ og vann.

Noen organismer, slik som mikroalger, kan ved hjelp av fotosyntese produsere biodrivstoff som kan benyttes som direkte erstatninger for fossilt drivstoff. Dette kan for eksempel være isobutyraldehyd eller butanol-derivater. Cyanobakterier har også blitt programmert til å produsere fettsyrer til produksjon av biodiesel og alkener ved å integrere gener fra ulike arter [63].

Bruken av hydrogen som et ikke-fossilt brennstoff har gitt fotosyntetiske organismer slik som alger og cyanobakterier økt interesse da disse kan omgjøre vann og lys til hydrogen. Det er fremdeles noen ulemper med denne tilnærmingen, blant annet at hydrogenasen (enzymet

involvert i reaksjonen) ikke tåler oksygen og ineffektiv utnyttelse av solenergi. Dette er problemer som syntetisk biologi og bioteknologi kan løse ved at det gjøres endringer på genene for hydrogenasen eller lyshøstende proteiner, eventuelt at helt nye metabolske veier for hydrogenproduksjon kan designes og inkorporeres i organismenes genom [63].

6.1.2 Mikrobielle brenselceller

En mikrobiell brenselcelle er en enhet som konverterer kjemisk energi til elektrisk energi ved hjelp av mikroorganismer. «Vanlige» brenselceller produserer elektrisitet ved at et metall oksideres ved anoden og reduseres ved katoden. Mikrobielle brenselceller trenger ikke metalliske katalysatorer ved anoden, men benytter seg av mikroorganismer som oksiderer organisk materiale biokjemisk og transporterer elektroner til anoden. Disse elektronene går gjennom en krets til katoden hvor de forenes med protoner og en kjemisk katolytt [64]. Transporten av elektronene inne i cytoplasmaet til bakteriecellen til den eksterne elektroden er avgjørende for effekten til brenselcellen og syntetisk biologi kan optimalisere elektrongenereringen og transporten til cellene.

6.2 Bioremediering

Luft-, vann- og jordforurensing er av de største miljøtruslene vi har, og er signifikante risikofaktorer knyttet til dødsfall forårsaket av usunne omgivelser. Det er derfor et stort og pressende behov for effektive remedieringsstrategier [65]. Naturlig forekommende mikroorganismer kan degradere en rekke forbindelser vi anser som miljøskadelige, slik som drivstoff, klorforbindelser, pesticider, benzen, dioksiner med mer [66]. Ved hjelp av avansert syntetisk biologi kan vi utnytte biologiens evne til å remediere og gjenopprette ødelagt og forurenset natur ved å skreddersy organismer, fra bakterier til planter, tilpasset dette formålet. I utviklingen av slike teknologier har ekstremofile mikroorganismer en viktig rolle. Dette er organismer som er tilpasset ekstreme forhold, der andre ikke overlever. For eksempel finnes det bakteriearter som kan degradere petroleum i avløpsvann, eller termotolerante algetyper som sammen med spesifikke bakterier kan degradere ammoniakk og produsere biobrennstoff, uten behov for nedkjøling [5, 65]. Slike løsninger kan brukes av Forsvaret til å produsere nyttig biodrivstoff direkte fra avfall. Noen organismer lever av stoffer som er giftige for mennesker, slik som karsinogener og tungmetaller. Programmerte organismer kan derfor være en viktig bidragsyter i å oppta, nøytralisere og gjenvinne forurenset jord, vann, avløpsvann i for eksempel Forsvarets skytefelt der forurensing av tungmetaller er et problem [67]. Organismene kan da oppta avfallsprodukter til å produsere blant annet brennstoff, mat og energi som vi kan benytte oss av [5].

6.2.1 Mikroplast

De senere årene har det blitt et større fokus på utslipp av mikroplast til naturen. Mikroplast ender i naturen etter bruk og kast av ulike syntetiske materialer, fra klær og bildekk, til plast som blir liggende og brytes ned i naturen. Dette gjelder også for materiell brukt av Forsvaret. Plast i naturen er et økende problem, spesielt i havet, som gjør irreversibel skade på dyre- og plantemangfoldet.

Polyetylentereftalat (PET) er en polyester som brukes mye i klesproduksjon og i emballasje til mat og drikke og som det dermed finnes store mengder av ute i naturen. Flere bakterier og insekter har enzymer som har vist seg å ha degraderende effekt på PET, dog med lav aktivitet. Ved å studere disse egenskapene videre og potensielt kunne produsere disse enzymene med større aktivitet og i større kvantitet, vil en kunne bryte ned plast til dets minste bestanddeler og lage nye plastprodukter eller bruke det til noe annet [65].

6.2.2 Eksplosiver

Forsvaret og andre lands militære organisasjoner står bak store forurensinger som følge av bruk av eksplosiver. Eksplosiver slik som trinitrotoluen (TNT) og heksogen (RDX) står for forurensing av rundt 10 millioner hektar av militære områder i USA [68]. Det finnes også tilfeller av slik forurensing i og omkring Norge, blant annet at de store mengdene kjemisk ammunisjon som ble dumpet i Skagerak etter andre verdenskrig [69]. Mange studier har sett på biokjemien bak degradering av disse stoffene hos mikroorganismer, noe som har ført til identifikasjonen av gener som står bak dette. Disse genene har vært forsøkt implementert i planter, som vil egne seg for remediering av større områder [65, 68].

6.3 Miljøovervåking

Mikroorganismer kan oppfatte ulike stimuli og respondere på dette gjennom metabolske prosesser som kommer til uttrykk på ulike måter, for eksempel ved utslipp av stoffer, fluorescens og elektrisitet. Disse egenskapene kan benyttes i biosensorer til overvåking av ulike miljøer, slik som drikkevann, tarmsystemet og jordsmonn, der både biologiske og kjemiske trusselstoffer kan detekteres. Biosensorer som teknologi er mer utdypende beskrevet i kapittel 4.

For Forsvaret og resten av samfunnet kan slike biosensorer komme til god nytte. Disse kan for eksempel brukes for å kontrollere at vannkilder er trygge å drikke av under militærøvelser og oppdrag, eller til å kontrollere utslipp gjort av Forsvaret på og ved skytefelt eller der det er brukt drivstoff som kan være sølt ut. Også for industrien kan biosensorer være et nyttig verktøy for å kontrollere utslippsvann. Slike utslipp har pågått i mange tiår, men har i senere tid blitt knyttet til en rekke helseplager og sykdommer [70]. Derfor er det vesentlig at Forsvaret og andre industrier tar ansvar for sine utslipp og kontrollerer at rensetiltak fungerer og at utslippene holdes på et minimalt nivå. Generelt vil biosensorer kunne bidra sterkt med å spore utslipp og identifisere forurensningskilder [66]. Tilsvarende kan planter bli genetisk modifisert til å respondere på miljøforurensning. Plantens genom vil da inkludere gener for rapporteringsmekanismer, slik at tilstedeværelsen av slike stoffer signaliseres gjennom endring i plantens struktur, utseende eller andre fysiske karakteristikk [54, 71]. Flere deteksjonsmetoder benyttet i dag er tidkrevende, krever spesialisert utstyr og personell og koster mye, noe som ofte resulterer i at de ikke blir utført i tilstrekkelig grad [70]. Syntetisk biologi kan bidra med enkle og rimelige deteksjonsmetoder, noen kan også være nedbrytbare.

7 Regulering

Uansett hvor lovende bruk av syntetisk biologi i bioremedierings- og miljøovervåkingsformål virker, blir den faktiske bruken begrenset av bekymringene rundt utslipp av GMO til naturen. Reglene for GMO-begrensninger er forskjellige i ulike land, og dette kan ha innvirkning på bruken av GMOer til dekontaminering og andre bruksområder som miljømåling. Ulike GMO-forskrifter i forskjellige land kan også ha innvirkning på samarbeid Nato-land imellom og det betyr at GMO-materiale ikke vil være akseptabelt i enkelte Nato-land. Bruk av cellefrie systemer kan være en løsning. I tillegg til at en unngår at nye, modifiserte stammer vokser fritt i naturen, kan cellefrie systemer benyttes i miljøer hvor celler ikke er levedyktige, for eksempel sammen med toksiner eller andre vekst-hemmende faktorer [66, 72].

Norge har et strengt regelverk for bruk av genmodifisering og genredigering både til medisinsk og ikke-medisinsk bruk, for eksempel i matproduksjon. Frykten for spredning av GMO i naturen, bruk av GMO i menneskekroppen og de strenge lovene for genredigering som vi har i Norge begrenser bruk av slik teknologi i vesentlig grad. Det er derfor nødvendig å revurdere og fornye lovverket, slik at potensialet til teknologiene kan utnyttes til det fulle på en måte som fremdeles er trygg og etisk forsvarlig. I den Norske genteknologiloven stilles det store krav til godkjenning av genmodifiserte produkter som resulterer i at nesten ingen produkter blir godkjent i Norge. Den Norske genteknologiloven har vært uforandret i nesten 30 år. Loven har til formål å sikre at fremstilling og bruk av genmodifiserte organismer og fremstilling av klonede dyr skjer på en etisk og samfunnsmessig forsvarlig måte. Det skal skje i samsvar med prinsippet om bærekraftig utvikling og uten helse- og miljømessige skadevirkninger [73, 74]. Et utvalg har jobbet med en Norsk offentlig utredning (NOU) om fremtidens regulering av bioteknologi. Utvalget er enig i at loven må moderniseres, men ikke hvordan. Flertallet gikk inn for at organismer som er genredigert uten at fremmed DNA er satt inn ikke lenger skal klassifiseres som GMOer. Dagens lov er ikke utformet med tanke på genredigering med CRISPR-Cas-metoden. Mindretallet ville beholde dagens lovgiving. I likhet med Norge har skepsisen til bruk av GMOer i Europa/EU vært stor og regelverket er strengt. I februar i år stemte Europaparlamentet for å lette kravene til godkjenning av korn laget ved hjelp av genredigering [75].

8 Oppsummering og anbefalinger

Bioteknologi og syntetisk biologi er raskt økende og forventes å få bred anvendelse innenfor mange områder i samfunnet, både sivilt og militært. Teknologien kan redde liv, men den samme teknologien kan også utnyttes av de som har onde hensikter til å ta liv og ødelegge samfunnet. I denne rapporten har vi fokus på de positive sidene ved teknologien og peker på teknologiområder som kan få betydning for Forsvaret og sektoren både på kort og lang sikt. Ved å beskrive kort et bredt spekter av bruksområder ønsker vi å synliggjøre viktigheten av syntetisk biologi og bioteknologi både på kort og lengre sikt, og bidra til at Forsvaret og sektoren får informasjon om hvilke muligheter som kan ligge i utnyttelse av slike teknologier. Økonomisk utnyttelse innenfor industri er også voksende, og det er spesielt store land som USA og Kina som leder an denne satsingen. Det er viktig for Nato og sektoren i de enkelte land å følge med på utviklingen og ta i bruk ny teknologi slik at de enkelte Nato-land evner å opprettholde forsvarsevnen.

Følgende teknologiområder er satt søkelys på i denne rapporten:

- Bioteknologi og menneskelig forbedring er vitenskapelige prioriteringsområder i Nato og det inkluderer bruk av både bioteknologiske og ikke-bioteknologiske metoder for å overgå normale menneskelige begrensninger eller evner.
- Bruk av sekvensering for DIM-formål er rimelig og effektivt, men teknologien bidrar også til utvetydig identifikasjon av trusselstoffer. Ny sekvenseringsteknologi kombinert med bioinformatikk blir spesielt viktig for identifikasjon av genetisk endrede mikroorganismer. Dette er spesielt viktig da syntetisk biologi kombinert med kunstig intelligens gjør det enklere å syntetisere patogene organismer eller endre disse.
- Utvikling av biosensorer for rask diagnostikk og deteksjon av biologiske trusselstoffer i laboratoriet og i felt er viktig for at Forsvaret skal være operativt, men slik utvikling er også av avgjørende betydning for det sivile samfunn. Et eksempel på det er covid-19-pandemien der prøvetaking og rask deteksjon var avgjørende for å begrense smittespredningen i samfunnet.
- Trender innenfor syntetisk biologi peker mot utvikling av nye materialer som for eksempel kan gjøre det mulig for Forsvaret å operere i miljøer med ekstreme temperaturer eller benytte seg av materialer som avgir lave signaturer og er vanskelig å detektere (kamouflasje).
- Miljø og klima er ikke bare viktig for det sivile samfunn, men er også viktig for Forsvaret. Miljøvennlig biodrivstoff og utviklingen av innovative energiløsninger har blitt sentrale fokusområder både innenfor sektoren og i det sivile samfunnet. Den økende avhengigheten av slike bærekraftige alternativer reflekterer et globalt behov for å redusere miljøpåvirkningen og sikre en mer bærekraftig fremtid. I fremtidens forsvar blir redusert størrelse og økt ytelse avgjørende elementer for energiløsninger, spesielt innen batteriteknologi, som forventes å spille en essensiell rolle i å møte energibehovet på en

effektiv og miljøvennlig måte. Metoder for mer miljøvennlig bioremediering og biosensorer til miljøovervåkning er også viktig for fremtiden forsvar.

- Norge har et strengt regelverk for bruk av bioteknologi og GMOer både til medisinsk og ikke-medisinsk bruk. Reglene for GMO-begrensninger er forskjellige i ulike land, og dette kan ha innvirkning på bruken av GMOer til dekontaminering og andre bruksområder. Ulike GMO-forskrifter i forskjellige land kan også ha innvirkning på samarbeidet Nato-land imellom og det betyr at GMO-materiale ikke vil være akseptabelt i enkelte Nato-land. Det er viktig at det kommer på plass et etisk rammeverk for bioteknologi og syntetisk biologi som er harmonisert med EU, USA og andre land. Det fører til at det blir lettere å utnytte bioteknologi og syntetisk biologi på tvers av landegrenser til nyttige formål.
- Syntetisk biologi kan bidra til at samfunnet når FNs bærekraftsmål innenfor områder av særskilt betydning for Forsvaret og sivilsamfunnet (se Tabell 1.1).

Syntetisk biologi og bioteknologi er teknologier i rask utvikling, og skillet mellom sivil og militær teknologi blir mindre. Den teknologiske utviklingen skjer hovedsakelig innenfor sivil sektor. Flere departementer i samarbeid med Norges forskningsråd og Innovasjon Norge utviklet en nasjonal strategi for grunnforskning, næringsrettet forskning, utvikling og kommersialisering innenfor bioteknologi (2011-2020) [76]. Dette inkluderer sivile forskningsområder som havbruk, sjømat, biomasse-produksjon, miljøvennlige industrielle prosesser og produkter og helse-relaterte områder. Denne strategien gikk ut for fire år siden, og det bør vurderes om det skal lages en ny strategi som også involverer Forsvaret og sektoren. En gruppe sivile aktører fra næringslivet og forskningsmiljøer etterlyser en nasjonal strategi for bioinnovasjon, at det settes ned et nasjonalt råd for bioinnovasjon og at bioinnovasjon velges som neste nasjonale eksportstrategi.¹⁸ Potensialet for nyskapende bioinnovasjoner er stort i mange sektorer, og kombinert med kunstig intelligens vil utviklingen innen bioteknologi akselereres dramatisk.

Anbefalingen fra FFI i denne rapporten er at Forsvaret og sektoren bør samarbeide med sivile forskningsinstitusjoner og følge med på og utnytte kunnskapene og teknologiene til forbedring av forsvarsevnen. Generelt er teknologiene som er diskutert i denne rapporten av betydning for den fremtidige forsvarsevnen og de har alle i ulik grad potensial til å påvirke militære operasjoner.

For å sikre at Forsvaret og sektoren holder seg oppdatert anbefaler FFI at Forsvaret og sektoren styrker samarbeid også med sivile sektorer innenfor bioteknologi og syntetisk biologi for å sikre fremtidig forsvarsevne. Tverrfaglig forskning og forståelse av teknologiutvikling er nødvendig for å utvikle nye forsvarskapabiliteter, jfr. de banebrytende og fremvoksende teknologiene som belyses i NATO STOs rapport «Science & Technology Trends 2023-2043» [1].

¹⁸ <https://www.abelia.no/nyheter/2024/oktober/etterlyser-nasjonal-strategi-for-bioinnovasjon/>

Referanser

- [1] D. F. Reding, Á. M. Blanco, A. De Lucia, L. A. Regan, and D. Bayliss, "Science & Technology Trends 2023-2043: Across the Physical, Biological, and Information Domains," NATO Science & Technology Organization, 2023, vol. 2: Analysis.
- [2] H. E. Andås, "Emerging technology trends for defence and security," 2020.
- [3] E. M. Berendsen, A. Paauw, R. A. Rumley-van Gurp, E. H. Madslie, and E. M. Fykse, "Synthetic biology - A dual use technology of concern " FFI-rapport no. FFI-rapport 17/16604, 18.12.2017 2017.
- [4] NATO, "Summary of NATO's Biotechnology and Human Enhancement Technologies Strategy," ed, 2024.
- [5] NATO STO-TR-HFM-305, "Synthetic Biology for Defence," NATO Science and Technology Organization, STO-TR-HFM-305, 2022.
- [6] NATO STO-TR-HFM-273, "Long-term scientific study on CBRN defence," 2021.
- [7] N. R. Council *et al.*, "Industrialization of biology: A roadmap to accelerate the advanced manufacturing of chemicals," 2015.
- [8] Department of Defense, "DoD Releases Biomanufacturing Strategy," ed, 2023.
- [9] European Commission, "Commission takes action to boost biotechnology and biomanufacturing in the EU," 2024. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_1570.
- [10] Erhvervsministeriet, "Ny strategi sætter retningen for biosolutions," 2024. [Online]. Available: <https://www.em.dk/aktuel/nyheder/2024/feb/ny-strategi-saetter-retningen-for-biosolutions>.
- [11] I. a. T. Department for Science, "National vision for engineering biology," 2023.
- [12] Bioteknologirådet. "Syntetisk biologi." <https://www.bioteknologiradet.no/temaer/syntetisk-biologi/> (accessed.
- [13] C. Caudai *et al.*, "AI applications in functional genomics," *Computational and Structural Biotechnology Journal*, vol. 19, pp. 5762-5790, 2021.
- [14] United Nations. "Sustainable Development Goals." <https://sdgs.un.org/goals> (accessed.
- [15] J. Jumper *et al.*, "Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold," *Nature*, vol. 596, no. 7873, pp. 583-589, 2021.
- [16] F. Lentzos, "Biology's Misuse Potential," *Connections*, vol. 15, no. 2, pp. 48-64, 2016.
- [17] D. M. Sabra, A. Krin, A. B. Romeral, J. L. Frieß, and G. Jeremias, "Anthrax revisited: how assessing the unpredictable can improve biosecurity," *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 11, p. 1215773, 2023.
- [18] J. C. Venter, J. I. Glass, C. A. Hutchison, and S. Vashee, "Synthetic chromosomes, genomes, viruses, and cells," *Cell*, vol. 185, no. 15, pp. 2708-2724, 2022.
- [19] "Biosecurity Strategy," Coalition for Epidemic Preparedness Innovations (CEPI), 2024.
- [20] J. Cello and S. Mueller, "Production of infectious poliovirus from synthetic viral genomes," *Gene Synthesis: Methods and Protocols*, pp. 181-193, 2012.
- [21] J. Cello, A. V. Paul, and E. Wimmer, "Chemical synthesis of poliovirus cDNA: generation of infectious virus in the absence of natural template," *science*, vol. 297, no. 5583, pp. 1016-1018, 2002.
- [22] T. M. Tumpey *et al.*, "Characterization of the reconstructed 1918 Spanish influenza pandemic virus," (in eng), *Science*, vol. 310, no. 5745, pp. 77-80, Oct 7 2005, doi: 10.1126/science.1119392.
- [23] L. K. McMullan *et al.*, "Characterisation of infectious Ebola virus from the ongoing outbreak to guide response activities in the Democratic Republic of the Congo: a

-
- phylogenetic and in vitro analysis," *The Lancet Infectious Diseases*, vol. 19, no. 9, pp. 1023-1032, 2019.
- [24] M. M. Becker *et al.*, "Synthetic recombinant bat SARS-like coronavirus is infectious in cultured cells and in mice," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, no. 50, pp. 19944-19949, 2008.
- [25] K. J. Blight, A. A. Kolykhalov, and C. M. Rice, "Efficient initiation of HCV RNA replication in cell culture," *Science*, vol. 290, no. 5498, pp. 1972-1974, 2000.
- [26] R. J. Jackson, A. J. Ramsay, C. D. Christensen, S. Beaton, D. F. Hall, and I. A. Ramshaw, "Expression of mouse interleukin-4 by a recombinant ectromelia virus suppresses cytolytic lymphocyte responses and overcomes genetic resistance to mousepox," *Journal of Virology*, vol. 75, pp. 1205-1210, 2001.
- [27] R. S. Noyce, S. Lederman, and D. H. Evans, "Construction of an infectious horsepox virus vaccine from chemically synthesized DNA fragments," *PloS one*, vol. 13, no. 1, p. e0188453, 2018.
- [28] A. York, "Resurrection of a poxvirus causes alarm," *Nature Reviews Microbiology*, vol. 16, no. 4, pp. 184-184, 2018.
- [29] G. D. Koblenz, "The de novo synthesis of horsepox virus: implications for biosecurity and recommendations for preventing the reemergence of smallpox," *Health security*, vol. 15, no. 6, pp. 620-628, 2017.
- [30] M. Kvam, "Kopper - utryddet, men fortsatt fryktet," in *NHI.no*, ed, 2021.
- [31] M. Tryland, "Kopper og koppevirus – 200 år siden første vaksinasjon i Norge," *Tidsskrift for den norske legeforening*, 2001. [Online]. Available: <https://tidsskriftet.no/2001/12/medisinsk-historie/kopper-og-koppevirus-200-ar-siden-forste-vaksinasjon-i-norge>.
- [32] C. R. MacIntyre, "Reevaluating the risk of smallpox reemergence," *Military medicine*, vol. 185, no. 7-8, pp. e952-e957, 2020.
- [33] T. Sun, J. Song, M. Wang, C. Zhao, and W. Zhang, "Challenges and recent progress in the governance of biosecurity risks in the era of synthetic biology," *Journal of Biosafety and Biosecurity*, vol. 4, no. 1, pp. 59-67, 2022.
- [34] N. A. o. Sciences *et al.*, "Biodefense in the age of synthetic biology," 2018.
- [35] Deputy Prime Minister and the Chancellor of the Duchy of Lancaster. "UK Biological Security Strategy." <https://www.gov.uk/government/publications/uk-biological-security-strategy/uk-biological-security-strategy-html#contents> (accessed).
- [36] A. O. Nordraak and U. Horn, "Synthetic biology and biotechnology for military medicine and chemical and biological defence - current state and future perspectives," no. FFI-rapport 23/01821, 2024.
- [37] I. H. L. Monsen, S. Glenna, and M. Rjaanes, "Genome Editing for Soldier Enhancement—trends and implications," 2020.
- [38] M. Yadav and P. Shukla, "Efficient engineered probiotics using synthetic biology approaches: A review," *Biotechnology and applied biochemistry*, vol. 67, no. 1, pp. 22-29, 2020.
- [39] B. A. Pfeifer, M. Beitelshees, A. Hill, J. Bassett, and C. H. Jones, "Harnessing synthetic biology for advancing RNA therapeutics and vaccine design," *NPJ Systems Biology and Applications*, vol. 9, no. 1, p. 60, 2023.
- [40] C. Tang, L. Wang, L. Zang, Q. Wang, D. Qi, and Z. Dai, "On-demand biomanufacturing through synthetic biology approach," *Materials Today Bio*, vol. 18, p. 100518, 2023.
- [41] M. Hicks, T. T. Bachmann, and B. Wang, "Synthetic biology enables programmable cell-based biosensors," *ChemPhysChem*, vol. 21, no. 2, pp. 132-144, 2020.

-
-
- [42] NATO STO-TR-HFM-335, "Biotechnology, Human Enhancement & Human Augmentation: A comprehensive overview of its topical content," NATO Science and Technology Organization, STO-TR-HFM-ST-335, 2021.
- [43] L. H. Bjerkeseth, P. L. Lausund, B. Pedersen, T. Engøy, and J. M. Blatny, "Vitenskapelige og teknologiske fremskrittets innvirkning på CBRN-vern frem mot 2030 – konklusjoner fra en langtidsstudie i regi av NATO Science & Technology Organization," FFI-rapport no. FFI-rapport 22/00247, 2022.
- [44] NATO. "NATO's Chemical, Biological, Radiological and Nuclear (CBRN) Defence Policy." https://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_197768.htm (accessed).
- [45] H. Zhu, H. Zhang, Y. Xu, S. Laššáková, M. Korabečná, and P. Neuzil, "PCR past, present and future," (in eng), *Biotechniques*, vol. 69, no. 4, pp. 317-325, Oct 2020, doi: 10.2144/btn-2020-0057.
- [46] Y. Wang, Y. Zhao, A. Bollas, Y. Wang, and K. F. Au, "Nanopore sequencing technology, bioinformatics and applications," (in eng), *Nat Biotechnol*, vol. 39, no. 11, pp. 1348-1365, Nov 2021, doi: 10.1038/s41587-021-01108-x.
- [47] M. I. Hutchings, A. W. Truman, and B. Wilkinson, "Antibiotics: past, present and future," *Current opinion in microbiology*, vol. 51, pp. 72-80, 2019.
- [48] J. W. Park, P. N. Lagniton, Y. Liu, and R.-H. Xu, "mRNA vaccines for COVID-19: what, why and how," *International journal of biological sciences*, vol. 17, no. 6, p. 1446, 2021.
- [49] S. M. Brooks and H. S. Alper, "Applications, challenges, and needs for employing synthetic biology beyond the lab," *Nature Communications*, vol. 12, no. 1, p. 1390, 2021.
- [50] A. Sharma, G. Gupta, T. Ahmad, K. Krishan, and B. Kaur, "Next generation agents (synthetic agents): Emerging threats and challenges in detection, protection, and decontamination," in *Handbook on Biological Warfare Preparedness*: Elsevier, 2020, pp. 217-256.
- [51] M. Piotrowska, "Microbiological decontamination of mycotoxins: opportunities and limitations," *Toxins*, vol. 13, no. 11, p. 819, 2021.
- [52] G. Manco, E. Porzio, and Y. Suzumoto, "Enzymatic detoxification: a sustainable means of degrading toxic organophosphate pesticides and chemical warfare nerve agents," *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 93, no. 8, pp. 2064-2082, 2018.
- [53] E. Oheix, E. Gravel, and E. Doris, "Catalytic processes for the neutralization of sulfur mustard," *Chemistry—A European Journal*, vol. 27, no. 1, pp. 54-68, 2021.
- [54] M. K. Habib, "Controlled biological and biomimetic systems for landmine detection," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 23, no. 1, pp. 1-18, 2007.
- [55] D. F. Reding and J. Eaton, "Science and Technology Trends 2020-2040: Exploring the S and T Edge," NATO S and T Organization, 2020.
- [56] O. Burgos-Morales *et al.*, "Synthetic biology as driver for the biologization of materials sciences," *Materials Today Bio*, vol. 11, p. 100115, 2021.
- [57] A. D. Roberts *et al.*, "Synthetic biology for fibers, adhesives, and active camouflage materials in protection and aerospace," *MRS communications*, vol. 9, no. 2, pp. 486-504, 2019.
- [58] R. A. Le Feuvre and N. S. Scrutton, "A living foundry for synthetic biological materials: a synthetic biology roadmap to new advanced materials," *Synthetic and Systems Biotechnology*, vol. 3, no. 2, pp. 105-112, 2018.
- [59] H. Egge. "Bacteria-based concrete offers climate benefits." Norwegian SciTech News. <https://norwegianscitechnews.com/2021/02/bacteria-based-concrete-offers-climate-benefits/> (accessed).

-
-
- [60] Biomason. "Fusing biology with technology to usher in a new era of construction." <https://biomason.com/biocement#> (accessed).
- [61] "Forsvarssektorens klima- og miljøstrategi," ed, 2022.
- [62] B. Arnfinnsson and E. K. Tønsberg, "Nullutslippsforsvaret - en mulighetsstudie av klimavennlig tenknologi for Forsvaret," 2023.
- [63] H. König, D. Frank, R. Heil, and C. Coenen, "Synthetic genomics and synthetic biology applications between hopes and concerns," *Current genomics*, vol. 14, no. 1, pp. 11-24, 2013.
- [64] B. E. Logan, "Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells," *Nature Reviews Microbiology*, vol. 7, no. 5, pp. 375-381, 2009.
- [65] E. L. Rylott and N. C. Bruce, "How synthetic biology can help bioremediation," *Current Opinion in Chemical Biology*, vol. 58, pp. 86-95, 2020.
- [66] D. K. Karig, "Cell-free synthetic biology for environmental sensing and remediation," *Current opinion in biotechnology*, vol. 45, pp. 69-75, 2017.
- [67] I. V. Johnsen and J. Aaneby, "Biotilgjengelighet og risikovurdering av metaller i jord," Forsvarets forskningsinstitutt, 2023.
- [68] E. L. Rylott and N. C. Bruce, "Right on target: using plants and microbes to remediate explosives," *International journal of phytoremediation*, vol. 21, no. 11, pp. 1051-1064, 2019.
- [69] J. A. Tørnes, A. M. Johnsen, M. Ljønes, and I. V. Johnsen, "Vurdering av metoder for å overvåke dumpet kjemisk ammunisjon i Skagerrak," Forsvarets forskningsinstitutt 2024.
- [70] N. A. Young *et al.*, "A synthetic biology approach using engineered bacteria to detect perfluoroalkyl substance (PFAS) contamination in water," *Military Medicine*, vol. 186, no. Supplement_1, pp. 801-807, 2021.
- [71] M. Deyholos, A. A. Faust, M. Miao, R. Montoya, and D. A. Donahue, "Feasibility of landmine detection using transgenic plants," in *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets XI*, 2006, vol. 6217: SPIE, pp. 700-711.
- [72] H. J. Kim, H. Jeong, and S. J. Lee, "Synthetic biology for microbial heavy metal biosensors," *Analytical and bioanalytical chemistry*, vol. 410, pp. 1191-1203, 2018.
- [73] *Lov om framstilling og bruk av genmodifiserte organismer m.m. (genteknologiloven)*, Klima- og miljødepartementet, 1993.
- [74] O. H. Tveten and M. H. Larsen, "Flertall i utvalg ønsker betydelig oppmykning av genteknologiloven," in *Aftenposten*, ed, 2023.
- [75] E. Stokstad, "European Parliament votes to ease regulation of gene-edited crops," in *Science*, ed, 2024.
- [76] Kunnskapsdepartementet, "Strategi 2011-2020: Nasjonal strategi for bioteknologi," 2011.

Om FFI

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

FFIs formål

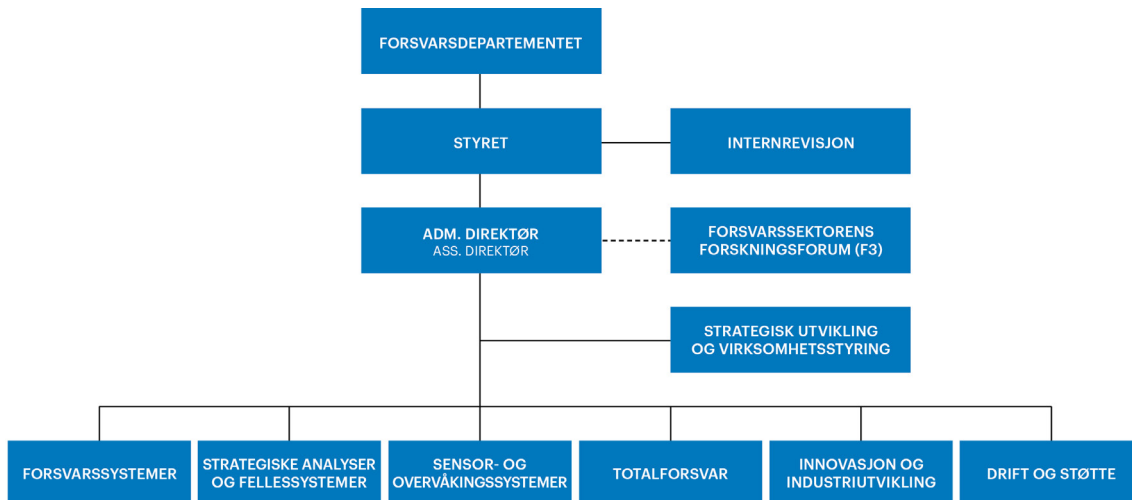
Forsvarets forskningsinstitutt er Forsvarets sentrale forskningsinstitusjon og har som formål å drive forskning og utvikling for Forsvarets behov. Videre er FFI rådgiver overfor Forsvarets strategiske ledelse. Spesielt skal instituttet følge opp trekk ved vitenskapelig og militærteknisk utvikling som 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 (FFI)
Postboks 25
2027 Kjeller

Besøksadresse:
Kjeller: Instituttveien 20, Kjeller
Horten: Nedre vei 16, Karljohansvern, Horten

Telefon: 91 50 30 03
E-post: post@ffi.no
ffi.no

Norwegian Defence Research Establishment (FFI)
PO box 25
NO-2027 Kjeller
NORWAY

Visitor address:
Kjeller: Instituttveien 20, Kjeller
Horten: Nedre vei 16, Karljohansvern, Horten

Telephone: +47 91 50 30 03
E-mail: post@ffi.no
ffi.no/en