



Förstudie för FoT område Energiförsörjning

WILHELM SAHLÉN, MATTIAS ELFSBERG, JOHANNA
ENSTRÖM, MATTIAS FORSLUND, MARTIN KARLSMO,
MATHILDA KARLSSON HAGNELL, ELIAS LALLO, ANDERS
ODELL, REBECCA STAPPE RENNER, NIKLAS ZETTERVALL

Wilhelm Sahlén, Mattias Elfsberg, Johanna
Enström, Mattias Forslund, Martin Karlsmo,
Mathilda Karlsson Hagnell, Elias Lallo, Anders
Odell, Rebecka Stappe Renner, Niklas Zettervall

Förstudie för FoT område Energiförsörjning

Titel	Förstudie för FoT område Energiförsörjning
Title	Feasibility study for R&D area Energy Supply
Rapportnr/Report no	FOI-R--5705--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2024
Antal sidor/Pages	46
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	Försvarsmakten
Forskningsområde	Övrigt
FoT-område	Temaområde
Projektnr/Project no	E20948
Godkänd av/Approved by	Pernilla Magnusson
Ansvarig avdelning	Vapen, skydd och säkerhet

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

Under året har förstudien inom temaområdet Energiförsörjning bedrivits under Försvarmaktens FoT program. Förstudien kartlägger FOI:s genomförda och pågående verksamhet berörande Energiförsörjning med syftet att ge rekommendationer om hur verksamheten ska utvecklas. Ambitionen är att temaområdet blir ett nytt FoT-område med start 2025. Därför är det viktigt med ett avstamp i en helhetsbild av innehåll och omfattning för att nyttja resurser på ett effektivt vis

Nyckelord: energiförsörjning, energi, energisystem, batterier, alternativa bränslen, bränslen, vätgas, litiumjonbatterier, bränsleceller, logistik, civil sårbarhet, militär sårbarhet, metallförbränning, mikronät.

Summary

During this year, the feasibility study and the theme area Energy Supply have been commissioned by the Swedish Armed Forces' research and development (R&D) program. This feasibility study assesses current activities with respect to energy supply and provide recommendations for development. The ambition for this research area is to become a new R&D area starting in 2025, for which it is important to establish a comprehensive understanding of appropriate content and extent to utilize resources effectively.

Keywords: energy supply, energy, energy systems, batteries, lithium-ion batteries, alternative fuels, fuels, hydrogen, fuel cells, logistics, civil vulnerability, military vulnerability, metal combustion, microgrid.

Innehållsförteckning

1	Inledning	8
1.1	Syfte	8
1.2	Genomförande	9
1.3	Disposition	9
2	Kartläggning av intern verksamhet på FOI	10
2.1	Teknik och tillämpningar	10
2.1.1	Batterier	10
2.1.1.1	Litium- och natriumbaserade batterier	10
2.1.1.2	Flödesbatterier	11
2.1.1.3	Termiska batterier	11
2.1.2	Bränsleceller och elektrolysörer	12
2.1.3	Bränsle och förbränning	12
2.1.4	Metallförbränning	13
2.1.5	Undervattenstillämpningar	13
2.1.6	Unmanned Aerial System (UAS)	13
2.1.7	Befästningar och infrastruktur	13
2.1.8	Grindsjöns energitestanläggning (GRETA)	14
2.1.9	Övriga batterisystem	14
2.1.10	Framdrivning och gasturbiner	14
2.1.11	Markfordon	14
2.2	Områden studerade på Förvarsanalys	15
2.2.1	Energiberedskap i Sverige	15
2.2.2	Energiberedskap med Nato-perspektiv	16
2.2.3	Energisäkerhet och energiomställning i ett europeiskt perspektiv.	16
2.2.4	Geopolitiska och säkerhetspolitiska aspekter på energi och energiomställning	16
2.2.5	Energisäkerhet och energiberedskap för Förvarsmakten och Förvarsmaktens energiomställning	17
2.2.6	Studien Klimatneutral Förvarsmakt	17
2.2.7	Logistik och försörjningskedjeanalyser inom energiområdet	17
3	Forsknings- och teknikutvecklingsläget, nationellt och internationellt	18
3.1	Tekniska lösningar och tillämpningar	18
3.1.1	Litium- och natriumbaserade batterier	18
3.1.2	Flödesbatterier	20
3.1.3	Superkondensatorer	20
3.1.4	Bränsleceller och elektrolysörer	20
3.1.5	Metallförbränning	21
3.1.6	Bränsle och förbränning	21
3.1.7	Kärnkraft	22

3.1.8	Markfordon.....	22
3.1.9	Flygsystem.....	22
3.1.10	Mikronät	23
3.2	Logistik.....	23
3.2.1	Militära energisystem och den militära logistiken.....	23
3.2.2	Sårbarheter i försörjningskedjor	24
3.2.3	Drivmedelsförsörjning inom insatsverksamhet.....	24
3.3	Militär energisäkerhet och beroenden till civila försörjningskedjor	25
3.3.1	Akademisk forskning.....	25
3.3.2	Övrig litteratur	26
4	Kartläggning av metoder för framtagning av prognoser för Försvarsmaktens framtida energibehov	27
4.1	Metodbeskrivningar	27
4.2	Slutsatser/vägen framåt.....	29
5	Kunskapsuppbyggnad och avgränsningar	30
6	Konkrete förslag på kunskapsuppbyggande verksamhet	32
6.1	Övergripande aspekter	33
6.2	Tekniska områden	33
6.3	Beroenden till civila försörjningskedjor	35
6.4	Strategi för energiförsörjning	36
6.5	Fortsatt arbete med metodstöd för prognoser för framtida energibehov..	36
6.6	Samverkansprojekt med Försvarsmakten.....	37
7	Referenser	38

1 Inledning

Det breda forskningsområdet Energiförsörjning är centralt för en väl fungerande försvarsmakt och totalförsvar. Den civila energiomställningen går med rasande fart och det är viktigt för Försvarsmakten att följa utvecklingen för att inte påverkas negativt av energiomställningen. Försvarsmaktens behov och kravställning för energisystem kan skilja sig väsentligt från civila krav med avseende på exempelvis robusthet och prestanda. FOI och FMV har tidigare bedrivit forskning och teknikutveckling med inriktning mot energiförsörjning på uppdrag från Försvarsmakten. Det har dock saknats ett eget FoT-område för energi vilket har bidragit till att det inte har tagits ett helhetsgrepp kring forskningsområdet och därmed har övergripande frågeställningar inte behandlats, där i bland frågeställningar specifika för respektive domän. Det kommande FoT-området Energiförsörjning bidrar till att etablera långsiktiga strategier genom att samla frågeställningar och använda resurser på ett effektivt vis, vilket är än viktigare för ett sådant brett forskningsområde.

Frågor som berör energiförsörjning kommer genomsyrar alla existerande energisystem, stora som små, vilket gör området både komplext och omfattande. En konceptuell uppdelning av området är delarna produktion, distribution och logistik, lagring samt användning av energi. Inom *produktion* skapas energi som med hjälp av en energibärare i sin tur *distribuerar* energi till en *användare* som därefter konsumerar energin. Om det finns en diskrepans inom plats eller tid mellan produktion och konsumtion behövs *lagring* som ett hjälpmedel. När det kommer till forskning och utveckling inom energiförsörjning finns det flera starka aktörer inom den civila sfären som bidrar med flera olika perspektiv. Idag saknas det däremot en aktör som förstår och tolkar det unika i de militära behoven. Där kan Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI) fylla en stor lucka med hjälp av verksamheten inom FoT Energiförsörjning, inte minst när det kommer till att utvärdera och svara på frågeställningar som inte naturligt kommer fram inom civil forskning. FoT-område energiförsörjning behöver vara brett och innefatta produktion, distribution och lagring samt konsumtion av energi inom Försvarsmaktens olika domäner. Området ska ha ett militärt fokus med gränssytor mot det civila försvarets energiberedskap.

FOI har under hösten 2024 genomfört en förstudie som ett första steg i etablerandet av FoT-området Energiförsörjning.

1.1 Syfte

Uppdraget var att genomföra en myndighetsgemensam förstudie som syftar till att identifiera hur den kunskapsuppbyggande verksamheten inom energiförsörjningsområdet ska utformas. I direktiven från Försvarsmakten ingick att studien skulle omfatta:

- a) En kartläggning av den egna verksamheten (genomförd, pågående och planerad) inom energiförsörjningsområdet (inklusive verksamhet som finansieras med andra anslag än 1:4) för respektive myndighet.
- b) En analys av forsknings- och teknikutvecklingsläget inom energiförsörjningsområdet, i ett nationellt och internationellt perspektiv. Positiva och negativa synergier mellan energiförsörjningen för civilsamhället och det militära försvaret ska beaktas.
- c) Förslag på metoder för framtagning av prognoser och scenarion för framtida energibehov inom det militära försvaret.
- d) Ett förslag på hur kunskapsuppbyggningen ska utformas framgent (ansvarsområde och avgränsningar, indelning i delområden, principer för samverkan med andra FoT-områden och kunskapsnyttjande verksamhet etcetera).
- e) Samt konkreta förslag på kunskapsuppbyggande verksamhetsuppdrag (Forskning och Teknikutveckling) under perioden 2025-2030.

1.2 Genomförande

En myndighetsgemensam kartläggning har genomförts i samverkan med Försvarmakten, Försvarets Materielverk (FMV) och Fortifikationsverket (FortV), där fokus varit på verksamhet inom energiförsörjning. Inriktningen för förstudien gav respektive myndighet i uppdrag att kartlägga sin egen verksamhet. Resultatet av FOI:s kartläggning presenteras i den här rapporten. Förstudien gör även en utblick över rådande forsknings- och teknikutvecklings läge, både nationellt och internationellt.

1.3 Disposition

- Kapitel 2 är en kartläggning av utförd och pågående verksamhet inom energiförsörjning hos FOI.
- Kapitel 3 beskriver rådande forsknings- och teknikutveckling inom energiförsörjning.
- Kapitel 4 presenterar en initial kartläggning av metoder för framtagning av prognoser för Försvarmaktens framtida energibehov, och ger ett förslag för vidare arbete.
- Kapitel 5 beskriver hur kunskapsuppbyggnad inom energiförsörjning bör genomföras, samt vilka avgränsningar som initialt bör göras.
- Kapitel 6 ger konkreta förslag på verksamhet för energiförsörjning.

Då de olika delarna av uppdraget/i förstudien skiljer sig åt metodologiskt beskrivs de metoder som använts i respektive kapitel.

2 Kartläggning av intern verksamhet på FOI

I det här kapitlet struktureras kartläggningen efter verksamhet som sker inom respektive avdelning hos FOI. De olika avdelningarna arbetar delvis inom olika discipliner och har haft olika beställningsvolymmer med uppdrag med avseende på energiförsörjning under åren. Kartläggningen visar en generell bild över genomförd, pågående och planerade uppdrag som kategoriseras som energiförsörjning.

Det är värt att nämna att en fullständig kartläggning av verksamhet inom energiförsörjning kan vara svårt att garantera och det kan vara så att vissa delar inte förekommer. Skälen till detta är exempelvis att personer bytt arbetsplats, eller sekretessmässiga skäl.

Kartläggningen har genomförts dels genom utskick av ett frågeformulär till enhetschefer och forskningsföreträdare på FOI samt sökning och inläsning av tidigare rapporter och projektdokument.

Ett flertal akademiska artiklar har publicerats inom området under åren. Dessa artiklar är framtagna inom projekt som också har resulterat i FOI-rapporter. Artiklarna bygger till stor del på det som redovisats i rapporterna. Här ges ingen redovisning eller sammanfattning av dessa artiklar då de övergripande ämnena täcks av redovisningen nedan.

2.1 Teknik och tillämpningar

Teknik och tillämpningar har till största del studerats på avdelningen FOI Vapen, Skydd och säkerhet (VSS). VSS är lokaliserad på Södertörn och innefattar ett skjutfält om cirka 7,5 km². Avdelningen bedriver forskning, utveckling och provning inom energetiska material, energilagringssäkerhet, stridsdelar och penetrationsmekanik, vapenverkan och framdrivning, vapenvärdering och risk, elektromagnetiska vapen, resiliens mot explosivämnesshot. Tillgång till ett skjutfält med flertalet skräddarsydda anläggningar ger unika möjligheter att kombinera experiment med modellering och teori.

Teknik och tillämpningar som relaterar till energi har även studerats på avdelningen FOI Förvarsteknik (FT) i Kista. Avdelningen arbetar med områden som marina sensorsystem, undervattens teknik, undervattenssensorer, rymdsystem, flygsystem, systemvärdering, autonomi och modellförvaltning, styrda vapen samt mark- och sjösystem

2.1.1 Batterier

Batterier är en typ av energilager som blir betydande just på grund av dess frekventa förekomst samt dess unika förmåga att lagra energi. Batterier kommer i alla former, storlekar och i en mängd olika sorter. En vanlig uppdelning är att dela upp batterier i kategorierna *primära* (ej uppladdningsbara) och *sekundära* (uppladdningsbara). En kartläggning och närmare beskrivning av kategorierna, samt formfaktorer har tidigare gjorts [1].

2.1.1.1 Litium- och natriumbaserade batterier

Litiumjonbatterier har mycket hög energitäthet om man jämför med andra batterikemier och har av denna anledning letat sig in i nästan all modern bärbar elektriskutrustning i såväl militär som civil sektor. VSS har sedan 2017 etablerat kompetens och infrastruktur för att experimentellt prova med avseende på prestanda och säkerhet. Detta har främst skett genom enskilda beställningar samt från FoT-medel. De enskilda beställningarna har kommit från Försvarsmakten, FMV och FortV samt civila aktörer som Scania, Polarium, Echandia och SAAB.

FOI:s erfarenhet av karakteriseringsmetoder inom ammunitions- och explosivämnessäkerhet har nyttjats för provning av batterisystem med tanke på att skyddsprinciper för explosivämnena är relevanta i försök med batterier. Inom verksamheten på VSS betraktas batterier som en typ av explosiv vara just på grund av det höga energiinnehållet och de riskfyllda förlopp där den energin kan frigöras.

I syfte att bygga kunskap om kommersiella batterisystem har provning av civila aktörers batterisystem genomförts, där en slutsats är att de mest säkerhets- och brandkritiska tillämpningarna inom Försvarsmakten har en högre kravbild på säkerheten i batterisystemen än vad som i regel krävs för civila kunder. För att tydligare kravställa säkra batterisystem har FOI bland annat förmåga att utreda nya koncept och konstruktionsval.

Den experimentella delen av verksamheten, både infrastruktur och kompetens, har byggts upp i samband med provning av prestanda och säkerhet. Tester som genomförs är i) initiering av termisk rusning¹ genom överladdning, uppvärmning, mekanisk påverkan² eller kortslutning, ii) battericyklning där effekten på prestandan av olika laddning och urladdningshastigheter, temperatur eller antal cykler undersökts, samt iii) utredning av det termiska beteendet hos batterier genom mätningar med *Accelerated Rate Calorimetry* (ARC) men också med bombkalorimeter där en metod för att mäta värmeavgivning från battericeller publicerats i ett konferensbidrag [2]. Med hjälp av dataunderlag från dessa tester kan sedan kravställning och rekommendationer ges som innefattar typ av batterikemi, lämpligt cellformat, batterisystemets uppbyggnad och konstruktion.

Den näst mest mogna metalljonbatteritypen, som på 70- och 80-talet studerades parallellt med de nu marknadsledande litiumjonbatterierna, är natriumjonbatteriet. Dessa batterier är nu också kommersialiserade och används i en mängd tillämpningar globalt med syfte att minska beroendet av dyra och allt mer sällsynta litiumjonbatterimaterial. FOI anser att de kan ses som komplement snarare än ersättare för litiumjonbatterierna och kan för FOI vara en bra kompetensutvidgning utan större komplexitet då de fungerar och byggs snarlikt litiumjonbatterier. Infrastruktur och kompetens som byggts upp i arbetet med litiumjonbatterierna kan således användas och överföras till dessa batterier vilket är en stor fördel. Under rapportens skrivande försiggår ett av Energimyndigheten finansierat samarbetsprojekt mellan FOI, RISE, Uppsala universitet och Altris AB, som syftar till att utveckla och utvärdera fluorfria elektrolyter till natriumjonbatterier.

2.1.1.2 Flödesbatterier

Flödesbatterier har vuxit fram som en lovande teknik för energilagring, särskilt när det gäller att lagra energi från storskalig integration av förnybar energi som sol- och vindkraft. Dessa batterier skiljer sig från traditionella batterier genom att energin lagras i flytande elektrolyter som cirkulerar mellan externa tankar, vilket ger fördelen av lång livslängd och enkel skalbarhet. På grund av dessa egenskaper har forsknings- och utvecklingsinsatser för flödesbatterier intensifierats, både nationellt och internationellt. Inga praktiska experiment har ännu inte genomförts på FOI, men teoretiska rapporter har skrivits som tar upp olika energisystem [3], flödesbatterier för berggrum [4] och en översikt över olika energitekniker [5].

2.1.1.3 Termiska batterier

FOI har utfört provning av termiska batterier inom ramen för livstidsförlängning av olika militära system som nyttjar termiska batterier. Det har ofta rört sig om robotsystem men senast i år genomförs även provning mot JAS Gripen. Termiska batterier har väldigt stabil kalenderlagring och batterierna som testas är ofta ca 30-40 år gamla. Provningsen går ut på

¹ Termisk rusning är det explosivliknande händelseförloppet när batterier brinner under en kraftig rökgasutveckling.

² Mekanisk påverkan som nålpenetration, krossning, stöt eller liknande.

att se om prestandan hos åldrade batterier fortfarande lever upp till den satta specifikationen. I uppdraget mot JAS Gripen genomförs även studier där åldringen hos de termiska batterierna undersöks genom analys av innanmätet.

2.1.2 Bränsleceller och elektrolysörer

Bränsleceller och elektrolysörer är nyckelkomponenter för hållbar energiförsörjning. Bränsleceller omvandlar kemisk energi från olika bränslen, såsom vätgas, till elektricitet genom en elektrokemisk process. Bränsleceller använder vanligen luft eller syre som oxidant, och beroende på bränsletyp kan flera olika reaktioner äga rum. De vanligaste bränslecellsteknologierna, som till exempel proton exchange membrane (PEM)-bränsleceller, är särskilt effektiva och har låga utsläpp, vilket gör dem attraktiva för en mängd olika tillämpningar, inklusive fordonsdrift och energiförsörjning i befästningar.

Elektrolysörer, i sin tur, använder elektricitet för att spjälka vatten (H_2O) till vätgas (H_2) och syre (O_2) genom elektrolys. Vätgasen som produceras kan sedan användas som ett energilager. Till exempel kan elektrolysören drivas med energi från elnätet vid lågt elbehov eller när överskottsel finns tillgänglig från till exempel förnybara energikällor som sol- eller vindkraft. Denna vätgas kan lagras och senare användas i bränsleceller för att generera elektricitet vid behov, exempelvis under perioder av högt elbehov eller vid elavbrott.

Kombinationen av elektrolysörer och bränsleceller innebär en grönare och mer flexibel lösning för reservkraft, i jämförelse med traditionella dieselgeneratorer. Elektrolyssystem kan byggas lokalt där vatten och elnät finns tillgängligt, vilket kan syfta till en decentraliserad och mer robust energinfrastruktur samt minskar beroendet av fossila bränslen. Det finns en förstudie om vätgasens möjligheter för militära befästningar [6].

2.1.3 Bränsle och förbränning

FOI har arbetat intensivt med förbränning, prestanda och karaktäristik för olika bränslen och drivmedel³ under de senaste 15 åren. I dagens samhällsklimat ter sig dessa frågor som självklara men för enbart tio år sedan var situationen en helt annan. Tack vare nationella och internationella samarbeten har FOI tidigt haft en bred ingång i detta forskningsområde. År 2011 och framåt genomfördes forskningsarbeten tillsammans med Siemens Turbomachinery (idag Siemens Energy) i Finspång där effekterna av kombinationen av naturgas och vätgas undersöktes [7]. Dessa projekt fokuserade enbart på gasformiga bränslen, likt gjorde det EU-projekt kring vätgas och hypersonik, Stratofly [8], där FOI som en av flera internationella partners hade en central roll i studier kring vätgas och formering av kväveoxider, så kallad NOx. Energimyndigheten har i de båda projekten EFFECT I och II [9] varit en central finansiär till FOI:s forskning kring bränslen och energieffektivitet. De båda projekten resulterade i en lång rad vetenskapliga publikationer och signifikant förhöjd kunskap nationellt. Dessa två projekt drevs tillsammans med Lunds Tekniska Högskola (LTH), SSAB och ovan nämnda Siemens. Vad gäller projekt som fokuserar på flytande bränslen har flera av dessa handlat om studier kring motorn Microturbo TRI-60, som sitter i RBS-15. Här har ett flertal projekt undersökt alltifrån prestanda, bränsleflexibilitet, motoreffektivitet och signaturfrågor. Två projekt från FMV jämförde effekten av fossila och alternativa bränslen i TRI-60, där dessa projekt var rent experimentella [10]. Ett större projekt som inriktades mot TRI-60-motorn, finansierad av utländsk kund, varade mellan 2014 och 2018 och resulterade i signifikant kunskapsuppbyggnad kring både experiment- och simuleringsverksamhet för gasturbiner [11]. Studier tillsammans med IVL Svenska Miljöinstitutet IVL undersökt olika bränslens påverkan på utsläpp och signaturer, återigen användandes TRI-60. På senare år har FOI utökat samarbeten kring alternativa bränslen dels genom medverkan i det nationella kompetenscentrumet CESTAP [12] dels genom deltagande i NATO STO AVT-gruppen

³ Drivmedel är bränsle som nyttjas till framdrift.

AVT 397, Sustainable Aviation Fuels in a Military Context. Sammanfattningsvis kan sägas att FOI var tidigt ute att undersöka olika bränslen och dess effekter inom framdrivning och elproduktion, samt att det nationella och internationella intresset på senare år ökat markant och där mer fokus för FOI:s del har varit på flytande bränslen.

För att kategorisera den forskningen som gjorts på FOI om framdrivningssystem och bränslen kan man dela upp den i tre delar; 1. Den del som handlar om elproduktion, ofta tillsammans med Siemens Energy, 2. Den del som är av naturen grundforskning, där majoriteten av finansieringen kommit från Energimyndigheten, och 3. Den del som är mer tillämpas och innefattar framdrivningsfrågor. Samtliga dessa tre delar har i sin tur använt en rad olika bränslealternativ, både fossila och alternativa.

För forskning kring hypersoniska framdrivningssystem, med fokus på ram-/scramjets, pågår ett omfattande arbete kring byggnation av en anläggning för att kunna utföra experiment för ram-/scramjetmotorer i realistiska förhållanden. Denna anläggning är ett stort åtagande som FOI valt att ta sig an. Anläggningen kommer, när den är klar, vara unik i Europa, och en av endast en handfull sådana anläggningar i världen. Till detta arbete har det också utförts ett väldigt omfattande simuleringsarbete för att bättre förstå den intrikata fysik som styr förbränningsförloppet i motorer till hypersoniska farkoster.

2.1.4 Metallförbränning

Metallförbränning är ett område som utreds ur flera aspekter på VSS. Fokus för denna rapport är metallförbränning för elgenerering. Andra områden där metallförbränning utforskas är metalliserade explosivämnen för undervattenssprängmedel eller krut för framdrivning. Oavsett område är de fundamentala mekanismerna vid förbränning intressanta och forskning gynnar flera områden.

För generering av el har en rapport levererats till FortV [4]. Än så länge har ingen experimentell verksamhet genomförts hos FOI men under 2024 påbörjas verksamhet inom metallförbränning där bland annat experimentella uppställningar tas fram i syfte för validering av modellering. Tillämpningar där metallförbränning har potential är ubåt, ytfartyg och infrastruktur/fast elproduktion.

2.1.5 Undervattenstillämpningar

Energiförsörjningsverksamhet mot tillämpningar som Torped 47, Torped 62, Ubåt och sonarbojar. I dessa projekt har innehållet varierat i detalj men varit generellt gällande energilagringssystem, framförallt batterisystem, för respektive tillämpning, där sonarbojar särskiljer sig genom att vara en lågeffektstillämpning medan övriga kräver mer effekt.

2.1.6 Unmanned Aerial System (UAS)

Energiförsörjningsverksamheten har generellt inte arbetat mot någon specifik UAS plattform, uppdragen har både beaktat mindre system som quadcopttrar med fokus på spaning men även UCAV⁴. I uppdragen har batterisystem utretts kopplat till driftprofiler, val av cell, konstruktion och kallt klimat.

2.1.7 Befästningar och infrastruktur

Energiförsörjningsverksamhet avseende befästningar och infrastruktur har innefattat att utreda energisystem med deras särskilda prestandakrav och konstruktion. Uppdragen har ofta inneburit att förstå säkerhetsrisken med att placera nya och moderna energisystem i militära anläggningar men också hur man uppnår optimala lagringsförhållanden och inför nya tekniker.

⁴ Unmanned Combat Aerial Vehicle

2.1.8 Grindsjöns energitestanläggning (GRETA)

FortV, FMV och FOI fått uppdraget av Försvarmakten att utveckla en vätgasbaserad reservkraftsanläggning. Vätgasbaserad reservkraftsanläggning har potential att ge operationella fördelar som lokal produktion av vätgas, alltså mindre logistik, lägre signatur och ett mindre beroende av luft. Projektet, som sträcker sig från 2023 till slutet av 2025, ska verifiera användningen av vätgas som energibärare i ett mikronät med ett kombinerat bränslecell- och elektrolysörsystem för att leverera en robust och hållbar reservkraftslösning. Mikronätet kommer att fungera som ett mer miljövänligt alternativ till de dieselgeneratorer som traditionellt används för reservkraft. Inom projektet kommer verifiering av tekniken genomföras för att säkra en robust reservkraftslösning.

2.1.9 Övriga batterisystem

Under åren har VSS tagit emot uppdrag rörande batterisystem mot andra typer av tillämpningar utan en direkt militär anknytning. Det kan vara exempelvis mot Echandia AB som utvecklar eldrivna passagerare färjor, mot Scania som utvecklar eldrivna och hybriddrivna lastbilar eller mot Polarium som utvecklar batterisystem som energilager för diverse tillämpningar.

2.1.10 Framdrivning och gasturbiner

Forskningen på FOI kring luftförbrukande framdrivningssystem kan delas upp i två delar; Först den del som handlar om framdrivningssystem för hypersoniska farkoster, till exempel ram-/scramjets, duktraketer och roterande detonationsmotorer (RDE), och sedan den del som fokuserar på mer traditionella framdrivningssystem med fokus på gasturbiner, ofta med fokus på TRI-60-motorn till RBS-15.

FOI:s omfattande simuleringsarbete kring ram-/scramjetmotorer har lagt grunden för att ge FOI den kunskap som behövs för att ta nästa steg inom detta område, och där kommer den nya experimentanläggningen att bli en värdefull tillgång för att bygga vidare inom detta område. Det krävs omfattande kunskap inom detta område för att kunna hantera och i slutändan nedkämpa de komplexa hypersoniska system som blir allt vanligare i vår omvärld. Vad gäller RDE har detta varit ett område som länge varit av intresse men då finansiering har blivit tillgänglig först under 2024 har ett sådant arbete inte kommit lika långt på FOI som kring ram-/scramjets eller gasturbiner. Arbetet kring gasturbiner har resulterat i markant ökad kunskap kring de system som Försvarmakten använder idag, och har även lagt grunden för potentiell vidareutveckling av nuvarande system, främst i termer av TRI-60-motorn. Här kan den erhållna kunskapen kring bränsleflexibilitet och signaturfrågor komma till stor nytta, kunskap som även kan extrapoleras till andra system som använder gasturbiner, både inom marinen och flyget. Flertalet aktörer inom industrin har visat intresse för samarbeten inom detta område, där kunskapen om och anläggningen med TRI-60 är central.

2.1.11 Markfordon

Inom FoT-området marksystem bedrivs energirelaterad verksamhet i FoT-projektet markfordon, som leds från avdelningen FT. Den energirelaterade verksamheten som bedrivs inom FoT-projektet markfordon [13] berör främst energisystem för och hybridisering av markfordon. Typiska forskningsfrågor som behandlas är hur en hybridisering påverkar ett stridsfordons bränsleförbrukning och rörlighet och hur kan nya vapensystem såsom laser- och mikrovågsvapen (HPM) integreras med fordonet och dess energisystem [14].

2.2 Områden studerade på Försvarsanalys

Avdelningen för Försvarsanalys (FA) ger kvalificerat analys- och beslutsstöd inom försvars- och säkerhetsområdet. Avdelningen är lokaliserad i Kista och har kompetens inom en stor bredd av vetenskapliga discipliner. Frågor inom energiförsörjning berörs bland annat inom områdena säkerhetspolitik, logistik och samhällets försörjningsberedskap. I huvudsak utgår energiforskningen på avdelningen från övergripande perspektiv.

2.2.1 Energiberedskap i Sverige

Energiberedskap på FA handlar i stort om nationell beredskap i nuvarande och framtida energisystem och hur sådan energiberedskap kan planeras, utvecklas och/eller säkerställas. Övergripande aspekter som har studerats är:

- olika förutsättningar för energiberedskap [15], styrningskedjor och vad sektorsansvar kan betyda [16],
- gråzonshot mot energiförsörjningen [17] och hur framtida händelseutvecklingar och scenarier kan påverka energiberedskapen [18], [19],
- förmågebedömning kopplat till energisystem och möjligheter att förhindra, motstå och hantera allvarliga störningar [20] och hur förbrukningsdämpande åtgärder kan användas som ett verktyg för att hantera en energikris, med fokus på olja [21],
- samt direkta och indirekta konsekvenser vid energibortfall på samhällsviktig verksamhet och funktioner [22].

Resultat från den tidigare forskningen inkluderar arbetsmodeller för att bygga beredskap [16], ett analytiskt ramverk för att studera åtgärder för att hantera energikriser, [21] indikatorer att använda för bedömning av energiberedskap [15], identifiering av hot och sårbarheter [17], utvecklingsområden inom energiberedskap [18] samt en konceptuell beskrivning av vilken roll energisektorn kan ha för att bidra till det civila försvaret [19]. Förutom de övergripande frågorna har mer specifika frågor som faller under eller kan appliceras på energiberedskapen i Sverige studerats. Dessa presenteras här:

○ **Energiberedskap och energiomställningen**

Detta område handlar specifikt om hur energiomställningen kan påverka olika aspekter av nationell energisäkerhet. Aspekter som har studerats är olika sätt att mäta energisäkerhet på och om energisäkerhet kan rankas, hur energisäkerhet kan säkras under omställningen samt hur olika energisäkerhetsaspekter påverkas av klimatomställningen. Slutsatser som dragits är vikten av att, på nationell och EU-nivå, se över samordning och integrering för att upprätthålla och stärka koherensen mellan de många politiska målen och instrumenten riktade mot klimat och energisäkerhet [23].

○ **Intressekonflikter mellan Försvarmakten och energiomställningen (Vindkraft)**

En studie har genomförts som studerade möjligheten till samexistens mellan Försvarmaktens verksamhet och utbyggd vindkraft. Syftet med studien var att ge förslag på hur en utökad utbyggnad av vindkraft ska kunna ske samtidigt som Försvarmaktens intressen värnas [24].

○ **Erfarenheter från Ukraina**

En studie har genomförts som ger en beskrivning av Rysslands attacker mot det ukrainska kraftsystemet, med fokus på vintern 2022-2023. Den redogör för några av de viktigaste konsekvenserna av dessa attacker samt hur Ukraina har agerat för att hantera dessa. Ett antal observationer görs som kan ligga till grund för hur beredskapen inom kraftsektorn kan utvecklas och stärkas i Sverige [25].

○ **Drivmedel och energiförsörjning för transportsektorn**

Ett fåtal studier har genomförts som belyser drivmedel och energiförsörjning för transportsektorn. Aspekter som har studerats är aktörsperspektiv på riskhantering inom drivmedelsförsörjningen [20] och olika utvecklingsvägar för transportsektorns energiförsörjning [26].

2.2.2 Energiberedskap med Nato-perspektiv

Området handlar om hur Natos koncept och krav relaterar till och påverkar planeringen av energiberedskapen och -försörjningen i Sverige. Inom området har Natos civila krisberedskapsarbete beskrivits, hur Natos ”baseline requirements” kopplar till motsvarande befintliga nationella processer i Sverige, och energiförsörjningens koppling till världlandsstöd. Aspekter som har belysts är planeringen för energirelaterat världlandsstöd samt praktiska, strategiska och politiska mervärden och potentiella problem som kan följa av användandet av NBR inom krisberedskapen och totalförsvaret. Arbetet har resulterat i fiktiva typfall för världlandsstöd, som kan användas i planeringen, och en metodik som kan användas av enskilda civila myndigheter för att skapa ett förhållningssätt till NBR [27], [28].

2.2.3 Energisäkerhet och energiomställning i ett europeiskt perspektiv.

Ett fåtal studier har också berört energisäkerhet och energiomställningen i ett europeiskt perspektiv. Aspekter som har studerats är energiunionen [27] i ett europeiskt perspektiv och hur den kan påverka Försvarmakten, [29] europeiska perspektiv på utvecklingsvägar för transportsektorns energiförsörjning [26], EU-länders beroende av energihandel med Ryssland [30], samt hur olika scenarier för utvecklingen av energisäkerheten och säkerhets- och geopolitiken i EU kan påverka Försvarmakten [31].

2.2.4 Geopolitiska och säkerhetspolitiska aspekter på energi och energiomställning

Området handlar brett om hur geopolitik och säkerhetspolitik påverkar och samverkar med energiförsörjning och energiberedskap, och vice versa. Aspekter som har studerats inkluderar:

- olika sätt att förhålla sig till begreppen energisäkerhet och energiberoenden [32],
- hur energisäkerhet relaterar till olika säkerhetspolitiska strategier [33] och den säkerhetspolitiska kopplingen mellan energi och internationella relationer respektive energi och konflikter [34],
- en geopolitisk analys av rysk energi [35], hur den omfattande utvinningen av okonventionell gas och olja påverkar amerikansk säkerhetspolitik [36], energipolitik i östra Medelhavet [37] och Arktis geostrategiska betydelse med anledning av förekomsten av stora energi- och mineralresurser i Arktis [38],
- samt betydelsen av sällsynta metaller och hur omvärldsutvecklingen påverkar efterfrågan på dessa sällsynta metaller samt vilken risken är för nya resurskrig [39] och vilka försvarsförmågor och industrier som är beroende av tillgång till sällsynta jordartsmetaller och vilka resurser Europa för närvarande (2012) saknar för att kunna säkra tillgången till dessa [40].

2.2.5 Energisäkerhet och energiberedskap för Försvarmakten och Försvarmaktens energiomställning

Området handlar om hur Försvarmakten kan planera och säkerställa sin egen energiförsörjning.

○ Tidigare forskning

En stor del av forskningen om energiförsörjning kopplat till Försvarmakten bedrevs för över tio år sedan. Under åren 2008-2009 bedrevs FoT-projekt Energisäkerhet. Trots att detta är länge sedan, och många förutsättningar har ändrats radikalt sedan dess, är vår initiala bedömning att resultat från den tidigare forskningen kan vara relevanta idag, främst när det gäller modeller och metoder. Den tidigare forskningen inkluderar:

- en kartläggning av Försvarmaktens energianvändning (2012) [41],
- underlag till Försvarmakten för den långsiktiga planeringen dels vad gäller påverkan från spelet kring energin på den internationella arenan, dels vad gäller framtida energilösningar för den egna verksamheten [42],
- en kartläggning av energisäkerhetsstrategier på försvarmaktsnivå i andra länder eller organisationer och i så fall vilka prioriteringar eller avvägningar som gjorts [43],
- hur förändringar i den globala energiförsörjningen kan innebära nya utmaningar, hotbilder, krav och uppgifter för Försvarmakten och vilka för- och nackdelar som kan förknippas med olika framtida energilösningar för Försvarmaktens egen verksamhet [44],
- samt en scenarioanalys av vilka säkerhets- och geopolitiska utmaningar ett föränderligt EU, i en föränderlig omvärld, kan tänkas stå inför på 15-20 års sikt givet en förändrad energisituation, och vad detta sammantaget kan betyda för Försvarmakten [31].

Resultaten inkluderar en diskussion av metoder för att kartlägga Försvarmaktens energianvändning [41], en metodik för hur energirelaterade omvärldsförändringar kan inkluderas i långsiktig försvarsplanering [42] samt en redovisning av ett urval metoder som kan stödja Försvarmakten i beslut som rör den framtida energiförsörjningen [45].

2.2.6 Studien Klimatneutral Försvarmakt

Senare forskning har studerat hur Försvarmaktens tre försvarsgrenar kan arbeta för att gå i takt med den civila utvecklingen mot ett bränslebyte. Arbetet drevs inom Försvarmaktens studie Klimatneutral Försvarmakt, där FOI stöttade med kunskap och metodstöd.

Studien landade i slutsatsen att det råder stor osäkerhet om vilka utvecklingsspår som kommer att bli framgångsrika i ett längre perspektiv och koncentrerade sig därför på åtgärder som kan tas fram till 2030. Den viktigaste utpekade området vara att, på olika sätt, arbeta mot ökad implementering av högkvalitativa biobränslen i befintliga system inom samtliga försvarsgrenar. Studien gör en omfattande analys av förutsättningar för och behov av energiomställning och innehåller bland annat en multikriterieanalys av olika bränslealternativ [46].

2.2.7 Logistik och försörjningskedjeanalyser inom energiområdet

Studier har även genomförts med logistik- och försörjningskedjeperspektiv på energiområdet. Det som har studerats är det svenska energiförsörjningssystemet, hur logistikteori kan tillämpas inom energiförsörjningsområdet och hur ett logistiskt synsätt på energiförsörjning kan bidra till lösningar i Försvarmaktens fortsatta arbete med energiomställning [47]. Även EU:s ekonomiska beroenden och sårbarheter gentemot Kina inom de strategiska sektorerna kritiska råvaror, halvledarindustrin, elbilsindustrin, samt energisektorn, har studerats [48].

3 Forsknings- och teknikutvecklingsläget, nationellt och internationellt

Kartläggningen av forsknings- och teknikutvecklingsläget, nationellt och internationellt, ger en generell bild över verksamhet inom energiförsörjningsområdet som delvis kopplar till FOI:s tidigare och pågående verksamhet. Den inkluderar även de aktörer som bedriver denna typ av verksamhet. Informationen är framtagen genom litteraturstudie men kommer även från möten med nationella och internationella aktörer.

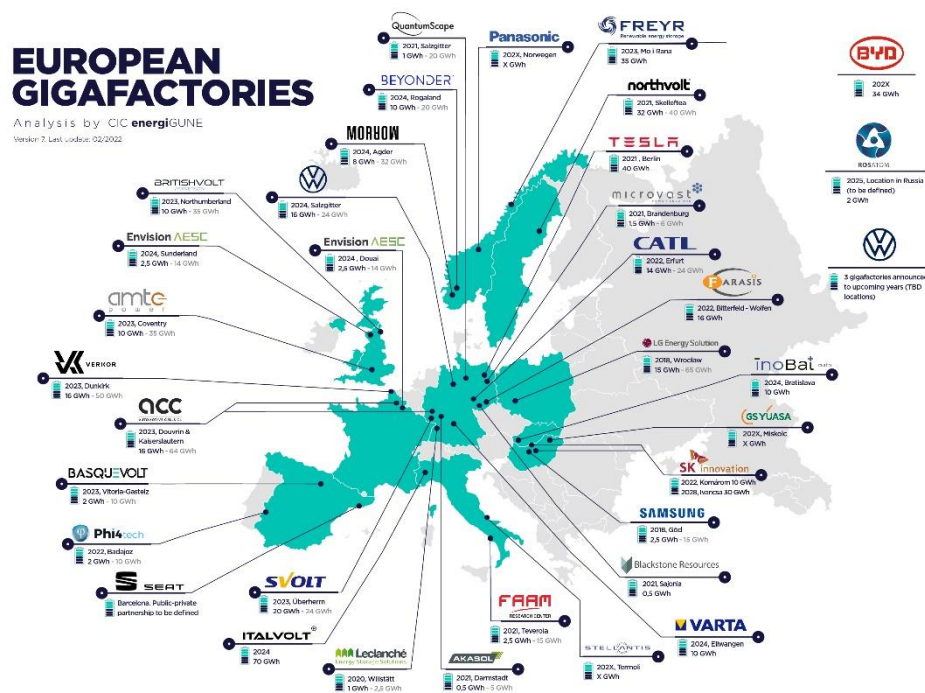
3.1 Tekniska lösningar och tillämpningar

Detta avsnitt ger en sammanställning av forsknings- och teknikutvecklingsläget med avseende på tekniska lösningar och tillämpningar för energiförsörjning.

3.1.1 Litium- och natriumbaserade batterier

I Sverige bedrivs akademisk batteriforskning främst men inte uteslutande på Uppsala universitet, Chalmers tekniska högskola, Kungliga tekniska högskolan och Lunds tekniska högskola. Omfånget är stort både vad gäller inriktning och TRL-nivå och generellt fokuseras det på grund- och tillämpad forskning, på material- och cellnivå, och mindre på teknikutveckling. Forskningsinstitutet RISE kommer in någonstans mitt i mellan och har bland annat tagit taktpinnen vad gäller standardiserad säkerhets- och brandprovning, där de till exempel byggt en testlabb som tar batteripack och hela bilar. Det är ett viktigt område som ofta blir bortprioriterat av de akademiska forskningsgrupperna då batterikemiinnovationer premieras av de högt ansedda journalerna.

Northvolt, Volvo, Scania samt ett antal mindre startupbolag jobbar främst med väletablerade batterikemier och cellformat där de istället fokuserar på utveckling för specifika tillämpningar. Här är TRL-nivån hög och kan innefatta hela värdekedjan från vaggan till graven. Särskilt beaktansvärt är Northvolts ambitioner eftersom detta aldrig gjorts tidigare i Sverige då kommersiella batterier historiskt sett producerats i och köps från Asien. Om arbetskraften och kompetensen finns samt om de framgångsrikt kan kanaliseras för att nå de ambitiösa målen återstår att se.



Figur 1. Europeiska batterifabriker.

Internationellt är den akademiska forskningen och industrin enorm och tillväxten fortsätter att öka, inte minst med politisk styrning då man satt upp mål om elektrifiering och omställning till en fossilfri energinfrastruktur – vilket kräver en mängd batterikapacitet. Europa har även ambitioner att bygga ut batterisektorn för att bli självförsörjande, och de många involverade aktörerna är stöttade av stimulanser från både från den privata och offentliga, se Figur 1 för en överblick av europeiska batterifabriker [49].

Natriumjonbatterier satsas på och utvecklas av företag så som det svenska Altris, samt Tiamat, CATL, Novasis Energies och Natron Energy.

Utmaningar och möjligheter för dessa batterier skiljer sig något. För väletablerade litiumjonbatterier är kostnaden och prestandan de största frågorna och där finns många vinklar för att utveckla dem vidare. Till exempel kan företaget Morrow Batteries ses nytänkande i den senare frågan där de vill implementera ett annat katodmaterial, Litium Nickel Manganoxid (LNMO), utan kobolt med högre elektrokemisk potential än de typiska NMC-varianterna vilket märkbart skulle öka cellspänningen och således energitätheten. Att hitta en elektrolyt som är stabil över ett sådant brett spänningsfönster är dock inte trivialt och i nuläget har de cellerna ofta sämre cyklingsstabilitet. Energitätheten går även att påverka genom elektrodernas kapacitet och redan idag blandas en viss andel kisel i grafit elektroden av många tillverkare. Att göra det i större proportioner eller att helt och hållet basera den positiva elektroden på kisel är koncept som drastiskt skulle öka energitätheten. Företag som Sila Nanotechnologies i USA sysslar med detta och där är utmaningen att klara av kiselns volymexpansion/kontraktion vid laddning/urladdning på ett reversibelt sätt.

Eftersom inte lika mycket arbete har lagts ner på natriumjonbatterierna finns i alla fall i teorin stora möjligheter till förbättring. En utmaning är att få dem att cykla i paritet med litiumjonbatterier och där är den icke-grafitiska kolanoden ofta en flaskhals. Dessa batterier skulle däremot i) vara ett stort framsteg för naturresursproblematiken, ii) de kan redan idag komplettera LFP-batterierna och iii) de anses generellt presterar bättre i högeffektstillämpningar.

3.1.2 Flödesbatterier

Forskning om flödesbatterier bedrivs nationellt, som exempelvis på KTH [50], [51], [52], [53], [54], med fokus på utveckling av membranmaterial och förbättring av flödesbatteriers effektivitet. Internationellt har intresset för teknologin ökat, särskilt i EU, USA och Asien. Inom ramen för Horizon Europe [55], genom initiativet BATT4EU, betraktas flödesbatterier som en strategisk teknik för att nå klimatneutralitet till 2050.

USA:s energidepartement har identifierat flödesbatterier som en kostnadseffektiv lösning för långsiktig energilagring [56], [57], och Kina har redan implementerat teknologin i storskaliga projekt [58]. För att minska beroendet av fossila bränslen och öka flexibiliteten i energiförsörjningen under militära operationer kan flödesbatterier vara en potentiell lösning. Detta beaktas även internationellt, där USAs försvarsdepartement har en strategi för att förbättra energiresiliens och effektivisera energiförsörjningen vid militära anläggningar, samtidigt som energiinnovationer som flödesbatteriteknologier främjas [59], [60]. Ett exempel på flödesbatterier inom militär tillämpning är den amerikanska armébasen Fort Carson i Colorado, där ett långvarigt energilagringssystem på 10 MW har installerats [61].

3.1.3 Superkondensatorer

Vid stora effektbehov som till exempel för särskilda högeffektstillämpningar som tyngre elektrifierade fordon eller rälskanon kan superkondensatorer lämpa sig bättre än batterier [62]. Här producerar till exempel Skeleton kommersiella produkter och det spanska forskningsinstitutet CICenergiGUNE skalar nu upp produktionen av sina s.k. litiumjonkondensatorer som är ett mellanting av litiumjonbatterier och superkondensatorer [63], [64]. De senare kan vara en bra kompromiss om tillämpningen kräver en relativt hög energi- och effektdensitet samtidigt.

3.1.4 Bränsleceller och elektrolysörer

Bränsleceller och elektrolysörer är centrala för hållbar energiproduktion, där vätgas spelar en nyckelroll. Sverige har gjort framsteg genom projekt finansierade av Energimyndigheten, som industriprojektet HYBRIT⁵ [65]. Vätgas används främst inom stålproduktion och transport, och antalet tankstationer för vätgasfordon förväntas öka fram till 2030 [66]. Teknikutvecklingen fokuserar på effektivare elektrolysörer och bränsleceller med mindre användning av sällsynta jordartsmetaller.

Sverige har potential att spela en ledande roll inom den globala vätgasekonomin, med stöd både från EU och nationella initiativ [67], [68]. EU satsar stort genom sin vätgasstrategi [67], med målet att bli ledande inom grön vätgas. Ledande länder internationellt inom vätgasteknik är Tyskland, Japan, Sydkorea och USA, där USA särskilt arbetar med att minska driftkostnader genom att sänka vätgaspriserna och skala upp teknologin [69], [70], [71].

Användningen av PFAS⁶ i bränsleceller och elektrolysörer innebär miljörisker [72], och forskning pågår för att hitta alternativa lösningar [73]. Vätgasteknik har även stor potential för militära tillämpningar. Internationellt undersöks hur dessa teknologier kan minska beroendet av fossila bränslen och öka den operativa flexibiliteten. NATO undersöker implementering av bränsleceller och vätgaslösningar för att minska energiförbrukning och utsläpp vid militära operationer [74]. Vätgasdrivna fordon och bränsleceller kan ge längre

⁵ Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology (HYBRIT)

⁶ Per- och polyfluorerade alkylsubstanter (PFAS)

räckvidd, tystare drift och utsläppsfri energi för militära transporter och fältoperationer, vilket förbättrar logistiken och minskar upptäckbarheten.

I Sverige utreds användning av bränsleceller för militära tillämpningar för att bidra till längre operationstider och ökad flexibilitet i fält. Teknologin är även relevant för driftsättning av system i avlägsna områden, såsom mikronät, där säker och hållbar energi är avgörande. Ett exempel är den amerikanska arméns klimatstrategi från 2022, som syftar till att implementera mikronät vid samtliga anläggningar fram till 2035, där vätgas kommer att spela en viktig roll som energibärare [75], [76].

3.1.5 Metallförbränning

Metallförbränning för utvinning av el är ett relativt nytt område. Nationellt är det främst FOI, Lunds Tekniska högskola och SAAB Kockums som har genomfört någon verksamhet inom området. Internationellt finns det flera universitet och högskolor som intresserat sig, bland annat McGill universitet i Kanada och Eindhoven Universitet i Nederländerna där Eindhoven Universitet utreder möjligheten att bygga om befintliga kolkraftverk till kraftverk som drivs av järnpulver istället. Eindhoven har stor erfarenhet experimentellt med förbränning av järn och har dessutom byggt ett 100kW kraftverk som drivs av järnpulver. Där finns även konsortium benämnt "Metalot", [77], där Eindhoven Universitet är en av grundarna, som fokuserar på metallförbränning, exempel på aktörer som är med i konsortiet är Uniper, Shell, RISE och GKN. Det är inte bara förbränningssteget som är relevant för konsortiet utan hela processen för hur metallen reduceras tillbaka till ren metall efter oxidationssteget.

3.1.6 Bränsle och förbränning

Inom detta område pågår omfattande tekniksprång, mer omfattande än på många år. Inom framdrivningsområdet representerar konceptet med roterande detonationsmotorer, RDE, något som med stor sannolikhet kommer nå betydande mognadsgrad de kommande fem till tio åren. Omfattande forskning på området sker i USA, Ryssland, Kina och Europa, och under 2023 och 2024 släpptes officiella filmer från både USA och Kina som bågge påstods visa långtgående fungerande motorprototyper.

Inom scramjet pågår fortfarande omfattande internationell forskning och med anfallskriget mot Ukraina och det stora antalet hypersoniska vapensystem som Ryssland sätter in kommer detta forskningsområde fortsätta öka i omfattning. Även här har det kommit dokumenterade fall på vad som påstås vara fungerande prototyper. Den stora utvecklingen som skett senaste fem åren inom detta område har handlat om ökad bränsleflexibilitet där man mer och mer rör sig bort från den explosiva och svårhanterliga vätgasen för att försöka få mer konventionella flytande bränslen att fungera i dessa motorer.

Utvecklingen inom gasturbiner fokuserar allt mer på bränsleflexibilitet. Inom den civila sidan har detta pågått en längre tid men även försvarsmakter tar mer höjd för detta, delvis på grund av ett beroende av det civila samhällets energisystem och bränsleinfrastruktur. Tydliga problem innan befintliga motorer kan godkännas för ökad bränsleflexibilitet ligger både inom olika länders juridik men även kring åldring och lagring av bränslen samt åldring av material som kommer i kontakt med dessa. Inom NATO STO AVT har gruppen *Sustainable Aviation Fuels in a Military Context* snabbt blivit en av de största grupperna inom AVT-området, och den grupp med flest deltagande länder vilket tydligt visar på frågans aktualitet internationellt. Det tyska flygforskningsinstitutet DLR bygger nu en större testanläggning för produktion av alternativa bränslen där insatsvarorna är vatten, förnyelsebar el och kol från valfri kolkälla, där CO₂-infångning är ett av alternativen. I Sverige har vi i kompetenscentrumet CESTAP fått insyn i arbete som görs hos finska NESTE och danska Topsoe.

3.1.7 Kärnkraft

På senaste tiden har det genomförts mycket forskning och utveckling av så kallade Små Modulära Reaktorer (SMR). Små reaktorer är ingen nyhet, däremot har det forskats mycket på hur kärnbränslet lagras, detta för att främst få ett säkrare system. På den militära sidan är det främst USA som arbetar med att ta fram en militär SMR, projektet heter PELE och planerar att ha en färdig demonstrator under 2026 [78]. Reaktorn förväntas vara paketerad i fyra 20 fots containrar.

På den civila sidan arbetar flera kärnkraftsaktörer med utveckling av SMR, bland annat utreder Vattenfall möjligheten med SMR vid Ringhals [79] men det planeras även uppbyggnation av SMR i Estland [80].

Länder som USA, Storbritannien, Kanada, Japan och Syd Korea har verksamhet idag som utvecklar deras egna konstruktioner för SMR. Kina och Ryssland har redan deras första reaktorer inkopplade till sina elnät 2021 och 2019 respektive. EU stödjer utvecklingen av SMR genom forsknings och träningsprogrammet *Eurotom Research and Training Programme* som löper 2021 till 2025 [81].

3.1.8 Markfordon

Inom markfordonsområdet pågår mycket aktivitet kopplat hybridisering av fordon. Även om det sannolikt att dieselbränsle, eller annat flytande bränsle, kommer vara den primära energibäraren för kommande generation av stridsfordon så medför hybridisering många möjligheter och fördelar, så som minskad bränsleförbrukning, bättre körbarhet och därmed framkomlighet, möjlighet till tyst framdrift, möjlighet till långvarig så kallad *silent watch* samt integration av elenergiförbrukare som exempelvis laservapen och mikrovågsvapen. Tillämpningen markfordon har sina specifika krav, exempelvis behöver systemen fungera i både varmt och kallt klimat vilket ställer krav på fordonet och dess ingående komponenter som exempelvis batterisystem.

3.1.9 Flygsystem

Inom flygsystem har både RDE och scramjetmotorer stor potential att i första hand användas i robotsystem och därigenom skapa nya supersoniska och hypersoniska vapensystem. Det är rimligt att anta att både USA och Kina inom en tioårsperiod kommer att ha dessa system redo i någon omfattning. RDE kan även användas av större flygsystem och ett koncept som kan bli aktuellt är att byta ut den traditionella brännkammaren i en gasturbin till en RDE och på så sätt markant öka effektiviteten. I dagsläget finns inte scramjetmotorer i annat än i prototypstadiet men mycket forskning pågår och om till exempel ett fungerande scramjetsystem skulle dyka upp har det potential att signifikant ändra spelplanen. Ett vapensystem med scramjetmotor, som i bästa fall går på traditionella bränslen, skulle kunna utgöra ett allvarligt hot och ett som eventuellt skulle vara mycket svårt att bekämpa. För rena gasturbiner styr bränsleflexibilitet mycket av utvecklingen, och kommer så fortsätta göra framöver. Här utvecklas nya bränslen och bränslekombinationer som i sin tur kan resultera i lägre signaturer men även bättre prestanda. Exempel på tidiga konceptstudier var de mellan Sverige med 39 Gripen, och USA med F-18, där man flög med 100% alternativa bränslen. I Sveriges fall var det bränslen från Swedish Biofuels medan (den ena motorn) i F/A-18 flög med det amerikanska bränslet CHCJ-5. Eftersom militära flygsystem har en längre livscykel än flyg inom den civila industrin kan nya bränslen och bränslekombinationer som tas fram för den civila sektorn inte alltid adapteras snabbt till den militära (exempel är motorn i Panavia Tornado eller motorerna till B-52). Äldre system inom det militära flyget är inte alltid kapabelt att snabbt anpassas till den senaste tekniken. Att bygga upp parallell infrastruktur för det militära flyget kan inte motiveras kostnadsmässigt, inte heller den produktionskedja som kan komma att bli nödvändig för att kunna flyga på samma bränslen som alltid. Därför måste den militära sidan försöka anpassa gasturbiner och systemen runtomkring till den civila sidans utvecklingsfront, något som är en stor fråga internationellt.

3.1.10 Mikronät

Nationellt har mikronät (eng. microgrids) och ödrift studerats av många aktörer, bland annat av Vattenfall genom ett mikronät placerat på Arholma. Där nyttjas solceller och batterilager som ger en uthållighet på 1-4 timmar vid bortfall av elnätet. Även i Ludvika finns det ett batterilager som för ödrift⁷. Men det finns många exempel som inte nämns här. Internationellt har FOI fört dialog med främst USA inom detta område, där har det framkommit att flera olika organisationer under USA's försvarsdepartement som har verksamhet inom ödrift och mikronät. Bland annat Naval Postgraduate School, Construction Engineering Research laboratory (CERL) inom US Army och Naval Facilities Engineering Systems Command, där sistnämnda dessutom satt upp ett Centre of Excellence inom mikronät. Inom US Army har man även tagit fram en standard för taktiska mikronät [82]. Även inom samarbetet ICE-PPR⁸ har mikronät identifierats som ett fokusområde där flera nationer har intressen och genomför egen forskning, utveckling och tillämpning inom sagt område.

3.2 Logistik

I detta avsnitt beskrivs tre olika vinklar från vilka energiförsörjning, logistik och säkerhet kan angripas eller har angripits, främst inom den vetenskapliga litteraturen. Den litteratur som refereras är inte allomfattande utan ett urval som exemplifierar de olika inriktningarna. De litteratursökningar som gjorts pekar dock på luckor i forskningsläget kring hur system för energiförsörjning kan utvärderas inom militära tillämpningar kopplat till logistiska förutsättningar.

3.2.1 Militära energisystem och den militära logistiken

Det finns många olika perspektiv på kopplingen mellan logistik och energiförsörjning. Dels det övergripande försörjningskedjeperspektivet, där globala försörjningskedjors sårbarheter är i fokus, men också det interna behovsperspektivet. Energiförsörjning utgör en betydande del av den militära logistiken, vilken har sin grund i äldre kunskap bland kända militärhistoriker. Försvarsmakten har exempelvis införlivat Kress teori om operationella logistiska egenskaper [83] i sin doktrin [84]. Hur ny energiteknik i militära tillämpningar påverkar och påverkas av den militära logistiken, kan därför tänkas vara ett självklart perspektiv vid utvärdering av nya energilösningar. Ändå tycks sådana utvärderingar och överväganden saknas inom den vetenskapliga litteraturen. Sökningar på vetenskapliga artiklar med kombinationen av termerna logistik, energi och försvar i databasen Scopus ger endast ett fåtal träffar på artiklar som beskriver energiteknik inom militära tillämpningar, exempelvis lokala elnät i ö-drift [85], portabla bränsleceller inom armén [86], [87] och synergier mellan kärnkraft (SMR) och vätgaslagring [88]. Dessa tekniker har stor påverkan på den militära logistiken, vilket i viss mån berörs i artiklarna, men samtliga har sitt huvudsakliga fokus på tekniken i fråga snarare än logistiken. Även elektrifiering av fordon och alternativa bränslen kan ha stor inverkan på operationella logistiska förutsättningar, vilket ibland omnämns inom teknikstudier, men sällan står i fokus för analys inom militära tillämpningar (exempelvis av Masrur [89], [90] som beskriver ett antal områden inom kraftelektronik och eldrift kopplat till den amerikanska arméns utveckling). En förklaring till detta kan vara att sådana analyser kräver kontextualisering av den specifika militära verksamheten, vilket sällan lämpar sig för vetenskaplig publicering. Inom civil sektor finns desto fler exempel på logistiska analyser kopplade till fossilfria energilösningar. Exempel på vanliga forskningsområden inom skärningen civil energiteknik och logistik är: biobränslelogistik, där de fysiska

⁷ denna information presenterades på Powerful Innovation days Energy Island Conference i Ludvika 17-18 oktober 2024.

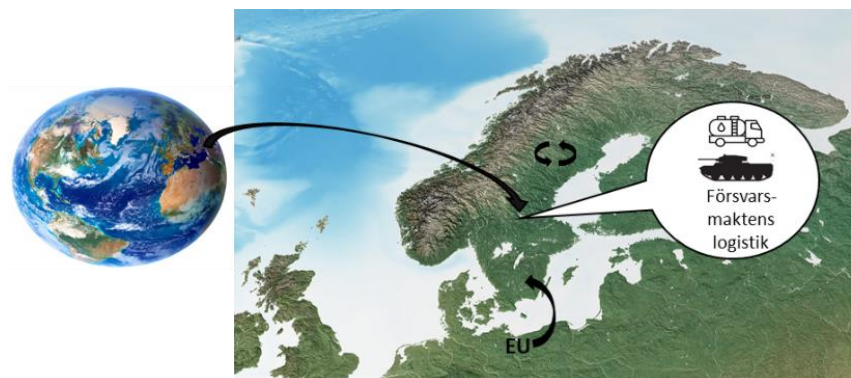
⁸ International Cooperative Engagement Program for Polar Research, ett multilateralt samarbete där Sverige, Norge, Finland, Danmark, USA, Kanada och Nya Zeeland ingår. Fokus är forskning och utveckling av militär förmåga och materiel i arktiska och subarktiska klimat.

råvaruflödena är i fokus, ofta genom och ett flertal processteg [91], [92], [93], [94], daglig distributionsplanering med elektrifierade fordon där förutsättningarna utreds [95], [96], [97], [98], [99], [100] och forskning med fokus på försörjningskedjor för grön vätgas [99], [100], [101], [102].

Det finns ett fåtal rapporter inom den militära sfären som tar upp logistikperspektivet i förhållande till energilösningar på ett relativt tydligt sätt. Den omfattande översikten inom militär energiteknik, Powering the US Army of the future [103], börjar sin redogörelse med att teckna en utförlig beskrivning av de logistiska förutsättningarna som aktuella tekniklösningar ska utvärderas mot. Även den norska översiktsrapporten, Nullutslippsförsvaret [104], för en logistisk analys kring huruvida fossilfria lösningar kan reducera det militära logistikbehovet. Man ser i huvudsak två spår: Att minska energiförbrukningen och att producera delar av energibehovet själv, nära förbrukaren. Liknande resonemang har förts inom FOI:s rapport Logistikperspektiv på Försvarsmaktens framtida energiförsörjning, [47].

3.2.2 Sårbarheter i försörjningskedjor

Vid analyser av energilösningar är det relevant att bedöma robustheten i försörjningskedjan i sin helhet. Det har betydelse om försörjning kan ske internt inom landet, inom den närmaste regionen, inom Europa, inom Nato eller från övriga världen. Fossila försörjningskedjor förlitar sig ofta på försörjning från länder med lågt index avseende demokrati och politisk stabilitet, samt på gränsöverskridande transporter via sådana länder. Den interna logistiken inom Försvarsmakten och de möjligheter som där ges utgör ett ytterligare perspektiv, men med starka beroenden till de nationella och internationella försörjningskedjorna, Figur 2.



Figur 2. Försvarsmaktens interna logistik bygger på globala, regionala och lokala försörjningskedjor, med olika grad av sårbarheter.

Inom den publicerade forskningen (liksom i media) har känsliga sårbarheter i försörjningskedjor uppmärksammats de senaste åren, i synnerhet gällande komponenter och material som är väsentliga för Europas gröna omställning. Exempelvis har kritiska beroenden inom batterier [105], [106], [107], [108] halvledare [109], [110], [111], [112] och sällsynta jordartsmetaller [113], [114], [115], [116], [117] uppmärksammats.

3.2.3 Drivmedelsförsörjning inom insatsverksamhet

Det har skrivits många rapporter om de logistiska problem som energiförsörjning till militärbaser utgjort under krigen i Afghanistan och Irak. Ett stort antal stupade soldater och underentreprenörer i dessa bränslekolonner har varit en betydande drivkraft för den amerikanska armén att påbörja arbetet med energieffektivisering och att se över sin energiförsörjning till militärbaser [118], [119], [120], [121]. Den ekonomiska kostnaden

för diesel som transporterats över långa avstånd till svårtillgängliga platser är också i sig en drivkraft. Ett stort antal tekniska utvecklingsprojekt inom energiförsörjning till militärbaser har sedan dess initierats. Även om Försvarsmakten har en annan inriktning kan lärdomar dras, både från det tekniska utvecklingsarbetet som följt och från insikterna om vikten av att minimera behovet av energi som inte kan föras lokalt. Även inom det svenska försvaret kommer det att krävas transporter av drivmedel och annan energiförsörjning, inte minst kopplat till uppgiften värdlandsstöd.

3.3 Militär energisäkerhet och beroenden till civila försörjningskedjor

Energisäkerhet är ett brett område som det i många avseenden bedrivits mycket forskning inom. Tidigare forskning inom ämnet tar upp att hot mot energisystem kan vara en del i att generera eller förstärka osäkerhet i hela samhället. Säkerhetsfrågor som är relaterade till energisystem kan kopplas till många aspekter såsom försörjningstrygghet och en stabil efterfrågan. Dessa frågor kan delas upp i ekonomiska, politiska, tekniska och miljömässiga risker och målsättningar. Skiljelinjen mellan dessa målsättningar är inte alltid tydlig och många potentiella hotbilder finns mot flera av dessa målsättningar. Sammantaget är energisäkerhet en angelägenhet för hela totalförsvaret och därmed ett lands motståndskraft [122]. Området är dessutom sammanlänkat med den energiomställning som präglar världen, vilket tillför nya dimensioner.

Vid sökningar för att undersöka sambandet mellan energisektorn och försvarsmaktens behov framkom det att området är relativt utforskat inom den akademiska litteraturen. De artiklar som identifierats har viss relevans för de forskningsområden som är av intresse och kommer att presenteras nedan. Samtidigt kan det konstateras att det krävs ytterligare forskning för att bättre förstå beroendeförhållandet mellan den civila energisektorn och försvarsmaktens specifika behov.

Sökningarna har gjorts på sökmotorn Scopus där ett antal olika sökslingor har använts. De ord som använts i olika kombinationer är: Energy, Security, Defence, Supply, Vulnerabilities, Dependencies, Contingency, Planning, Military, Civil, Fuel, National, och Future. Vid sökningar med endast ord som "Energy" AND "Security" framkom en stor mängd resultat (89,310 träffar). Vid sökningar där ord som "Defence" AND/OR "Dependencies" adderades sjönk träffarna avsevärt (5 träffar). Vid sökningar med flera specifika ord framkom samma artiklar i sökningarna vilket tyder på att sökområdet är uttömt.

Energisäkerhet blir ett mer och mer omdiskuterat begrepp, speciellt efter Rysslands anfallskrig mot Ukraina då Ryssland ständigt attackerar avgörande Ukrainisk energiinfrastruktur [25]. Detta belyser betydelsen av avgörande energiinfrastruktur inte bara för civilsamhället utan även för försvarsverksamhet. Trots detta tyder resultatet från våra sökningar på att energisäkerhet för det militära försvaret och det militära försvarets roll inom energisäkerhet är ett relativt utforskat område, åtminstone inom akademisk öppen forskning.

3.3.1 Akademisk forskning

Amerikanska National Association of Regulatory Utility Commissioners (NARUC) har identifierat att 98 procent av militära energiinstallationer i USA är beroende av civilsamhällets elnät. Författarna föreslår att möjligheten för Amerikanska myndigheter att samordna sig med Försvarsmakten är stor för att skapa högre resiliens i ett nu sårbart system [123]. Vidare återfinns en artikel skriven av Hans Liwång som påvisar att den civila energiinfrastrukturen är mycket viktig för det svenska nationella försvaret. Trots detta är näten oftast inte utformade med försvarets behov i åtanke. Beroendet till civil infrastruktur kan skapa en försämrad motståndskraft i energisystemen både under fredstid och krissituationer. Inom denna studie beskrivs tre scenarier för energikutvecklingen:

Lokala förnybara energikällor (sol, vind, biokraft), förbättrad motståndskraft i högspänningsnätet samt utbyggnad av kärnkraft och vattenkraft. Liwång betonar vikten av att diversifiera energikällorna för att minska sårbarheterna och konstaterar att energisystemens motståndskraft är avgörande för det nationella försvaret under långsiktiga kriser [124].

Då många försvarsfordon drivs av fossila bränslen som många länder tvingas importera blir då beroendet till sköra leverantörskedjor och långtgående logistik allt mer påtagligt. I en artikel i litteraturkartläggningen återfinns data kring hur den Amerikanska försvarsmaktens energiförbrukning ökat över tid. Artikeln presenterar tre målsättningar för att kringgå den ökade energiförbrukningen. Inledningsvis handlar det om att kunna monitorera energiförbrukningen, därefter bör energikällorna diversifieras för att undvika beroendet till vissa länder såväl som specifika varor. Avslutningsvis beskrivs det även att alternativen till fossilfri energi måste vara kostnadseffektiv och ha samma kapacitet som nuvarande energikällor [125].

3.3.2 Övrig litteratur

Då all relevant forskning inom området troligtvis inte bedrivs eller presenteras som akademisk forskning sökte vi även på publikationer från NATO. NATO Energy center of excellence identifierar i en rapport energisäkerhet som en avgörande del i ett framgångsrikt försvar. Rapporten beskriver hur NATOs försvarsmakter är beroende av energi i näst intill samtliga av sina verksamhetsområden såsom uppvärmning, kylning och belysning på baserna, samt för transporter. Vidare beskriver författarna att reduktionen av fossila bränslen kan förbättra den operativa flexibiliteten, effektiviteten och ändamålsenligheten. Dessa förmågor hindras av växande bränslebehov. För att uppnå ett reducerat beroende till fossila bränslen avslutas rapporten med att förespråka ett tätt samarbete mellan militären, vetenskapen och tekniken samt den privata industrin, då alla sektorer behöver varandra för att uppnå ett effektivare och säkrare operativt arbete [126].

Sammantaget är beroendet mellan det civila samhället och Försvarsmaktens potentiella behov under kris eller krig inte tillräckligt utrett. Litteraturen som är presenterad påvisar vissa brister, men sannolikt är långt ifrån alla brister identifierade eller definierade. Frågan mynnar ut i hur Sverige kan säkerställa en kontinuerlig, robust och kostnadseffektiv energiförsörjning till Försvarsmakten samt resten av samhället under kris och krig, samt hur försvarsmakten följer civilsamhället i utvecklingen och omställningen till grönare energi.

4 Kartläggning av metoder för framtagning av prognoser för Försvarmaktens framtida energibehov

I uppdraget för förstudien ingick att ge förslag på metoder för framtagning av prognoser och scenarion för framtida energibehov inom det militära försvaret. Arbetsgruppen har därför kartlagt vilka metoder som tidigare används i FOI:s verksamhet för framtagning av prognoser och scenarier inom andra FoT-områden, men även inom övrig verksamhet vid FOI. Det gjordes genom en förfrågan till samtliga forskningsområdesföreträdare där uppdraget beskrevs och de ombads komma med inspel. De metoder som återfanns bland svaren beskrivs nedan.

På grund av förstudiens begränsade omfattning gjordes avgränsningen att endast inkludera metoder som FOI har tidigare erfarenhet av. Det är därför möjligt att det finns fler lämpliga metoder för denna typ av prognostisering inom annan forskning. De identifierade metoderna erbjuder systematiska arbetssätt för att göra bedömningar baserat på expertkunskap och tillgänglig forskning. Metoderna bör utredas vidare inom det fortsatta arbetet.

4.1 Metodbeskrivningar

Scenarioanalys är en scenariobaserad metodik som utgår ifrån en risk och förmågebedömning utifrån det presenterade scenariot. Inledningsvis definieras och förtydligas hotbilden så den är relevant för deltagande aktörer. Därefter genereras scenariostenar för att formulera en fokusfråga samt vilka aspekter och faktorer som ska prioriteras samt vilka utfall dessa har. Vidare utvecklas de faktiska scenarierna. Detta kan innebära att utveckla typfall. Avslutningsvis bör scenarierna kvalitetssäkras utifrån externa synpunkter.

Fördelen med scenarioanalys är att den är anpassningsbar och föränderlig. Metoden kan även vara fördelaktig när det kommer till att identifiera nya miljöer som kan utnyttjas under framtida förhållanden, vilket bedöms som en fördel. Mer detaljerade tillvägagångssätt för att utveckla rimliga och trovärdiga framtidsscenarion måste identifieras för att säkerställa användbarheten i metodiken.

DTAG (Disruptive Technology Assessment Games) är en spelmetod som först utvecklades av NATO under perioden 2006-2011. Metodens syfte är att undersöka hur ny teknologi påverkar militära koncept och militär planering. DTAG-spel är tvåsidiga scenariobaserade spel med två grupper som tar fram sina planer oberoende från varandra. Ett antal typsituationer spelas, där vare typsituation genomförs i två steg, ett steg utan och ett steg med framåtblickande spelkort. Efter varje steg genomförs en konfrontation där de två gruppernas planer ställs mot varandra. Efter den första konfrontationen får båda sidor tillgång till ett antal konfronterande systemspelkort att värdera för att sedan använda utvalda. Grupperna måste sedan presentera varför och hur det påverkar planeringen och sättet de ska uppnå uppdragets mål. Syftet är att identifiera skillnaderna i planeringen i de två planeringsstegen och därmed kunna bedöma systemspelkortens påverkan [127].

Metoden bedöms vara användbar för att utforma riskbedömningar och konsekvensanalyser på system vid införandet av ny teknik. Vidare kan detta skapa en bättre förståelse för planeringsarbetet kring hotbilder och därmed kunna bidra till att lättare identifiera lämpliga åtgärder och strategier för beslutsfattare. Sammantaget bör utförandet av spelmetoden studeras vidare för att kunna fastställa dess användbarhet i specifika sammanhang.

MUAFT (Military Utility Assessment Method for Future Technologies) är en metod för att bedöma den militära nyttan av framtida tekniker och teknologier. Metoden är utvecklad av Försvarshögskolan och har inspirerats av DTAG. Syftet med metoden är att göra bedömningar av konsekvenser för den specifika militära förmåga av intresse, som en del i helheten, och utföra dessa bedömningar kostnadseffektivt. Den utvecklades för att användas som en del av Försvarsmaktens långsiktiga förmågeutvecklingsprocess [128].

Metoden bedöms inte i sin exakta utformning kunna användas för framtagning av prognoser och scenarier för framtida energibehov inom det militära försvaret. Däremot kan metodens olika processteg utgöra, eller inspirera till utformning av, olika steg i en metod för det ändamål som avses här.

FATE (Futures Assessed alongside socio-Technical Evolutions) är en metod utvecklad av Nato med syftet att förstå och analysera socio-tekniska system (STS) och deras potentiella utveckling i framtiden samtidigt som man bedömer effekterna på försvar och säkerhet. Metoden är ett sätt att analysera en fråga som ställts om en teknologi eller en social fråga, med hjälp av en systembaserad analys. Frågan tolkas i form av ett sociotekniskt system (STS) och analyseras i relation till olika framtidsscenarier. Därigenom kan tekniker och/eller socioekonomiska frågor analyseras som en STS i termer av både vad som är känt idag och med en extrapolering in i framtiden. Den består av fyra steg: 1) Definiera eller skapa din STS. 2) Redan existerande eller utvecklade scenarier bryts ner i komponenter utifrån givna dimensioner (Technological, Economical, Military, Political, Legal, Environmental and Social, TEMPLES). 3) Analysera interaktionen mellan STS och scenariokomponenterna. 4) Bestäm/bedöm effekten av utvecklingen av din STS [129].

Metoden bedöms som intressant då både energisystem och Försvarsmakten i sig kan betraktas som sociotekniska system. Den bedöms vara användbar för att utföra konsekvensanalyser av olika utvecklingar, men mindre användbar för att ta fram prognoser och scenarier då den utgår från redan existerande scenarier.

Morfologisk analys är en metod för att tydliggöra komplexa relationer inom, och utöka förståelsen av, problem med många olika interagerande faktorer, vilka ofta kallas vildvuxna problem eller wicked problems. Den tillåter utforskandet av ett stort antal möjliga utfall av en fokusfråga. Morfologi betyder ordagrant att studera form eller struktur. Metoden bygger på att nyttja expertkompetens inom olika områden för att tillsammans öka förståelsen för de komplexa problemen i frågan. Detta sker genom cykler av analys och syntes. Problemet bryts ner i olika dimensioner och tillstånd definieras inom varje dimension [130].

Metoden har använts av FOI i olika sammanhang, exempelvis för att utvärdera energilösningar för soldatsystem [131]. Ibland har den dock upplevts som allt för tidskrävande, varför FOI tagit fram en förenklad variant där en av utgångspunkterna är att frågeställningen i är tydliggjord i förväg och inte en del av analysen [132].

Metoden bedöms vara intressant för att skapa scenarion för framtida energisystem eftersom nya tekniker innefattar stora osäkerheter, och det framtida utfallsrummet är mycket stort.

Avskanning (Horizon scanning) och Foresight. Avskanning syftar till att upptäcka signaler och tidiga tecken på viktig utveckling och förändringar som är relevanta för en intressent eller organisation. Tidsperspektivet är ofta långsiktigt. Det är en metod som ger resultat för Foresight. Foresight är en vetenskapligt baserad metodik som tillhandahåller och använder information om potentiella framtida utvecklingar (så kallade futures). FN:s utvecklingsprogram, UNDP, (2018) har föreslagit att Foresight är prospektiv, policyrelaterad och deltagande. Metoden syftar inte till att förutsäga, utan ger ett strukturerat, systematiskt och inkluderande arbetssätt som syftar till att stärka intressenter i dagens beslut av betydelse för framtiden. Den stödjer organisationers förståelse för vad som kan ligga i framtiden, vad man ska förbereda sig eller vidta åtgärder för [133].

FOI har utvecklat en användbarhetsfokuserad process för att förbättra användningen av avskanningsresultat. Processen är ämnad att användas av svenska försvarsorganisationer, både inom en organisation och i samarbeten mellan organisationer [133].

Denna metod ger ett brett intag av information från internationell forskning, vilket är en styrka och gör metoden intressant för vidare analyser.

4.2 Slutsatser/vägen framåt

Att bedöma framtida energibehov av olika typer, inom olika försvarsgrenar, och i olika tidsperspektiv, kan utan tvekan anses vara ett komplext problem beroende av olika interagerande faktorer. Exempelvis påverkas utvecklingen av politik, teknisk utveckling, försvarsgrensutveckling och internationell samverkan. Skillnaden mellan behoven inom den fredstida verksamheten och behoven inom olika typer av krigsscenarier utgör ytterligare en dimension.

Det är viktigt att betänka att energiområdet på många sätt är tvärvetenskapligt och att det troligen krävs en mycket bred uppsättning av kompetenser för att fånga relevanta perspektiv. En risk vid användande av metoder baserade på expertkunskap, exempelvis morfologisk analys, är att man inte lyckas inkludera personer med all den kompetens som är väsentlig för uppgiften.

Då ingen av de identifierade metoderna är direkt utformad för att göra prognoser går det inte i nuläget att peka på en given metod för detta. Däremot kan flera av metoderna och speciellt morfologisk analys vara en aktuell metod för att arbeta med att skapa scenarier för Försvarsmaktens framtida verksamhet, och även för att göra förutsägelser om vilka energitekniklösningar Försvarsmakten kan komma att välja i framtiden. Det kan antas att en kombination av kvalitativa och kvantitativa inslag kommer att krävas.

Arbetet framåt bör innehålla både vidare inläsning på här identifierade metoder och en bredare inhämtning av möjliga angreppssätt. En djupare dialog med uppdragsgivaren/Försvarsmakten kommer också krävas för att förtydliga omfattning, grad av detaljering och exakthet i de efterfrågade prognoserna. Efter ett sådant förarbete kan ett förslag på metod konstrueras. Metoden kommer troligtvis innehålla/kräva:

- en kartläggning av Försvarsmaktens olika verksamheter och därtill kopplade system och anläggningar, och nuvarande energiförbrukning, som kan baseras på [41],
- en prognos om Försvarsmaktens kommande utveckling av olika verksamheter. Den kan baseras på den utveckling som beskrivs i exempelvis Totalförsvarsproposition, budget och Försvarsmaktens egna prognoser som Strategisk Inriktning och Perspektivstudie.
- antaganden kring energiteknikutveckling, övrig samhällsutveckling (energiomställning i samhället) och vilka framtida energitekniklösningar Försvarsmakten kan komma att välja,
- en analys av vilken påverkan de framtida valen av energiteknik får på energibehoven,
- dimensionerande scenarier för krig, med hänsyn tagen till övriga punkter. Eventuellt kan krigsspel användas i bedömningen av energibehov. Det kan också finnas goda möjligheter till samverkan inom Nato avseende metoder för att beräkna energibehov i krig.
- en synsats för att ta fram prognoser för framtida energibehov. Sannolikt kommer det vara lämpligt med flera olika prognoser för olika scenarier för Försvarsmaktens framtida utveckling och inriktning.

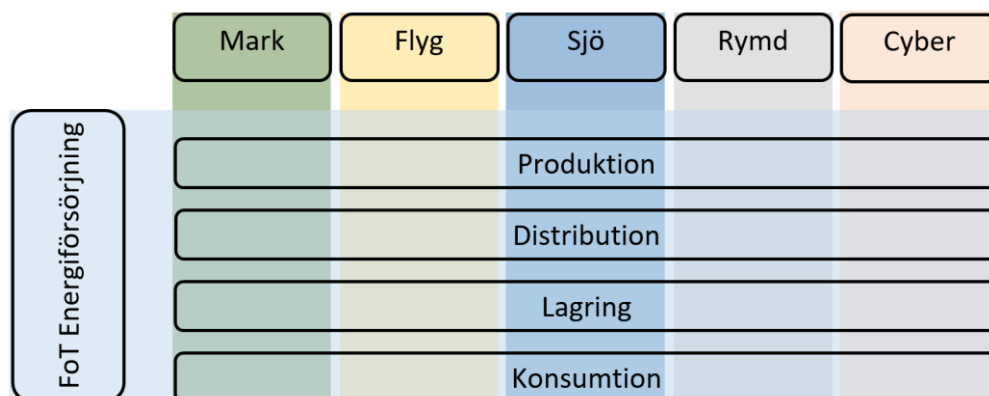
5 Kunskapsuppbyggnad och avgränsningar

Med den omfattande forskningen och teknikutvecklingen inom området är det till stor fördel att Försvarsmakten startar ett nytt FoT-område Energiförsörjning. Detta kapitel beskriver hur det nya området kan utformas och vad som bör ingå under forskning- respektive teknikutvecklingdelen samt hur det bör komplettera andra FoT-områden.

Generellt bedriver FOI verksamhet på en lägre TRL⁹-nivå jämfört med FMV men verksamheterna har ett visst överlapp. TRL skalan är dock inte tillämplig för alla delar av verksamheten. Enligt *Inriktning av Försvarsmaktens forskning och utveckling 2025* (IFoU25) [134] skall den teknikorienterade FoT-verksamheten omfatta de lägre TRL-nivåerna, upp till TRL 6 medan TRL 6-9 tas ur anslagspost 1:3. Det är viktigt att poängtera att forskning på TRL 1 är allt för grundläggande för att bedrivas inom tillämpad forskning som FoT.

FoT Energiförsörjning bör ta ett helhetsgrepp om energiförsörjning för att kunna utgöra basplatta för området. Verksamheten bör initialt komplettera befintlig energirelaterad verksamhet inom andra FoT-områden. FoT-området bör ges en sammanhållande roll för forskning och utveckling inom FOI respektive FMV och FortV avseende energiförsörjning. Tillämpningsspecifika frågeställningar kan hanteras inom andra lämpliga FoT områden alternativt inom demonstratorprogram eller externa beställningar till FOI, FMV eller FortV. I dessa fall ska FoT Energiförsörjning samverka med verksamheten för att maximera nyttiggörandet av tillgängliga resurser.

Figur 3 visar en schematisk översikt hur FoT Energiförsörjning är genomskärande över alla Försvarsmaktens domäner. FoT-området hanterar frågeställningar kopplat till produktion, distribution, lagring och konsumtion av energi. Inom alla domäner är man beroende av energi och det finns ett stort antal frågeställningar, tillämpningar och lösningar för hur denna energi produceras, distribueras, lagras och konsumeras.



Figur 3. Konceptuell översiktsbild av hur FoT energiförsörjning relaterar till Försvarsmaktens domäner.

Forskningsdelen av FoT Energiförsörjning, som främst berör FOI, ska ha tydligt forskningsfokus, främst inom områdena teknik, civil och militär sårbarhet samt logistik. Inom teknikområdet bör fokus ligga på metodutveckling för provning och utvärdering av nya energisystem, metoder som annan verksamhet kan nyttja mot mer specifika tillämpningar. På så sätt skapas kompetens för hur man på bästa sätt kan värdera och jämföra olika system mot varandra. Avseende forskning som berör strategiska tekniska

⁹ Technology Readiness Level – en niogradig skala som beskriver en tekniks mognadsgrad.

vägval handlar det om att direkt ta reda på var de tekniska begränsningarna finns utifrån ett försvarsperspektiv. För civil och militär sårbarhet samt logistik handlar arbetet till stor del om att bygga upp en kunskapsbas där försvarsperspektivet länkas samman med forskning från den civila sfären. Som framgår av kartläggningen, kapitel 3, finns mycket akademisk kunskap inom logistik, energisystem och sårbarheter. Sannolikt finns också metoder och modeller som kan anpassas för att appliceras på frågeställningar som rör utvecklingen av försvarsmaktens energiförsörjning. Ett övergripande syfte inom detta forskningsområde är att bidra till robusthet, tillgänglighet och flexibilitet, samt att där så är lämpligt, samverka med det civila försvaret för att skapa dessa förmågor.

Teknikutvecklingsspåret inom FoT Energiförsörjning, den del som främst berör FMV, bör fokusera på tekniska koncept för militära tillämpningar. Exempel på frågorna som bör hanteras är robusthet, försörjningstrygghet, systemsäkerhet och prestanda. En annan viktig frågeställning är hur olika energilösningar påverkar systemets användning och de behov, till exempel underhåll och kompetens, som kommer med de nya tekniklösningarna.

Kompetensutveckling och kunskapsinhämtning inom FoT Energiförsörjning är en viktig del och utrymme bör ges för att bedriva samarbeten mot akademien och samverka med relevanta samarbetspartners på statlig och privat, nationell och internationell nivå. Då en mycket stor del av forskningen och teknikutveckling inom energiförsörjning sker av civila aktörer är det viktigt att nyttiggöra den forskning som sker där genom förståelse och tolkning av resultaten mot militära tillämpningar. En framtida nära kontakt med akademien i Sverige ger möjligheter att påverka forskning som bedrivs för att göra resultaten enklare att omsätta till militära tillämpningar. Forskning och teknikutveckling som omsätts till integritetskritisk information behöver hanteras av aktörer såsom FOI och kan ej öppet publiceras.

Vetenskaplig publicering inom FoT-området är en del av kvalitetssäkringen som bör eftersträvas.

Sverige är inte den enda nationen som står inför utmaningar när det gäller energiförsörjning för militära tillämpningar. Det pågår forskning och utveckling inom organisationer som NATO och EU där medlemsnationerna har möjlighet att delta i olika grupper för att ta del av information och samverka med andra nationer. Där finns flertalet grupper som berör energiförsörjningsområdet som kan ge värdefull kunskap, bland annat inom NATO-STO¹⁰ eller NATO CoE¹¹. Ett annat exempel på internationell samverkan är avtalet ICE-PPR, där Sverige är representerat. En starkare nordisk samverkan är betydelsefull på grund av geografisk närhet och liknande klimatförutsättningar.

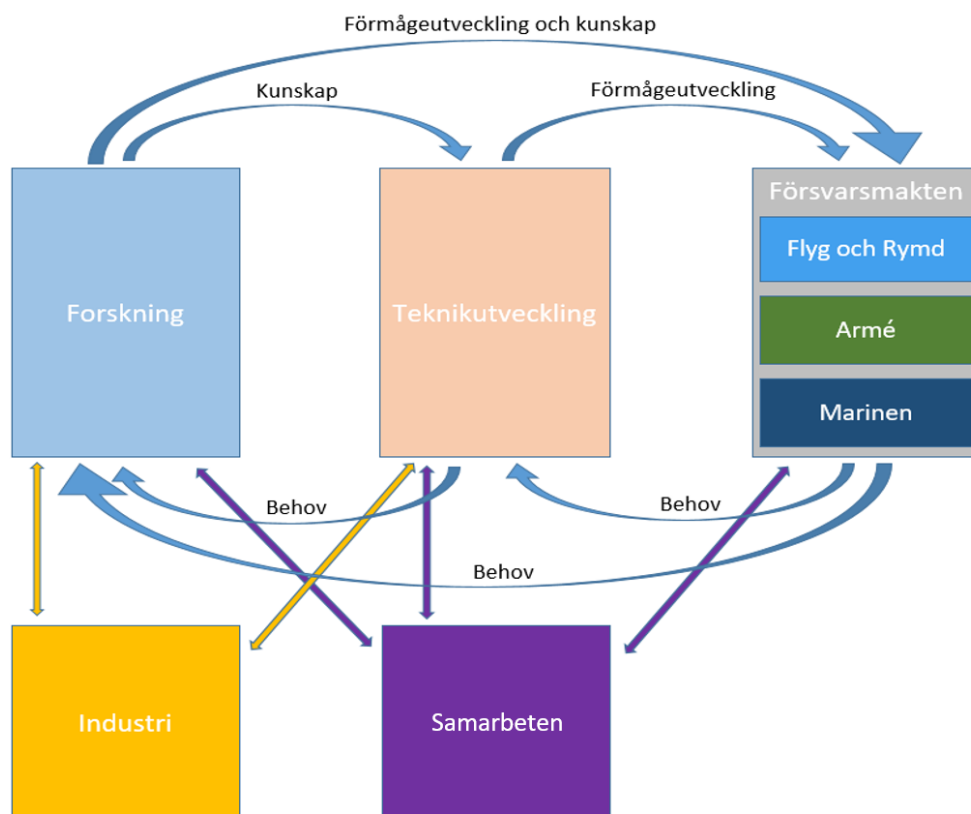
¹⁰ NATO Science and Technology Organization

¹¹ NATO Center of Excellence

6 Konkrete förslag på kunskapsuppbyggande verksamhet

FOI ämnar bedriva forskning inom området Energiförsörjning och har i samråd med Försvarsmakten, FMV och FortV tagit fram förslag på verksamhet för FoT Energiförsörjning. Verksamhetsområdena som tas upp nedan är både inriktade mot forskning (F) och teknikutveckling (T), och ger rekommendationer för både FOI och FMV. Generellt för FoT Energiförsörjning kan verksamhet som huvudsakligen bedriver forskning bedrivas av FOI, medan verksamhet som huvudsakligen handlar om tillämpningar bedrivs av FMV och FortV. Skärningen däremellan är dock inte knivskarp och inte enkel att avgöra på förhand, vilket gör att kontinuerlig samverkan mellan de olika utförarna är viktig. Dialog behöver föras om innehåll i olika uppdrag och hur arbetet ska fördelas. Då området rör sig snabbt framåt kan det även dyka upp ny verksamhet som är av intresse för Försvarsmakten som inte tagits upp i denna rapport.

Hur området bör arbeta är med informationsspridning och behovsinhämtning genom ett nära samarbete mellan försvarsmyndigheterna, hos Försvarsmakten är det även viktigt att ha bra nätverk ut i de olika vapengrenarna för att fånga upp alla domäner och därmed kunna nyttja synergier. Figur 4 visar schematiskt hur informationsflödet mellan forskningen, teknikutvecklingen, Försvarsmakten, industrin och olika samarbeten kan se ut.



Figur 4. Schematisk skiss över informationsflöden för FoT Energiförsörjning

Det pågår mycket forskning och utveckling i det civila samhället. För att ta vara på detta på bästa sätt behöver det ske kontinuerlig omvärldsbevakning och samverkan med andra aktörer, nationella som internationella.

Inledningsvis redovisas övergripande aspekter som genomsyrar hela Försvarmaktens verksamhet (6.1). Därefter presenteras förslag på verksamhet inom olika tekniska områden (6.2). Verksamhet kring beroenden till civila försörjningskedjor presenteras ingående under avsnitt 6.3. Därefter presenteras ett förslag om arbete med en nationell strategi för det militära försvarets energiförsörjning i avsnitt 6.4. Slutligen redovisas förslag för fortsatt arbete med metodstöd för framtagning av prognoser för Försvarmaktens framtida energibehov i avsnitt 6.5.

6.1 Övergripande aspekter

Det finns några övergripande aspekter som berör alla olika teknikområden och energiförsörjning som helhet. Dessa är 1) Sveriges särskilda klimatförutsättningar. Det kalla klimatet i Sverige, och särskilt låga temperaturer vintertid, ställer särskilda krav på energisystem. Många energilösningar är inte framtagna för att fungera i kallt klimat varför denna aspekt behöver tas med i samtliga verksamhetsområden. 2) Robusthet och tillgänglighet. Oavsett val av teknisk lösning måste den resulterande energiförsörjningen vara robust, och tillgängligheten för bränsle, drivmedel, utrustning, komponenter och reservdelar måste säkras för att Försvarmakten ska kunna utföra sin uppgift. 3) Energieffektivitet. Med flera nya elektriska system kommer det generella energibehovet att öka, men med ett ökat behov finns där också ett ansvar att säkerställa att energin nyttjas på ett effektivt sätt. För isolerade system eller anläggningar innebär det att de kan verka under längre tid medan i andra fall kan det innebära ekonomiska och klimatsmarta fördelar.

Då Sverige har olika klimatområden och geografiska förutsättningar i form av kallt väder och långa avstånd ställs stora krav kopplat till robusthet och tillgänglighet. Inom de flesta teknikområden finns flera aspekter rörande beroenden till civila försörjningskedjor och sårbarheter i dessa. Baserat på dessa sårbarheter samt de förutsättningar som presenteras bör det läggas stor vikt i att utveckla Försvarmaktens energieffektivisering för att skapa förutsättningar att kunna verka i hela landet under alla årstider. Verksamheten inom FoT Energiförsörjning behöver genomsyras av ett helhetsperspektiv, där de övergripande aspekterna och de som rör beroenden och sårbarheter måste beaktas för alla olika energilösningar. Liksom detaljerad kunskap om specifika energilösningar behövs för att kunna göra en aggregerad analys av robusthet och försörjningstrygghet inom Försvarmaktens energiförsörjning som helhet.

De olika förslagen på verksamheter som presenteras här ska därför inte ses som verksamhet i stuprör, utan det är viktigt att den samlade verksamheten hänger ihop, och att olika delar korsbefruktar varandra. Viss verksamhet kan också ta det övergripande perspektivet för att kunna ge en bild av helheten, och för att kunna staka ut en övergripande inriktning för Försvarmaktens energiförsörjning.

Listan nedan med verksamhetsområden är inte prioriterade på något sätt och kräver en fördjupad dialog innan beslut tas för framtida verksamheter.

6.2 Tekniska områden

Batterier

Nya batteritekniker utvecklas med en hastig takt där det gäller att följa med utvecklingen. Batterier är en teknik som används brett över hela Försvarmakten där kärnkompetensen kan samlas under FoT Energiförsörjning. Forskningsfrågor inom området spänner även här brett över många forskningsområden, som exempel kan verksamhet bedrivas inom teknikområdet med fokus på metodframtagning för provning av batterier, där kan metoderna och provningen vara en del av utvecklingen och ge svar gällande säkerhet, prestanda, åldringsmekanismer med mera för batterier. Ett annat forskningsområde kan vara logistik både kopplat till tillgängligheten av batterierna och försörjningskedjan men även hur det påverkar logistiken vid nyttjande av systemet. Förslag på verksamhet:

- Framtagning av metoder för utvärdering
 - Säkerhet avseende på lagring, transport och hantering
 - Åldringsmekanismer
 - Prestanda
- Modellering och simulering av batterier
 - Utredning av vilken indata som behövs för att skapa relevanta modeller
- Logistiska studier (tillverkning, tillgänglighet, försörjningskedjor osv)
- Civil och militär sårbarhet
- Omvärldsbevakning och validering

Alternativa bränslen

Flytande energitäta bränslen är något Försvarsmakten, med sina många specifika behov, kommer ha svårt att klara sig utan. Det finns däremot nya typer av bränslen som på sikt kommer att kunna ersätta de fossila bränslena och samtidigt uppfylla användarens krav. Biobränslen och elektrobränslen är bränslen som kan nyttjas brett inom Försvarsmakten och är områden som även civila aktörer driver på utvecklingen framåt. Forskningsfrågor som kan hanteras inom bränsleområdet spannar även här brett och kan vara fokuserade på logistik kopplat till produktion och distribution av bränslena men även tekniska frågeställningar kopplat till produktion, lagring och konsumtion. En viktig del är att utreda förbränningsprestandan hos nya bränslen för att kunna se om det är ett bränsle som är rimligt att nyttja i Försvarsmaktens tillämpningar. Utöver flytande bränslen bör även gasformiga och metalliska bränslen undersökas. Förslag på verksamhet:

- Fortsatt samverkan inom NATO STO. Det är avgörande att utvecklingen synkroniseras mellan Natos länder och det finns mycket kunskap och erfarenheter att hämta inom samarbetet.
- Säkerhet med avseende på lagring, transport och hantering
- Modellering och simulering
 - Validering behövs genom experimentella försök
- Experimentella försök
 - Befintliga fordon
 - Gasturbin
 - RDE
- Civil och militär sårbarhet kopplat till lokal produktion och lagring
- Möjligheter i upphandling och värdering av robust försörjning. I samverkan FOI och FMV.
- Omvärldsbevakning och validering
- Reformer, vätgas → bränsle → vätgas
- Metallförbränning

Bränsleceller

Bränsleceller ger möjlighet att nyttja flytande bränslen genom elektrokemiska reaktioner istället för förbränning, resultatet blir elektrisk energi. Tekniken används redan idag i olika civila tillämpningar men även militära tillämpningar runt om i världen. Systemen har ofta andra egenskaper jämfört vid konventionella kolvmotorer och kan ge bättre operationella Bränsleceller har potential att nyttjas brett över hela Försvarsmakten men i dagens läge bedöms det ha störst betydelse för infrastruktur och marina farkoster.

Utredning om hur man nyttjar nya energilösningar på bästa sätt hos Försvarsmakten

- V2X: Vad betyder det för Försvarsmakten att kunna dela el mellan enheter och anläggningar och vad krävs rent praktiskt för att kunna nyttja tekniken?
- Mikronät/ödrift för robusthet och effektivitet

- Hur effektiviseras system och infrastruktur med befintlig och nya energilösningar?
- Under vilka förutsättningar är lokal produktion av bränslen/el intressant för Försvarmakten och vilka tekniker är att föredra?
- Hur kan laddning av elfordon styras och planeras smart, utan att orsaka sårbarheter hos Försvarmakten?
- Vilka konsekvenser får olika grader av elektrifiering på Försvarmaktens logistik som helhet och vilka förutsättningar behöver vara på plats för elektrifierade system ska vara operativt intressanta?

Designrymdskartläggning

Designrymdskartläggning (eng. Trade Space Exploration TSE) är en konceptgenererings- och värderingsmetod där olika systemkonceptkonfigurationer utforskas. Ett systems olika delsystem och hur de samverkar kan värderas. Inom FoT-projektet Markfordon på FOI utvecklas metoder och ett verktyg för just detta [135]. Verktyget skulle kunna vidareutvecklas för att studera olika energisystem för militära tillämpningar. Efter vidareutveckling kan ett sådant verktyg till exempel användas för att jämföra framtida fordons framdrift och energisystem mot varandra, både med avseende på övergripande vägval såsom val av bränsleceller kontra BEV¹² eller ICE¹³ men också på komponentnivå exempelvis genom större genomlysning av olika batterityper för - och nackdelar i olika energisystem.

6.3 Beroenden till civila försörjningskedjor

Detta ämnesområde innefattar sårbarheter kopplade till det militära försvarets beroenden till det civila samhället och civila försörjningskedjor. Det berör energiförsörjning för det militära försvaret som helhet men har också kopplingar till specifika teknikval och användningsområden. Två övergripande frågeställningar har identifierats inom området, som i sin tur brutits ner i delfrågor. Frågorna som presenteras här är inte uttömmande utan utgör exempel på frågor inom respektive område. Exakt vilka forskningsfrågor som ska studeras behöver bestämmas/dialogiseras med uppdragsgivaren.

Vilka beroenden skapas för Försvarmakten vid olika teknikval för energiförsörjningen?

Denna huvudfråga innehåller ett antal nedbrutna frågeställningar:

- Inom vilka områden/verksamheter är Försvarmakten beroende av civilsamhället för energiförsörjning?
- Vilka sårbarheter innebär dessa beroenden?
- Finns det säkerhetspolitiska aspekter på dessa beroenden?
- Andra aspekter som rör Sveriges säkerhet?
- Kan Försvarmakten göra teknikval som minskar sårbarheterna?
- Vilka val är mest robusta i en osäker framtid?
- Finns behov av samverkan mellan myndigheter för att lättare skapa de förutsättningar som krävs för en robust elförsörjning?

Hur påverkar utvecklingen inom den civila sektorn vilka energilösningar Försvarmakten bör satsa på i framtiden?

Denna huvudfråga innehåller ett antal nedbrutna frågeställningar:

¹² BEV- Battery Electrical Vehicle, dvs elbil med enbart batteri.

¹³ ICE – Internal Combustion Engine, förbränningsmotor.

- Omvärldsbevakning avseende policyutvecklingen i EU och Sverige. Både avseende klimatomställning och reglering av utländska direktinvesteringar, CER-direktivets [136] implementering osv.
- Hur kan det civila samhällets energisystem designas för att minska sårbarheterna för Försvarmakten? Robustheten i civila energiförsörjningen påverkar hur Försvarmakten behöver dimensionera sin robusthet/reservkraft.
- Vilken civil-militär samverkan behövs för att samhällets utveckling på energiområdet inte ska påverka Försvarmaktens förmåga negativt?
- Vilken del av den civila energiförsörjningen behöver vidta särskilda åtgärder för att Försvarmaktens förmåga inte ska påverkas negativt? – Hur?
- Vilka konflikter och synergier kan uppstå mellan utvecklingen i samhället och Försvarmakten? Hur kan konflikter undvikas och synergier uppnås?

6.4 Strategi för energiförsörjning

Till skillnad från ett flertal europeiska länder, finns ännu ingen uttalad strategi för hur den svenska försvarmakten ska säkerställa sin energiförsörjning i framtiden i samband med omställningen mot fossilfrihet. Däremot har det genomförts ett antal studier inom området och det pågår också forskning inom FOI på uppdrag av Försvarmakten, inom området energiförsörjning, där även denna studie ingår. Tidigare försvarmaktsstudier har pekat på stora osäkerheter i fråga om vilka tekniker som kommer att vara ledande på längre sikt, se kapitel 2.2, och kanske är detta en anledning till att man hittills inte velat slå fast en tydlig inriktning. Den kraftiga tillväxttakten inom Försvarmakten, integrationen med Nato samt stödet till Ukraina kan sammantaget göra det svårt att också sätta energiomställningen högst upp på dagordningen. Samtidigt har tidigare studie visat att det finns stora risker om Försvarmakten inte följer med i utvecklingen rörande energiomställning och energieffektivisering som sker i civilsamhället [137]. Försvarmakten är en toppstyrd organisation och det är rimligt att anta att en beslutad strategi för energiförsörjning och energiomställning skulle kunna vara ett stöd i arbetet inom organisationen. En sådan kan dock behöva utformas med en hög grad av öppenhet för nya lösningar och förändringar som drivs av yttre faktorer.

FOI kan ta en roll i att stötta Försvarmakten, med både metoder och kunskap, i arbetet med att ta fram en strategi för energiförsörjningsområdet, där resultat från den senaste forskningen kan lyftas in. En viktig aspekt är hur tillräcklig flexibilitet kan möjliggöras. En strategi för det militära försvarets energiförsörjning kan inte slå fast vilka lösningar Försvarmakten ska använda i framtiden, utan bör snarare handla om hur man kontinuerligt ska arbeta med området för att kunna anpassa sig till och tillvarata möjligheterna med nya utvecklingar och förutsättningar.

6.5 Fortsatt arbete med metodstöd för prognoser för framtida energibehov

Då ingen av de identifierade metoderna i kapitel 4 är direkt utarbetad för att göra prognoser går det inte i nuläget att peka på en given metod för detta. Däremot kan flera av metoderna och speciellt morfologisk analys, vara en aktuell metod för att arbeta med att skapa scenarier för Försvarmaktens framtida verksamhet, och även för att göra förutsägelser om vilka energitekniklösningar Försvarmakten kan komma att välja i framtiden. Det kan antas att en kombination av kvalitativa och kvantitativa inslag kommer att krävas.

Arbetet framåt bör innehålla både vidare inläsning på identifierade metoder och en bredare inhämtning av möjliga angreppssätt. En djupare dialog med uppdragsgivaren kommer också krävas för att förtydliga omfattning, grad av detaljering och exakthet i efterfrågade prognoser.

Efter ett sådant förarbete kan ett förslag på metod konstrueras, enligt förslag i kapitel 4.2. En viktig aspekt för det fortsatta arbetet är att söka samverkan kring prognostisering av energibehov i olika krigsscenarier med länder som kommit längre på området.

6.6 Samverkansprojekt med Försvarmakten

FoT Energiförsörjning ska ha ett tydligt militärt fokus och en stark samverkan med Försvarmakten. För att forskning och teknikutveckling, både med lång och kort tidshorisont, genomförs med hög relevans är det viktigt att ha en god förståelse för Försvarmaktens behov och genom samverkansprojekt möjliggörs utbyte av kunskap, erfarenhet och information mellan försvarsmyndigheterna. Ett område lämplig för sådan verksamhet är provning och utvärdering av nya tekniska lösningar i fält, där FOI tillsammans med Försvarmakten genomför gemensamma aktiviteter. Att utvärdera tekniska lösningar i fält i ett tidigt stadium kan ge betydligt mer information än utredningar som genomförs teoretiskt och experimentellt i laboratorium. För att kunna samverka bättre internationellt behöver Försvarsmyndigheterna ha nära samverkan och ha kännedom om de möjligheterna och utmaningarna som finns nationellt.

- **Provning av energisystem i fält**

FOI och FMV får ta del av resultat av fältprovning som genomförs av eller tillsammans med personal från Försvarmakten. Syftet är FOI och FMV ska få inblick i verkliga scenarion och hur materiel nyttjas av Försvarmakten för att bättre förstå behovet och styra forskningen och teknikutvecklingen i rätt riktning. Samtidigt får Försvarmakten ett forum för att uttrycka sina behov direkt till forskare och ingenjörer.

- **Samverkan med USA inom energiområdet**

Med inträdet i NATO finns möjligheter och förväntningar på Sverige att samverka med övriga NATO-medlemmar. USA har en globalt ledande roll när det gäller att implementera ny teknik och har flertalet överlappande intresseområden med Sverige, som exempelvis energisystem i kallt klimat. USA har flera olika organisationer under deras försvarsdepartement som är möjliga samarbetspartners med FOI, FMV och Försvarmakten.

7 Referenser

- [1] E. Lallo, "Guide för anskaffning av litiumbatterier," FOI Memo 7744, 2021.
- [2] E. Lallo, W. Sahlén, M. Elfsberg och S. Munktel, "Measuring thermal response in 21700 lithium-ion cells from high current pulses using constant flux calorimetry," i *IEEE Pulsed Power Conference (PPC)*, San Antonio, TX, USA, 2023.
- [3] H. Ellis och M. Pastuhoff, "Energisystem för robust energiförsörjning," FOI-R--5000--SE, 2021.
- [4] H. Ellis, W. Sahlén, M. Pastuhoff och M. Skarstind, "Energilagring för reservkraft - Flödesbatterier och metallförbränning som energilagring för bergum," FOI-R--5259--SE, 2022.
- [5] J. Enström, K. Danel, E. Lallo, S. Munktel, W. Sahlén och M. Tynnhammar, "Omvärldsanalys - Energitekniker för ett framtida försvar," FOI-R--5606--SE, 2024.
- [6] E. Lallo, R. Fridsén Skogsberg, H. Ellis och M. Skarstind, "Vätgasdrivna reservkraftsystem - En förstudie av vätgasens möjligheter för strömförsörjning av militära befästningar," FOI-R--5444--SE, 2023.
- [7] D. Lörstad, A. Lindholm, N. Alin, C. Fureby, A. Lantz, R. Collin och M. Aldén, "Experimental and LES Investigation of a SGT-800 Burner in a Combustion Rig," FOI-S--3948--SE, 2011.
- [8] N. Viola, R. Fusaro, D. Ferretto, O. Gori, B. Saracoglu, A. C. Ispir och C. Ibron, "H2020 Stratofly Project: from Europe to Australia in less than 3 hours," i *ICAS 2021 THE 32 nd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, 2021.
- [9] C. Fureby, "EFFECT, Projektrapport 2012-2014," FOI MEMO 4898, 2014.
- [10] K. Danel och B. Fallenius, "Prov med biobränslen i turbojetmotor Microturbo TRI-60," FOI-R--5101--SE, 2021.
- [11] K. Danel, N. Zettervall och C. Fureby, "A Combined Experimental and Computational Study of Jet Engine Combustion--Baseline Engine Operation," *AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum*, p. 4328, 2019.
- [12] CESTAP, "CESTAP Annual Report 2023," 2023.
- [13] P. Lundberg, M. Hagström, N. Stensbäck, E. Fedina, M. Alm och J. Ottosson, "Förstudie FoT-marksystem," FOI Memo 7419, 2020.
- [14] J. Andersen, M. Lyth, M. Elfsberg och N. Stensbäck, "Systemintegration av luftvärnskoncept på markfordon," FOI-R--5383--SE, 2023.
- [15] B. Johansson och D. Jonsson, "Beredskap i framtida energisystem. En analys med utgångspunkt i Energimyndighetens "Fyra framtider"," FOI-R--4589--SE, 2018.
- [16] C. Denward, B. Johansson, D. Jonsson och P. Larsson, "Sektorsansvar och energiberedskap. Förslag till arbetsmodell för att utforma ett sektorsansvar med förmågor i fokus," FOI-R--4819--SE, 2019.

- [17] D. Jonsson, "Gråzonsproblematik och hybridkrigföring - påverkan på energiförsörjning," FOI-R--4590--SE, 2018.
- [18] C. Wedebrand och E. Veibäck, "Litteraturstudie om framtidens elförsörjning och elberedskap," FOI-R--4565--SE, 2018.
- [19] D. Jonsson, B. Johansson, F. Lindgren, E. Veibäck och M. Bergstrand, "Scenariobaserad planering av civilt försvar inom energiområdet," FOI-R--4356--SE, 2017.
- [20] E. Veibäck, B. Johansson, D. Jonsson, H. Sonnsjö, E. Mittermaier och A. Stenerus, "Energi och förmåga - Analytiska perspektiv och empiriska erfarenheter inom drivmedelsområdet," FOI-R--4241--SE, 2016.
- [21] D. Jonsson, B. Johansson, E. Mittermaier och E. Veibäck, "Oljekrishantering - en nordisk utblick med fokus på förbrukningsdämpande åtgärder," FOI-R--4229--SE, 2016.
- [22] A. Waleij, L. Simonsson och B. Liljedahl, "Konsekvenser av energibortfall på samhällets funktionalitet och civilbefolkningens hälsa," FOI-R--4755--SE, 2019.
- [23] B. Johansson, D. Jonsson, A. Månsson, L. J. Nilsson och M. Nilsson, "Klimatpolitik och energisäkerhet: konflikter och synergier," FOI-R--3896--SE, 2014.
- [24] A. Odell, A. Bernland, G. Eriksson, P. Grahn, T. Mårtensson, L. Norin, M. Olsén och B. Reichel, "Möjligheter till samexistens mellan Försvarsmaktens verksamhet och utbyggd vindkraft," FOI-R--5293--SE, 2022.
- [25] A. Odell, A. Lioufas, M. Olsén, K. Mossberg Sonnek, F. Welander och A. Hörnedal, "Russian attacks on the Ukrainian power system," FOI-R--5596--SE, 2024.
- [26] B. Johansson och D. Jonsson, "Transportsektorns energiförsörjning. En utblick med ett europeiskt perspekti," FOI-R--2724--SE, 2009.
- [27] B. Reichel och D. Jonsson, "Svenskt värdlandsstöd: Kunskapsunderlag för civilt försvar med fokus på energi," FOI-R--5441--SE, 2023.
- [28] D. Veibäck och E. Jonsson, "Nato och svensk civil beredskap – Ett kunskapsunderlag med fokus på NATO Baseline Requirements och svensk energiförsörjning," FOI-R--4937--SE, 2020.
- [29] E. Al, "Strategin för en energiunion ska garantera överkomlig, trygg och hållbar energi för EU och dess invånare".
- [30] E. Wannheden, "The EU's Continued Dependencies on Russian Energy. A Clean Break?," FOI-R--5621--SE, 2024.
- [31] D. Jonsson och H. Sonnsjö, "EU:s framtida energisäkerhet i en föränderlig omvärld. Scenarioanalys för Försvarsmakten," FOI-R--3627--SE, 2013.
- [32] B. Johansson, D. Jonsson och M. Östensson, "Energisäkerhet och energirelaterade beroenden på kort och lång sikt. En pilotstudie," FOI-R--2979--SE, 2010.
- [33] H. Sonnsjö, "Om internationella relationer och energisäkerhet," FOI-R--3824--SE, 2014.

- [34] D. Jonsson, B. Johansson, A. Månsson och H. Sonnsjö, "Energi, säkerhet och konflikt i ett framtidsperspektiv," FOI-R--3813--SE, 2014.
- [35] N. Rossbach, "The Geopolitics of Russian energy," FOI-R--4623--SE, 2018.
- [36] N. Rossbach, "Amerikanskt "energiöberoende"? - säkerhetspolitiska följder av okonventionell energiutvinning av skiffergas och skifferolja i USA," FOI-R--3947--SE, 2014.
- [37] A. Lund, "Hela havet stormar: Gränstvister, nationalism och energipolitik i östra Medelhavet," FOI Memo 7438, 2020.
- [38] N. Granholm och I. Kiesow, "Olja och gas i ett nytt och förändrat Arktis. Energifrågans utveckling mot bakgrund av regionens strategiska dynamik," FOI-R--2971--SE, 2010.
- [39] N. Rossbach, "Sällsynta metaller och stormaktsrivalitet - en översikt om nya strategiska resurser och risken för råvarukonflikter," FOI-R--5478--SE, 2023.
- [40] M. F. Khan, M. Lundmark och J. Hellström, "Sällsynta jordartsmetaller – betydelse för det försvars- och säkerhetspolitiska området," FOI-R--3604--SE, 2012.
- [41] M. Östensson, J. Johansson och K. D. Mattsson, "Inventering av Försvarsmaktens energianvändning," FOI Memo 4792, 2013.
- [42] D. K. Jonson, A. Atarodi, K. H. Dreborg, J. Hellström, B. Johansson, R. L. Larsson, R. Magnusson och M. Östensson, "Energisäkerhet: syntes och sammanfattning av ett tvåårigt forskningsprojekt för Försvarsmakten," FOI-R--2839--SE, 2009.
- [43] M. Östensson, "Militära perspektiv på energisäkerhet: exempel på strategier och forskning," FOI-R--2838--SE, 2009.
- [44] M. Östensson, D. K. Jonsson, R. Magnusson och K. H. Dreborg, "Energy and Security: Future-oriented studies for the Swedish Armed Forces," FOI-R--2637--SE, 2009.
- [45] B. Johansson, R. Magnusson och D. Jonsson, "Energilösningar inom Försvarsmakten: En diskussion kring värderingsmetoder," FOI-R--2836--SE, 2009.
- [46] B. Nykvist och T. Mårtensson, "Klimatneutral Försvarsmakt - Analys av fossilfria vägval för försvarsgrenarna," FOI-R--5201--SE, 2021.
- [47] M. Tynnhammar och J. Enström, "Logistikperspektiv på Försvarsmaktens framtida energiförsörjning," FOI-R--5580--SE, 2024.
- [48] T. Junerfält och E. Wannheden, "Manufacturing vulnerabilities: Chinese minerals, Semiconductors and Green Technologies in the EU," FOI-R--5524--SE, 2024.
- [49] CENergiGUNE, [Online]. Available: <https://cicenergigune.com/en/blog/gigafactories-europe-commitment-economic-recovery-battery-factories>. [Använd 25 11 2024].
- [50] K. Teenakul och e. al, "Treatment of carbon electrodes with Ti3C2Tx MXene coating and thermal method for vanadium redox flow batteries : a comparative study," *RSC Advances*, vol. 14, nr 18, pp. 12807-12816, 2024.

- [51] E. V. Ramirez, R. Wreland Lindström och A. Khataee, "Electrochemical and Kinetic Analysis of Manganese Electrolytes for Redox Flow Batteries," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 171, nr 8, 2024.
- [52] M. Chakraborty och e. al, "Lignin-Based Electrolytes for Aqueous Redox Flow Batteries," *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, vol. 12, nr 42, pp. 15409-15417, 2024.
- [53] A. Khataee och e. al, "Poly(arylene alkylene)s functionalized with perfluorosulfonic acid groups as proton exchange membranes for vanadium redox flow batteries," *Journal of Membrane Science*, vol. 671, 2023.
- [54] I. Salmeron-Sanchez och e. al, "Zwitterionic poly(terphenylene piperidinium) membranes for vanadium redox flow batteries," *Chemical Engineering Journal*, vol. 474, 2023.
- [55] European Parliament, "Regulation (EU) 2021/695 of the European Parliament and of the Council of 28 April 2021 establishing Horizon Europe – the Framework Programme for Research and Innovation, laying down its rules for participation and dissemination, and repealing Regulations," European Parliament, 2021.
- [56] U.S Department of Energy, "Flow Batteries Technology Strategy Assessment, Department of Energy," DOE/OE-0033, 2023.
- [57] U.S. Department of Energy, "Achieving the Promise of Low-Cost Long Duration Energy Storage," 2024.
- [58] CNESA, "CNESA," [Online]. Available: <https://en.cnesa.org/new-blog/2022/7/19/after-6-years-the-100mw400mwh-redox-flow-battery-storage-project-in-dalian-is-connected-to-the-grid>. [Använd 19 11 2024].
- [59] U.S Department of Defense, "Assistant Secretary of Defense for Operational Energy Plans and Programs, "Operational energy strategy: Implementation plan," U.S Department of Defense, Washington , 2012.
- [60] U.K. Ministry of Defence, "Defence Operational Energy Strategy," 2023. [Online]. Available: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6570b223809bc300133081cc/Defence_Operational_Energy_Strategy_2023.pdf.
- [61] U.S Army, "Fort Carson receives first of its kind 'GridStar Flow' battery," 22 11 2024. [Online]. Available: https://www.army.mil/article/281581/fort_carson_receives_first_of_its_kind_gridstar_flow_battery. [Använd 02 12 2024].
- [62] Chariot Motors, "Chariot Motors," [Online]. Available: <https://chariot-electricbus.com/products/>.
- [63] D. Bhattacharjya och e. al, "Development of a Li-Ion Capacitor Pouch Cell Prototype by Means of a Low-Cost, Air-Stable, Solution Processable Fabrication Method," *Journal of The Electrochemical Society*, 2021.
- [64] CICenergiGUNE, "CICenergiGUNE," 01 12 2024. [Online]. Available: <https://cicenergigune.com/en/supercapacitors/publications>. [Använd 01 12 2024].
- [65] Energimyndigheten, "31 miljarder i stöd till HYBRIT," 2023. [Online]. Available: <https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2023/31-miljarder-i-stod-till-hybrit/>.

- [66] Energimyndigheten, 15 07 2022. [Online]. Available: <https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2022/stor-utbyggnad-av-el--och-vatgasstationer-for-gods-efter-beslut-fran-energimyndigheten/>. [Använd 01 12 2024].
- [67] European Commission, "Communication COM/2020/301: A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe," European Commission, 2020.
- [68] Energimyndigheten, "Vätgasens utveckling nationellt och internationellt. Underlagsrapport i uppdraget att samordna arbetet med vätgas i Sverige," Energimyndigheten ER 2024:26, 2024.
- [69] U.S Department of Energy, "Department of Energy Hydrogen Program Plan," U.S Department of Energy, Washington, DC, 2020.
- [70] Fuel Cell and Hydrogen Energy Association, "Road Map to a US Hydrogen Economy," Fuel Cell and Hydrogen energy Association, 2020. [Online]. Available: <https://www.fchea.org/us-hydrogen-study>.
- [71] U.S. Department of Energy, "Hydrogen Shot," U.S. Department of Energy,, 2021. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-shot>.
- [72] "Registry of restriction intentions until outcome. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)," ECHA (European Chemicals Agency, 2023. [Online]. Available: [tps://echa.europa.eu/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e18663449b](https://echa.europa.eu/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e18663449b).
- [73] H. Nguyen, C. Klose, L. Metzler, S. Vierrath och M. Breitwieser, "Fully Hydrocarbon Membrane Electrode Assemblies for Proton Exchange Membrane Fuel Cells and Electrolyzers: An Engineering Perspective," *Adv. Energy Mater*, nr 12, 2022.
- [74] NATO Energy Security Centre of Excellence (NATO ENSEC COE),, "ENERGY HIGHLIGHTS No 17," 2022.
- [75] D. Smoot, "Army to award up to \$1.8 million for clean hydrogen-fuel technologies," U.S Army, 14 03 2023. [Online]. Available: https://www.army.mil/article/264806/army_to_award_up_to_1_8_million_for_clean_hydrogen_fuel_technologies.
- [76] Department of the Army, Office of the Assistant Secretary of the Army for Installations, "United States Army Climate Strategy," *Energy and Environment*, 2022.
- [77] Metalot, "Future Energy Lab by Metalot," 01 12 2024. [Online]. Available: <https://www.metalot.nl/en/>. [Använd 01 12 2024].
- [78] U.S. Department of Defense, "DoD Breaks Ground on Project Pele: A Mobile Nuclear Reactor for Energy Resiliency," 01 12 2024. [Online]. Available: <https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/3915633/dod-breaks-ground-on-project-pele-a-mobile-nuclear-reactor-for-energy-resiliency/>. [Använd 01 12 2024].
- [79] Vattenfall, 10 12 2024. [Online]. Available: <https://group.vattenfall.com/se/var-verksamhet/vara-energislav/karnkraft/smr-vid-ringhals>. [Använd 01 12 2024].
- [80] Vattenfall, 10 12 2024. [Online]. Available: <https://group.vattenfall.com/se/nyheter-och->

- press/pressmeddelanden/2020/vattenfall-fordjupar-samarbetet-om-sma-modulara-reaktorer-i-estland. [Använd 01 12 2024].
- [81] EU Kommissionen , 01 12 2024. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/nuclear-energy/small-modular-reactors/small-modular-reactors-explained_en. [Använd 01 12 2024].
 - [82] F. W. Bohn, "Overview of MIL-STD-3071 – Tactical Microgrid Standard," US Army Combat Capabilities Development Command, C5ISR Center, 2024.
 - [83] M. Kress, *Operational Logistics: The Art and Science of Sustaining Military Operations*, Springer International Publishing, 2016.
 - [84] Försvarsmakten, "Doktrintillägg 2023," [Online]. Available: <https://www.forsvarsmakten.se/siteassets/2-om-forsvarsmakten/dokument/doktriner/dtlg-log.pdf>. [Använd 2024-11-19].
 - [85] U. Berardi, E. Tomassoni och K. Khaled, "A Smart Hybrid Energy System Grid for Energy Efficiency in Remote Areas for the Army," *Energies*, vol. 13, nr 9, p. 2279, 2020.
 - [86] A. Patil och e. al, "Portable fuel cell systems for America's army: Technology transition to the field," *Journal of Power Sources*, vol. 136, nr 2 special issue, pp. 220-225, 2004.
 - [87] T. M. Thampan, M. A. Govoni och J. T. Clark, "Fuel cell systems as power sources for sensor applications," *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, vol. 10, nr 4, 2013.
 - [88] J. Gryz, K. Król, A. Witkowska och M. Ruszel, "Mobile Nuclear-Hydrogen Synergy in NATO Operations," *Energies*, vol. 14, nr 23, p. 7955, 2021.
 - [89] M. A. Masrur, "Toward Ground Vehicle Electrification in the U.S. Army: An Overview of Recent Activities," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 4, nr 1, pp. 33-45, 2016.
 - [90] M. A. Masrur och e. al, "Military-based vehicle-to-grid and vehicle-to-vehicle microgrid—System architecture and implementation," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, nr 1, pp. 157-171, 2017.
 - [91] S. Doliente, A. Narayan, J. F. D. Tapia, J. F. D. Samsatli, Y. Zhao och S. Samsatli, "Bio-aviation Fuel: A Comprehensive Review and Analysis of the Supply Chain Components," *Frontiers in Energy Research*, vol. 8, 2020.
 - [92] M. Cerca, A. Sosa, E. Gusciute och F. Murphy, "Strategic planning of bio-based supply chains: Unlocking bottlenecks and incorporating social sustainability into biorefinery systems," *Sustainable Production and Consumption*, vol. 34, pp. 219-232, 2022.
 - [93] F. Esmaeili, F. Mafakheri och F. Nasiri, "Biomass supply chain resilience: integrating demand and availability predictions into routing decisions using machine learning," *Smart Science*, vol. 11, nr 2, pp. 293-317, 2023.
 - [94] T. Bastos, L. C. Teixeira, J. C. O. Matias och L. J. R. Nunes, "Optimizing the agroforestry residual biomass supply chain: A disruptive tool for mitigating logistic costs and enhancing forest management," *Results in Engineering*, vol. 20, 2023.

- [95] M. He, M. Yang, W. Fu, X. Wu och K. Izui, "Optimization of Electric Vehicle Routes Considering Multi-Temperature Co-Distribution in Cold Chain Logistics with Soft Time Windows," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 15, nr 3, 2024.
- [96] Y. Li, M. K. Lim, W. Xiong, W. Huang, Y. Shi och S. Wang, "An electric vehicle routing model with charging stations consideration for sustainable logistics," *Industrial Management and Data Systems*, vol. 124, 2024.
- [97] R. Luan, "Logistics distribution route optimization of electric vehicles based on distributed intelligent system," *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2024.
- [98] Y. Meng, Y. Zou, C. Ji, J. Zhai, X. Zhang och Z. Zhang, "Data-driven electric vehicle usage and charging analysis of logistics vehicle in Shenzhen, China," *Energy*, 2024.
- [99] A. Villalba-Herreros, R. d'Amore-Domenech, A. Crucelaegui och T. J. Leo, "Techno-Economic Assessment of Large-Scale Green Hydrogen Logistics Using Ammonia As Hydrogen Carrier: Comparison to Liquefied Hydrogen Distribution and In Situ Production," *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, vol. 11, pp. 4716-4726, 2023.
- [100] W. Dong, C. Shao, X. Li, D. Zhu, Q. Zhou och X. Wang, "Integrated planning method of green hydrogen supply chain for hydrogen fuel cell vehicles," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, pp. 18385-18397, 2023.
- [101] U. Hasturk, A. H. Schrottenboer, E. Ursavas och K. J. Roodbergen, "Stochastic Cyclic Inventory Routing with Supply Uncertainty: A Case in Green-Hydrogen Logistics," *Transportation Science*, vol. 58, pp. 315-339, 2024.
- [102] S. Kim, J. Park, W. Chung, D. Adams och J. H. Lee, "Techno-economic analysis for design and management of international green hydrogen supply chain under uncertainty: An integrated temporal planning approach," *Energy Conversion and Management*, vol. 301, 2024.
- [103] National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, *Powering the U.S. army of the future*, Washington DC: The National Academies Press, 2021.
- [104] B. Arnfinnsson och E. K. Tønsberg, "Nullutslippsforsvaret – en mulighetsstudie av klimavennlig teknologi for Forsvare," FFI Forsvarets forskningsinstitutt, 2023.
- [105] A. L. Cheng, E. R. Fuchs, V. J. Karplus och J. J. Michalek, "Towards a resilient battery supply chain Strategies and enablers for managing vulnerabilities and enhancing resilience for a Swedish Automotive OEM," *Nature Communications*, vol. 15, p. 2143, 2024.
- [106] S. Poules och J. Bahno, "Towards a resilient battery supply chain Strategies and enablers for managing vulnerabilities and enhancing resilience for a Swedish Automotive OEM," 2023.
- [107] e. a. Ren. H, "Vulnerability to geopolitical disruptions of the global electric vehicle lithium-ion battery supply chain network," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 188, 2024.
- [108] X. Sun, H. Hao, P. Hartmann, Z. Liu och F. Zhao, "Supply risks of lithium-ion battery materials: An entire supply chain estimation," *Materials Today Energy*, vol. 14, 2019.

- [109] G. Beaumier och M. Cartwright, "Cross-Network Weaponization in the Semiconductor Supply Chain," *International Studies Quarterly*, vol. 68, 2024.
- [110] C. Brundage, "The US-China Semiconductor Power-Security Dilemma: Decoupling the Security and Power Struggles Through the Theory of Dr. Barry Buzan," *International Journal*, vol. 4, 2023.
- [111] M. K. Pathan, N. Weston och D. Mavri, "Critical Materials in Aerospace: A Comprehensive Analytic Study on The Strategic Importance of Semiconductors," *AIAA SciTech Forum and Exposition*, 2024.
- [112] Y. Yu, D. Ma och Y. Wang, "Structural resilience evolution and vulnerability assessment of semiconductor materials supply network in the global semiconductor industry," *International Journal of Production Economics*, nr 270, 2024.
- [113] E. V. Andersen, Y. Shan, B. Bruckner, M. Černý, K. Hidioglu och K. Hubacek, "The vulnerability of shifting towards a greener world: The impact of the EU's green transition on material demand," *Sustainable Horizons*, vol. 10, 2024.
- [114] D. Bulin, "The Critical Mineral Rush: Lithium and Cobalt – A Canadian Perspective," *Springer Proceedings in Business and Economics*, pp. 315-328, 2024.
- [115] R. M. Nasir, F. He och N. H. Kim, "Quantile and time-frequency spillover between rare earth and its interlinked markets: A geopolitical perspective," *Journal of Cleaner Production*, vol. 476, 2024.
- [116] D. S. Yü, "Geo-economics of China's rare earths production: Concurrent green transition and environmental vulnerability," *Extractive Industries and Society*, vol. 18, 2024.
- [117] V. Vivoda, "Friend-shoring and critical minerals: Exploring the role of the Minerals Security Partnershi," *Energy Research and Social Science*, vol. Short survey vol. 100, 2023.
- [118] S. Closson, "The military and energy: Moving the United States beyond oil," *Energy Policy*, vol. 61, pp. 306-316, 2013.
- [119] E. M. Craparo och J. G. Sprague, "Integrated supply- and demand-side energy management for expeditionary environmental control," *Applied Energy*, Vol. %1 av %2233-234, pp. 352-366, 2019.
- [120] D. S. Eady, S. B. Siegel, R. S. Bell och S. H. Dicke, "Sustain the mission project: Casualty factors for fuel and water resupply convoys," *Army Environmental Policy Institute*, nr Arlington, 2009.
- [121] S. Hicks, "Powering the Department of Defense Initiatives to Increase Resiliency and Energy Security," *American Security Project*, 2017.
- [122] B. Johannson, "A broadened typology on energy and security," *Energy Policy*, vol. 55, 2013.
- [123] W. McCurry, L. Costantini, W. Rickerson, J. Monken och E. Brousseau, "Defense energy resilience and the role of state public utility commissions," *Journal of Critical Infrastructure Policy*, pp. 57-71, 2022.
- [124] H. Liwång, "Future national energy systems, energy security and comprehensive national defence," *Energies*, 2023.

- [125] C. Samaras, W. J. Nuttall och M. Bazilian, "Energy and the military: Convergence of security, economic, and environmental decision-making," *Energy Strategy Reviews*, vol. 26, 2019.
- [126] M. Dworak och P. Huf, "Nato Energy Security, Center of Excellence," NATO ENSEC COE, 17 08 2021. [Online]. Available: <https://www.enseccoe.org/publications/military-aspects-of-energy-security-with-emphasis-on-interdependencies-between-the-civil-energy-sector-as-a-supplier-and-military-as-a-consumer/>. [Använd 01 12 2024].
- [127] G. Kindvall, "Assessment Games – en översikt," FOI-R--4473--SE, 2017.
- [128] K. Andersson, M. Lundmark och S. Silfverskiöld, "The Military Utility Assessment Method for Future Technologies," Försvarshögskolan, 2019.
- [129] NATO STO, "Futures Assessed alongside socio-Technical Evolutions (FATE). Final report of the SAS-123 Research Task Group. Maj 2021," NATO STO, 2021.
- [130] M. Stenström, "Morfologisk analys i grupp: En personlig handledning," FOI-R--3215--SE., 2011.
- [131] B. Levin, A. Pohl, B. Kariis, G. Kindström, P. Lundberg, A. Norén, F. Ringblom, M. Tunell och S. Savage, "Analysis of energy solutions for the soldier," FOI-R--3832--SE, 2014.
- [132] M. Tjernberg, "Snabb morfologisk analys – En metodhandledning," FOI-D--1179--SE, 2022.
- [133] A. Lindberg, C. Grönwall, E. Lång och E. Dalberg, "A utility-focused process for enhancing the use of horizon scanning in defence research," FOI-R--5149--SE, 2021.
- [134] Försvarsmakten, "Inriktning av Försvarsmaktens forskning och utveckling 2025," FM2023-26635:3, 2025.
- [135] M. Karlsson Hagnell och A. Carlstedt, "Metoder och verktyg för designrymdskartläggning - Tillämpat på markdomänen," FOI-R--5503--SE, 2024.
- [136] European Commission, "Critical entities of Resilience Directive: Critical infrastructure resilience at EU-level".
- [137] Försvarsmakten, "Slutrapport av Studie GEM182004S Klimatneutral Försvarsmakt," FM2023-3555:2, Försvarsmakten, 2023.
- [138] Energimyndigheten, 14 12 2023. [Online]. Available: <https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2023/31-miljarder-i-stod-till-hybrid/>. [Använd 01 12 2024].
- [139] NATO Energy Security Centre of Excellence , "Energy Highlights No 17," 2022.

