

Logistikperspektiv på Försvarmaktens framtida energiförsörjning

MARCUS TYNNHAMMAR
JOHANNA ENSTRÖM



Marcus Tynnhammar

Johanna Enström

Logistikperspektiv på Försvarsmaktens framtida energiförsörjning

Titel	Logistikperspektiv på Försvarmaktens framtida energiförsörjning
Title	Logistic perspective on future energy supply for the Swedish Armed Forces
Rapportnr	FOI-R--5580--SE
Månad	April
Utgivningsår	2024
Antal sidor	33
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare	Försvarmakten
Forskningsområde	Försvarsekonomi
FoT-område	Temaområde
Projektnr	E12350
Godkänd av	Malek Finn Khan
Ansvarig avdelning	Försvarsanalys

Bild: Shutterstock

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

Försvarsmaktens verksamhet är idag beroende av fossila drivmedel, men också av försörjningsnätverk som är gemensamma med civil sektor. Därför finns goda skäl att bygga kunskap kring hur Försvarsmakten ska utforma sin framtida drivmedels- och energiförsörjning.

Energiförsörjning utgör en logistikkedja, med delar som produktion, lager, transport och användare, men energiförsörjning är också ett eget forskningsområde med sin speciella terminologi och inriktning som skiljer sig från logistikens. En av utmaningarna för logistiska analyser är att försörjningen av el och drivmedel i många fall går in i varandra och att olika typer av flöden kan ersätta varandra. Denna rapport vill därför undersöka hur logistikteori kan tillämpas inom energiförsörjningsområdet, genom att beskriva specifika karaktärsdrag för olika typer av energiförsörjningssystem. För att belysa detta ger rapporten en överblick av det svenska energiförsörjningssystemet och analyserar möjligheter till robusta nätverk via lokala nät. Rapporten belyser viktiga nyckelbegrepp och nomenklatur inom logistik- respektive energiförsörjningsområdet, och diskuterar hur ett logistiskt synsätt på energiförsörjning kan bidra till lösningar i Försvarsmaktens fortsatta arbete med energiomställning.

Slutligen presenteras en målbild där energiförsörjningen utgör ett robust nätverk, är flexibel vad gäller energibärare, utgår från behovet hos användaren och klarar av att integrera leveranskedjor för olika behov och olika användare.

Nyckelord: Logistik, energi, energisystem, försörjningskedjor, energiomställning, klimatomställning, drivmedel, elförsörjning.

Summary

The Armed Forces are heavily reliant on fossil fuel, but also largely affected by the development of the surrounding society. This rises a demand to increase knowledge on how to design a future system for propellants and energy supply within the Armed Forces.

Energy is supplied through a logistic flow with processes such as production, storage, transportation and utilization. However, in research, energy systems are a domain of their own with a terminology that in many ways differ from practice within the logistic field. In order to find synergies between the fields, this report aims at investigating how logistic theory can be applied within the energy domain by describing the character of different energy systems. One of the challenges identified is that the supply of electricity and fuel in many cases are interchangeable and transform between one another.

The report also provides an overview of the Swedish energy system and addresses opportunities for increased robustness through local networks.

The goal for a future military energy system is described as a robust network, flexible in terms of energy carriers, well adapted to user requirements and with the ability to integrate between supply chains.

Keywords: Logistics, energy, energy systems, supply chains, energy transition, climate mitigation, fuel, electricity.

Innehåll

Begreppsförklaring	6
1 Inledning	7
1.1 Tillbakablick och motiv för energiomställning	7
1.2 Logistik och energisystem	8
1.3 Syfte	9
1.4 Metod	9
1.5 Läsguide	9
2 Energisystem.....	10
2.1 Definitioner.....	10
2.2 Det svenska energisystemets nuläge och framtid.....	10
2.3 Det svenska kraftnätet.....	12
2.3.1 Lokala nät och ö-drift	12
2.4 Försörjningsnätverk för drivmedel	13
2.5 Energiberäkningar	13
2.6 Grafisk sammanfattning av kapitel 2 – Energisystemet	15
3 Logistiksystemets delar	16
3.1 Användaren.....	16
3.2 Lagerhållning	17
3.3 Transport av energi.....	18
3.4 Produktion	18
3.5 Logistik- och energiterminologi.....	19
3.6 Grafisk sammanfattning av kapitel 3 – Logistiksystemets delar	21
4 Försvarsmaktens olika typer av användarbehov	22
4.1 Energibehov för personlig utrustning.....	22
4.2 Energibehov för farkoster	22
4.3 Energibehov för anläggningar	23
4.4 Grafisk sammanfattning av kapitel 4 – Försvarsmaktens olika typer av energibehov	24
5 Möjliga lösningar för en framtida energiförsörjning som svarar mot Försvarsmaktens behov	25
5.1 Försvarsmakten i solitär elförsörjning.....	25
5.2 Försvarsmakten i lokal el-samverkan	25
5.3 Energisystem för farkoster.....	26
5.4 Synergier mellan försörjningskedjor	27
5.5 Grafisk sammanfattning av kapitel 5 - Möjliga lösningar för en framtida energiförsörjning som svarar mot Försvarsmaktens behov	29
6 Summering och förslag till fortsatt arbete	30
Referenser	31

Begreppsförklaring

Begrepp	Förklaring	Exempel
Energibärare	Energiform som möjliggör transport, lagring eller användning av energi.	El, diesel, biodrivmedel, vätgas, värme.
Energikälla	Naturlig källa ur vilken energi kan utvinnas.	Sol, vind, olja, naturgas, biomaterial
Energisystem, macro-nivå	Alla komponenter involverade i produktion, omvandling, distribution och användning av energi.	Försvarmaktens energisystem, Sveriges energisystem.
Energisystem, micro-nivå	Flödet av energi inom tydligt definierade systemgränser.	Motor och drivlina i ett fordon.
Energiförsörjning	Upprätthållande av det flöde av energi som krävs för att täcka behovet hos en verksamhet eller organisation.	Energiförsörjning av en fortifikation kan under störda förhållanden ske via reservkraft, så att ett energiflöde upprätthålls.
Energiteknik	Teknik som möjliggör produktion, omvandling, distribution, lagring eller nyttjande av energi.	Solpaneler, batterier, kraftnät, laddstolpar, bränsleceller, motorer.
Försörjningskedja	Tre eller flera enheter som är direkt involverade i flödet av produkter, tjänster, informations- eller finansflöden, från råvara till kund.	Vägen från råolja, via transport och förädling, till förbränning i en motor är både ett energisystem, ett logistiksystem och en försörjningskedja.
Logistiksystem	Som försörjningskedja, men kan också gälla flöden inom en organisation. I denna rapport avses system där ett eller flera flöden ingår.	Distribution av drivmedel inom Försvarmakten.

1 Inledning

1.1 Tillbakablick och motiv för energiomställning

För över hundra år sedan påbörjades elektrifieringen genom glödlampor inomhus, och fortsatte snabbt med både elektrisk ström för maskiner och bilar. Dock vann petroleumprodukterna marknaden för fordonsdrift liksom inom många andra områden. Utvecklingen av förbränningsmotorn har skapat nya möjligheter för transporter över hela världen.^{1, 2}

Olja har sedan fasats ut inom allt fler områden. Kärnkraft började ersätta olja för elproduktion från 1970-talet³ och idag står vi i början av utfasningen av fossila bränslen inom transportsektorn. Samtidigt har elektriska fordon funnits väldigt länge, men haft få marknadsandelar. Även industrin satsar stort för att ersätta fossila bränslen och mycket talar för att vi går emot en komplett elektrifiering i användarled. Detta ställer höga krav på kapacitet i ett elnät utformat för en helt annan typ av produktion och användning av energi.

Försvarsmaktens krav på robusthet och tillgänglighet kan i många fall skilja sig från civilsamhällets och medföra behov av specialanpassningar, men det finns också många likheter med andra verksamheter inom totalförsvaret, vilket öppnar möjligheter för samverkan kring energifrågor. Resilient energiförsörjning tas bl.a. upp som ett kritiskt område inom NATO Baseline Requirements (NBR) där krav ställs på hela civilsamhällets resiliens^{4,5}.

Sverige har åtagit sig att nå nettoutsläpp noll år 2045 och det finns specifika mål uppsatta för transportsektorn.⁶ En viktig del av Försvarsmaktens arbete med klimatneutralitet är kopplat till att minska användningen av fossila drivmedel. Öppna siffror från 2016 års miljöredovisning visar att ca 80 procent av koldioxidutsläppen då härrörde från drivmedelsanvändning, varav huvuddelen från flygvapnet. I USA släpptes nyligen en detaljerad rapport⁷ som uppmärksammar den amerikanska arméns framtida behov av nya energilösningar. Samtidigt visar bl.a. Energimyndigheten, i flera rapporter^{8, 9}, att även Sverige har ett enormt behov att både ställa om till andra energikällor och utöka kapaciteten. Många olika energibärare och energitekniker kommer att behöva implementeras för att lösa de utmaningarna.

Oavsett vilka avsteg Försvarsmakten tillåts ta från miljömålen, så kommer marknaden för vissa drivmedel bli liten och därigenom svår att upprätthålla. Det innebär att när det civila samhället alltmer ställer om sin energiförsörjning står Försvarsmakten inför valet att skapa sig en egen försörjningskedja för fossila bränslen, eller att anpassa sin verksamhet till fossilfrihet.

Denna rapport är den första i Försvarsmaktens studie LOG232405S Energilösningar, vars syfte är att fortsätta kartlägga hur Försvarsmakten ska utforma sin framtida drivmedels- och energiförsörjning. Rapporten bygger vidare på resultaten från den tidigare studien GEM182004S

¹ Devine, W. D. (1983). From shafts to wires: Historical perspective on electrification. *The Journal of Economic History*, 43(2), 347-372.

² Morton Jr, D. L. (2002). Reviewing the history of electric power and electrification. *Endeavour*, 26(2), 60-63.

³ Energiläget 2022, med energibalanser för år 1970-2020. Energimyndigheten 2022. ET2022:09. www.energimyndigheten.se/statistik/energilaget/

⁴ Jonsson, D., & Veibäck, E. (2020). Nato och svensk civil beredskap – Ett kunskapsunderlag med fokus på NATO Baseline Requirements och svensk energiförsörjning. FOI-R--4937--SE.

⁵ NATO. Resilience, civil preparedness and Article 3. https://www.nato.int/cps/en/natohq/topics_50093.htm Besökt 2023-06-27.

⁶ Naturvårdsverket. Sveriges klimatomställning och klimatpolitiska ramverk. www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomstallningen/sveriges-klimatarbete/sveriges-klimatmal-och-klimatpolitiska-ramverk/ Besökt 2023-11-20.

⁷ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2021). Powering the US Army of the Future.

⁸ Nordmark, I. (2021). El- och bränslecellsdrift inom massgodstransporter i städer och tätorter, ingår i Samverkansprogrammet för förnybara drivmedel och system - Sammanfattande projektresultat 2018-2021. https://f3centre.se/app/uploads/Sammanfattande-projektresultat_FDoS_2022_LR.pdf

⁹ Energimyndigheten 2020. Scenarier över Sveriges energisystem. ER 2021:6. www.energimyndigheten.se/statistik/prognoser-och-scenarier/langsiktiga-scenarier/

Klimatneutral Försvarsmakt¹⁰. Denna föregående studie hade starkt fokus på vad Försvarsmakten kan göra inom ramen för dagens befintliga system och i närtid, varför studiens rekommendationer inriktades på implementeringen av alternativa flytande drivmedel. Samtidigt framhölls att en rimlig utgångspunkt för Försvarsmakten bör vara att i så stor utsträckning som möjligt pröva samma bränslen som civilsamhället. I denna rapport tar vi därför fasta på den elektrifieringsprocess som pågår i civilsamhället, liksom trender mot hybridisering av nya militära system. Därför innehåller rapporten exempel från många olika tekniker och energibärare, så som batterier, vätgas och biobränslen. Rapporten syftar till att belysa logistikperspektivet i fråga om tänkbara framtida energisystem.

Denna första rapport inom studien kompletteras av nästkommande med titeln Omvärldsanalys – Energiteknik för ett framtida försvar. Den kommande rapporten utgör en teknisk genomgång av ett stort antal intressanta tekniker och koncept inom energiområdet och är planerad att publiceras juni 2024. Många av de exempel som tas upp i den första rapporten fördjupas i den andra.

1.2 Logistik och energisystem

Enligt IPCC definieras energisystem som ett system inkluderande alla komponenter involverade i produktion, omvandling, distribution och användning av energi.¹¹ Termen energisystem används också i andra sammanhang för att beskriva avgränsade system, exempelvis värmeflöden i en byggnad eller drivningen av ett fordon, vilket vi här refererar till som energisystem på mikro-nivå. Denna rapport fokuserar främst på makro-nivån. IPCCs definition innehåller i stora drag de fysiska komponenter som också brukar ingå i logistiksystem. Vi betraktar därför energisystem som en särskild typ av logistiksystem. Om logistiksystemet innehåller flera aktörer som utför olika förädlingssteg med transporter mellan sig brukar termen försörjningskedja användas. En försörjningskedja definieras av Mentzer mfl. som ”a set of three or more entities directly involved in the upstream and downstream flows of products, services, finances, and/or information from a source to a customer”¹². Vägen från råolja, via transport och förädling, till förbränning i en motor är alltså både ett energisystem, ett logistiksystem och en försörjningskedja.

Energi är dock inte vilken produkt som helst. Den kan omvandlas och ta olika skepnader, vilka vi refererar till som energibärare. Exempel på energibärare är diesel, el, vätgas eller annat som innehar energi som kan nyttiggöras, direkt eller via omvandling. Behovet hos slutanvändaren kan ofta tillgodoses genom många olika typer av energikällor och via olika energibärare. Det finns med andra ord en del som särskiljer energisystem från logistiksystem i allmänhet och en enande terminologi tycks saknas inom den vetenskapliga litteraturen. Vi ser därför ett behov av att utforska hur energisystem kan beskrivas i logistiska termer och vilka skillnader och likheter som finns mellan disciplinerna. Förhoppningen är att en enande syn på energisystem som en typ av logistiksystem ska underlätta tillämpning av teoretiska ramverk som idag används inom logistikstudier.

Inom Försvarsmakten idag finns både drivmedelsförsörjning för framdrift, el och reservkraft för anläggningar samt batterier och mindre energisystem för utrustning. Dessa system skiljer sig markant åt och ses därför oftast som olika energisystem. Inom logistikforskning betonas däremot ofta helhetssyn och det är vår förhoppning att detta perspektiv ska vara ett viktigt bidrag i designen av ett robust och fossilfritt framtida energisystem för Försvarsmakten.

¹⁰ Försvarsmakten (2023). Slutrapport av Studie GEM182004S Klimatneutral Försvarsmakt. FM2023-3555:2

¹¹ IPCC Sixth Assessment Report - Glossary search. <https://apps.ipcc.ch/glossary/>

¹² Mentzer, J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D & Zacharia, Z. G. (2001). Defining supply chain management. Journal of Business Logistics 2001 Vol. 22 Issue 2.

1.3 Syfte

Rapportens syfte är tredelat. Det övergripande är att skapa en grundförståelse för logistikens roll i energisystemet och överbrygga skillnader i terminologi mellan disciplinerna logistik och energisystem. Det andra är att ge läsaren en kunskapsbas inom energiområdet, och det tredje att formulera nyckelbegrepp eller utgångspunkter som ett logistiskt synsätt kan bidra med i Försvarsmaktens fortsatta arbete med energiomställning.

Målet är att personer som arbetar med energirelaterade frågeställningar inom försvarsmyndigheterna ska få ett logistiskt perspektiv på energifrågorna, samt att den som är verksam inom ett avgränsat delsystem ska få en utvidgad syn på energisystemet i stort. Rapporten riktar sig också till verksamma inom logistikområdet som vill applicera teorier därifrån inom energiområdet. Den utgör ingen heltäckande sammanställning av teknologier utan fokuserar på systemnivån, d.v.s. energisystemet och de logistiska förutsättningar som olika typer av energitekniker för med sig.

1.4 Metod

Rapporten är resultatet av ett explorativt arbete inom domänerna energisystem, energiteknik och logistik för militära tillämpningar. Den bygger på litteraturstudier inom nämnda områden, men gör inte anspråk på att vara allomfattande utan har ett brett upptag.

Datainsamlingen har utgått från Försvarsmaktens tidigare studier inom energiområdet, resultat från tidigare forskningsprojekt utförda av FOI samt rapporter från andra myndigheter. I synnerhet har slutsatserna från projektet Klimatneutral Försvarsmakt (GEM182004S) beaktats. För att kunna konkretisera och kvantifiera exempel på energitekniker har vi också i många fall inkluderat vetenskapliga artiklar inom specifika teknikområden. Läroböcker och grundläggande artiklar inom logistikområdet har utgjort en teoretisk bas.

Utifrån tillgänglig litteratur analyseras hur grundläggande terminologi inom logistik- och energiområdet länkar samman, genom att beskriva specifika karaktärsdrag för olika typer av energiförsörjningssystem. De exempel som lyfts fram har hämtats från både aktuella och framtida teknologier.

1.5 Läsguide

Kapitel 2 beskriver översiktligt det svenska energisystemet och gör även vissa bedömningar av framtidsläget utifrån bl.a. Energimyndighetens prognoser. Information om detta finns i lättillgänglig form på webbsidor hos olika myndigheter och företag. En delmängd av sådan information har sammanställts i denna rapport och hänvisningar kan med fördel nyttjas av den som vill fördjupa sin förståelse.

I kapitel 3 översätter vi den traditionella terminologin inom logistiksystem, till dess innebörd inom energisystem. Exempel har hämtats från så väl dagens energisystem som från framtida tänkbara lösningar för att konkretisera innebörden inom bland annat produktion, transport och lagerhållning.

Kapitel 4 beskriver Försvarsmaktens behov relaterat till olika energitekniker och tillämpningsområden.

I kapitel 5 diskuteras vidare möjligheter kring ett urval av de energilösningar som presenterats och slutligen, i kapitel 6, summeras de nyckelbegrepp och målsättningar som författarna anser bör ligga till grund för det fortsatta utvecklingsarbetet inom energiområdet.

2 Energisystem

2.1 Definitioner

Som nämnts i inledningen inkluderar ett energisystem på makronivå många olika delkomponenter och delsystem, vilka samverkar i olika typer av nätverk. De huvudsakliga energiflöden som går till slutanvändare idag, både inom Försvarsmakten och civilt, är drivmedel, el och värme.

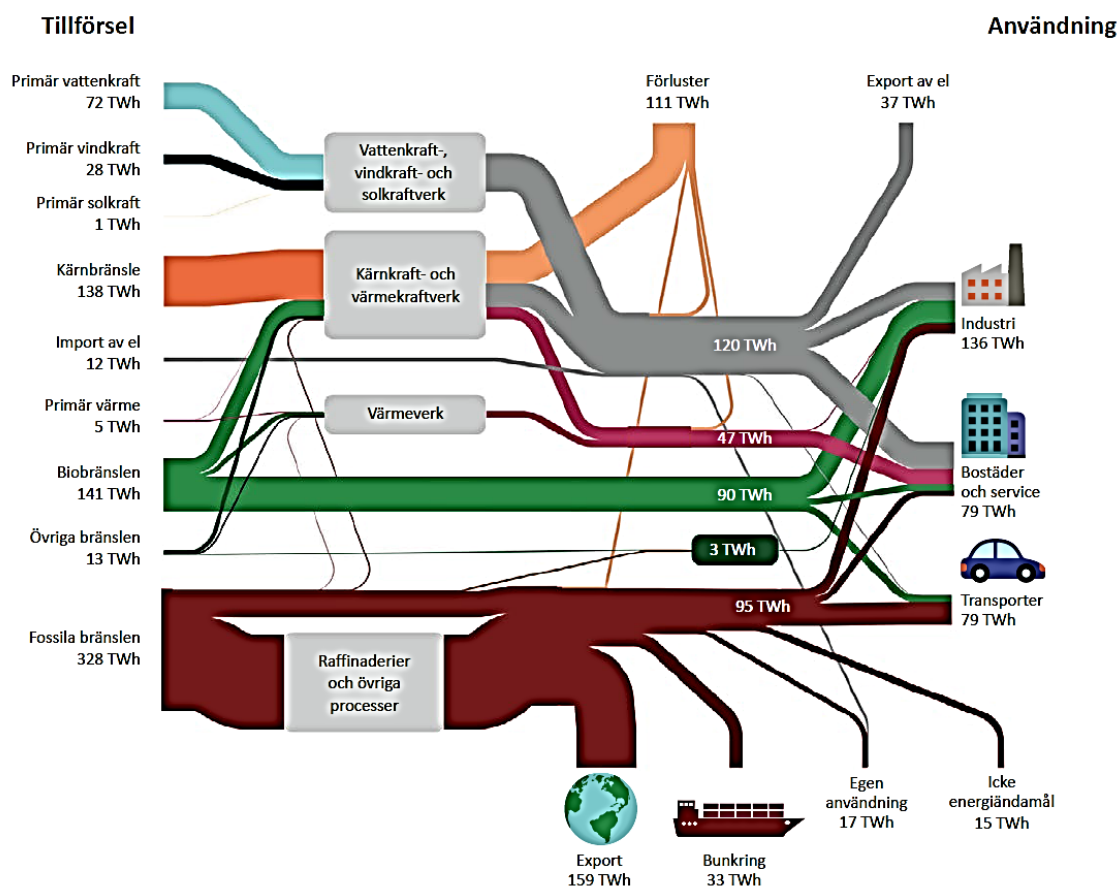
För detta projekt, med sikte på Försvarsmaktens framtida energiförsörjning, är en lämplig definition av Försvarsmaktens energisystem följande: Produktion, omvandling, distribution och användning av all energi som krävs för att tillgodose Försvarsmaktens behov. I distributionsbegreppet inkluderar vi här också nödvändig lagring av energi. Försvarsmaktens energisystem är en del av det svenska energisystemet, med gränssytor som kommer att diskuteras längre fram i detta kapitel.

2.2 Det svenska energisystemets nuläge och framtid

För att skapa sig en bild av vart utvecklingen är på väg är det värdefullt att ta avstamp i hur Sveriges energianvändning ser ut i dagsläget. En överskådlig bild av detta ges i Energimyndighetens rapport *Energiläget 2022*¹³ och summeras här.

År 2020 var energianvändningen i alla sektorer i Sverige 355 TWh. Den tillförda energin var större (508 TWh) eftersom det finns stora förluster i systemet, framförallt i produktionen av kärnkraft. Den tillförda energin kan också benämnas total energianvändning då även förlusterna räknas in. Av den energi som användes i sektorer var 120 TWh el (varav 37 TWh exporterades), 47 TWh fjärrvärme och 79 TWh användes för transporter (*Energiläget 2022*, Energimyndigheten). *Figur 1* illustrerar detta, inklusive uppdelning på olika sektorer. Energin till transporter bestod i sin tur av knappt 4 % el, 22 % biodrivmedel och 75 % fossila drivmedel. Bantrafiken stod för den största delen av elanvändningen inom transportsektorn.

¹³ *Energiläget 2022*, med energibalanser för år 1970-2020. Energimyndigheten 2022. ET2022:09.
www.energimyndigheten.se/statistik/energilaget/



Figur 1. Energitillförsel och energianvändning i Sverige 2020, TWh. Källa: Energimyndigheten¹⁴.

Detta läge är en viktig utgångspunkt då vi återkommer till att mycket väntas förändras de kommande 20 - 30 åren. Energimyndigheten tar vartannat år fram långsiktiga scenarier för energisystemet. Dessa är inte att betrakta som prognoser, men har ändå ambitionen att täcka in ett rimligt spann av olika utvecklingsscenarier, bland annat en kraftigt ökad elektrifiering inom industri- och transportsektorn. Värt att nämna är att elanvändningen beräknas öka i samtliga av rapportens scenarier till 2050, med mellan 40 - 95 %. Energianvändningen inom transportsektorn minskar däremot i takt med den ökade elektrifieringen eftersom eldrift är effektivare än förbränningsmotorer.¹⁵ I rapporten Framtidens elektrifierade samhälle ges ingående beskrivningar av hur elektrifieringen väntas påverka olika sektorer av samhället och de energipolitiska målen¹⁶.

Det är logistiskt sett stor skillnad på hur flytande drivmedel tillverkas och distribueras jämfört med elektricitet, men båda flödena är del av ett energisystem och kan ofta ersätta varandra för att tillgodose en användares behov.

Genom att beakta några parallella utvecklingar ser vi exempel på hur försörjningen av el och drivmedel alltmer länkas samman. Transporter elektrifieras samtidigt som robusthet i elsystemet får allt mer fokus i samhällsdebatten. Vehicle-to-grid konceptet (V2G) där elfordon kan stötta elnätet är en av flera nya möjligheter till reservkapacitet. Vi har alltså idag ett samspel mellan fordon och elnät, inklusive reservkraft, som behöver tas i beaktande vid utvärdering och vägval inom framtidens energiförsörjning i Försvarmakten.

¹⁴ Energiläget 2022, med energibalanser för år 1970-2020. Energimyndigheten 2022. ET2022:09. www.energimyndigheten.se/statistik/energilaget/

¹⁵ Energimyndigheten 2020. Scenarier över Sveriges energisystem. ER 2021:6. www.energimyndigheten.se/statistik/prognoser-och-scenarier/langsiktiga-scenarier/

¹⁶ Energimyndigheten 2021. Framtidens Elektrifierade samhälle. ER 2021:28. www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2021/ny-analys-fran-energimyndigheten-om-hallbar-elektrifiering/

Det finns många rapporter och studier om dagens och framtida energisystem. Många är inriktade på något av delsystemen för energi, exempelvis elförsörjningen¹⁷, men analyser av synergier mellan system för el, värme och transporter har bland annat gjorts av Mathiesen m.fl.¹⁸ applicerat på en dansk fallstudie.

2.3 Det svenska kraftnätet

Det svenska kraftnätet består av tre nivåer av nät: ett transmissionsnät (även kallat stamnät), regionalnät samt lokalnät. Dessa är sammankopplade för att överföra el från producenter till förbrukare. Transmissionsnätet överför el mellan landsändarna (normalt från norr till söder) och är även sammankopplat med det europeiska elnätet. Här är spänningen 220 – 400 kV för att minimera förlusterna. För transmissionsnätet ansvarar Svenska Kraftnät. De regionala näten transporterar elen från transmissionsnätet ut till de lokala näten och då är spänningen mellan 40 – 130 kV. Dessa nät ägs och förvaltas av fem regionnätägare. Kapillärerna i systemet är lokalnäten som ägs och förvaltas av fler än hundra olika elnätsföretag. Här är spänningen 230 V – 40 kV.¹⁹

Det finns ett stort behov av både underhåll och utbyggnad av transmissionsnätet för att möta en ökad efterfrågan på el från samhället och för att möta de förändringar som sker på tillförselsidan där en allt större andel av elen kommer från icke reglerbara källor, främst vindkraft. Elnätets robusthet är inte bara beroende av nätkapaciteten utan också av de avancerade styrsystem som används för att vid varje given tidpunkt skapa balans mellan tillgång och efterfrågan. Prissättning av elproduktion och så kallade stödtjänster är grundläggande för att detta ska fungera.²⁰

2.3.1 Lokala nät och ö-drift

En viktig aspekt i utvecklingen av framtidens elnät är att nyttja de enskilda hushållen både som producenter, av exempelvis sol-el, och för ökad flexibilitet i elanvändningen via pris-signaler. Inte bara hushåll utan också större lokala producenter av förnybar el kommer att vara viktiga i det framtida elnätet.²¹ Men produktion och uttag måste alltid balanseras och möjligheterna att styra dessa är begränsade, framför allt på en lokal nivå där väderförhållandena har stor inverkan. En möjlighet är då den framväxande tekniken med batterilagring för att skapa mer flexibilitet i lokala elnät²². Detta är ett sätt att täcka in toppar och jämna ut flödet av energi. Ett annat sätt är att utnyttja de möjligheter till flexibilitet som kan finnas hos användarna i nätet. Det kan även innebära att elfordon ställs till förfogande för att, vid behov, ladda ur el till nätet, en så kallad Vehicle to Grid-lösning (V2G).

Det är möjligt att skapa små lokala elnät som är anslutna till huvudnätet, men vid behov kan fränkopplas och drivas i så kallad ö-drift. Syftet med detta är att öka tillförlitligheten för användarna i det lokala nätet i situationer av effektbrist. Batteriet i ett lokalt nät är del av ett avancerat reglersystem som balanserar det lokala nätet, men kan också fungera som stödtjänst i det stora elnätet när näten är sammankopplade. Batteriet bidrar på så sätt till att möjliggöra en ökad andel icke-planerbar el i systemet.²³ Ett flertal demonstrationsprojekt med lokala nät har genomförts inom EU och visat på goda resultat. Ett hinder som lyfts för kommersiell implementering är dock den ekonomiska aspekten då batterierna är dyra i förhållande till sin kapacitet.²⁴

¹⁷ Cameron, D., & Svensson Dahlin, M. (2017). Analys av Sveriges framtida elsystem: utmaningar och lösningsområden.

¹⁸ Mathiesen, B.V., Lund, H., Connolly, D., Wenzel, H., Østergaard, P. A., Möller, B., Nielsen, S., Ridjan, I., Karnøe, P., Sperling, K., Hvelplund, F. K. (2015) Smart Energy Systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions.

¹⁹ Svenska kraftnät. www.svk.se/om-kraftsystemet/ Besökt 2023-05-30.

²⁰ Energimyndigheten (2018). Vägen till ett 100 procent förnybart elsystem - Delrapport 1: Framtidens elsystem och Sveriges förutsättningar. ER 2018:16.

²¹ Energimyndigheten (2018). Vägen till ett 100 procent förnybart elsystem - Delrapport 1: Framtidens elsystem och Sveriges förutsättningar. ER 2018:16.

²² Agnew, S., & Dargusch, P. (2017). Consumer preferences for household-level battery energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 609-617.

²³ Lallo, E., Fridsén Skogsberg, R., Ellis, H., Skarstind, M. (2023). Vätgasdrivna Reservkraftsystem En förstudie av vätgasens möjligheter för strömförsörjning av militära befästningar. FOI-R--5444--SE.

²⁴ InterFlex project summary, January 2017 - December 2019. (2020). <https://interflex-h2020.com>

2.4 Försörjningsnätverk för drivmedel

En mer abstrakt form av nätverk (jämfört med det bokstavliga kraftnätet) är de försörjningsnätverk eller försörjningskedjor som förser transportsektorn med flytande drivmedel. Det är här på sin plats att påpeka att även el har sitt ursprung i en försörjningskedja som krävt transporter på vägar och vatten av exempelvis biobränsle till ett kraftvärmeverk, uran till ett kärnkraftverk eller byggnadsmaterial till vindkraftverk.

Det finns i huvudsak två nät gällande drivmedel med relevans för detta sammanhang, ett nät inom Försvarsmakten som lagerhåller vissa drivmedel och transporterar fram dessa efter behov, och ett civilt försörjningsnät. Dessa nät startar utomlands, då Sverige inte har egna oljeplattformar eller liknande råvaruutvinning. En viss inhemsk produktion av biodrivmedel finns, och förutsättningar finns att öka den, men i dagsläget produceras även huvuddelen av biodrivmedel utanför Sverige²⁵. Raffineringen sker till viss del inom Sverige. Drivmedel transporteras sedan fram till olika stationer och lagerhålls i tankar tills det tankas in i fordon. Det innebär ett flöde och en omsättning av drivmedel som liknar el i att det är ett flöde av energi som lagerhålls kortare tid, dock längre relativt el.

Idag ingår två typer av biobaserade produkter i den diesel som säljs på bensinstationer i Sverige (så kallad MK1 diesel). Den ena av dessa produkter, FAME, har medfört problem med biologisk tillväxt i tankarna vid längre lagring, vilket kan orsaka igensättning av motorfilter. Detta gör MK1 diesel olämplig för Försvarsmakten som istället köper in diesel utan inblandning (B0) i ett eget flöde. Det andra biobaserade drivmedlet, HVO, har inte dessa problem utan lagringsegenskaper motsvarande B0-diesel²⁶. Alla flytande drivmedel (även B0-diesel) måste dock omsättas och hanteras vid längre lagring, vilket är en viktig utgångspunkt om man överväger storskaliga lagringslösningar för drivmedel som ett sätt att säkra försörjningen.

Bränsleceller är en ytterligare möjlighet, både för direkt fordonsdrift och som en möjlighet att alstra el i andra syften, exempelvis som reservkraft. Olika tekniker för bränsleceller skapar olika förutsättningar för logistiken. Vid användning av vätgas behöver logistiken planera för ett system där trycksatta tuber ska hanteras, vilket inte krävs för tekniken med Direkt-metanol-bränsleceller (DMFC), men vätgasdrivna bränsleceller alstrar i gengäld ca 5 gånger mer effekt än motsvarande metanoldrivna. Mycket forskning inom bränslecellsteknik har bedrivits på senare år^{27,28,29}. Vissa forskningsansatser har även riktats mot Försvarsmaktens energiförsörjning³⁰, där fältförsök med DMFC visat att Försvarsmakten skulle kunna använda sig av tekniken för att alstra energi, men att uteffekten är låg jämfört med traditionella bensen- och dieselgeneratorer.

2.5 Energiberäkningar

När man pratar om energiflödets effektivitet kan man avse olika saker och få varierande resultat beroende på vilka systemgränser som ställs upp. Väl definierade systemgränser är alltså avgörande för att beräkna energieffektivitet och avgör vad man får ut av beräkningarna. Ingen energiomvandling kan ske utan förluster och en vanlig betydelse av energieffektivitet är just att så lite energi som möjligt går förlorad då energin överförs och används

²⁵ Energimyndigheten (2021). Styrmedel för nya biodrivmedel – Behov och utformning av styrmedel för att främja produktion av biodrivmedel med nya tekniker. ER 2021:22

²⁶ Neste renewable diesel handbook. (2020) Neste.

https://www.neste.com/sites/default/files/attachments/neste_renewable_diesel_handbook.pdf

²⁷ Öberg, S., Odenberger, M., Johnsson, F. (2022). International Journal of Hydrogen Energy Vol. 47 Issue 1. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.035>

²⁸ Marocco, P., Ferrero, D., Lanzini A., Santarelli, M. (2022). The role of hydrogen in the optimal design of off-grid hybrid renewable energy systems Journal of Energy Storage. Vol. 46 <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103893>

²⁹ Arsad, A. Z., Hannan, M. A., Al-Shetwi, A. Q., Mansur, M., Muttaqi, K. M., Dong, Z. Y., Blaabjerg, F. (2022). Hydrogen energy storage integrated hybrid renewable energy systems: A review analysis for future research directions. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 47 Issue 39. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.208>

³⁰ Försvarsmaktens tekniska skola (2021). Slutrapport LOG212104SF - Fältförsök ny logistikteknik. FM2021-3144:5.

inom ett system. Det kan också (ofta i ett större livscykelperspektiv) syfta på kvoten av den energi som stoppats in i processen jämfört med den energi som till slut kan nyttiggöras.³¹

Det är i princip alltid önskvärt att minimera förlusterna i ett avgränsat energisystem, exempelvis en motor, ett kraftnät, eller en byggnad. Det är däremot inte alltid som energieffektiviteten i hela processen från råvara till användning är avgörande för valet av energilösning. Den mesta energi som produceras i ett kärnkraftverk är exempelvis värme som måste kylas bort, vilket ger en låg energieffektivitet men accepteras som en förutsättning för produktionen. Mer relevant i sådana sammanhang är livscykelanalyser som tar hänsyn till utsläpp av koldioxidekvivalenter och andra miljöaspekter från råvara till användning.²¹ Man kan också prata om energiåterbetalningstid, vilket vanligen används om förnybara energikällor som sol och vindkraft. D.v.s. hur lång tid det tar för en solcellsanläggning att producera lika mycket energi som det gått åt för att tillverka, transportera och driva den (i Sverige normalt ca 2-3 år)³².

Energitäthet i en energibärare är ett begrepp med stor betydelse för logistikkedjan. Energieffektiviteten i en elmotor är exempelvis betydligt högre än i en förbränningsmotor. Elfordonet har förutsättningar att vara ett mycket energieffektivt system förutsatt att elen som laddas in i batteriet producerats och överförs på ett effektivt sätt.³³ Men den låga energitätheten i batterier gör ändå att räckvidden för elfordonet blir mer begränsad än om det drivs med flytande drivmedel, vilket kan medföra att man tvingas välja en mindre energieffektiv lösning. Idag kan ett litium-jon-batteri ha en energitäthet på upp emot 250 Wh/kg³⁴, att jämföra med dieselbränslen som ligger runt 12 000 Wh/kg. Nya batteritekniker kan dock komma att möjliggöra större lagringskapacitet och effektuttag.

Ett exempel på ett energiflöde med en hög effektivitet och låga förluster är en solcell som laddar in likström till ett batteri som i sin tur matar likström till en radio. Av den energi som solcellen producerar kan en mycket hög andel nyttjas.³⁵

Men det är i slutänden funktionen man vill uppnå som avgör valet av energilösning, varför funktionen måste tydliggöras. Exempel på kriterier för energilösningar skulle kunna vara följande, där den generella logistiska termen enligt Kress terminologi³⁶ anges inom parentes: prestation, lagringsbarhet (tillgänglighet), tillförlitlighet (robusthet), (flexibilitet), hanterbarhet (enkelhet), lokal och global miljöpåverkan, ekonomisk effektivitet och energieffektivitet (effektivitet). Liknande utvärderingskriterier har tidigare använts inom Försvarsmakten bl.a. inom studien LOG212104SF - Fältförsök ny logistikteknik.³⁷

³¹ Dinçer, I. & Erdemir, D., 2023. Introduction to Energy Systems. John Wiley & Sons.

³² www.energimyndigheten.se/fornybart/solelportalen/lar-dig-mer-om-solceller/solcellers-miljopaverkan/ Besökt 2023-03-20

³³ Albatayneh, A., Assaf, M. N., Alterman, D. & Jaradat, M. 2020. Comparison of the Overall Energy Efficiency for Internal Combustion Engine Vehicles and Electric Vehicles. Environmental and Climate Technologies 2020, vol. 24:1, sid. 669–680.

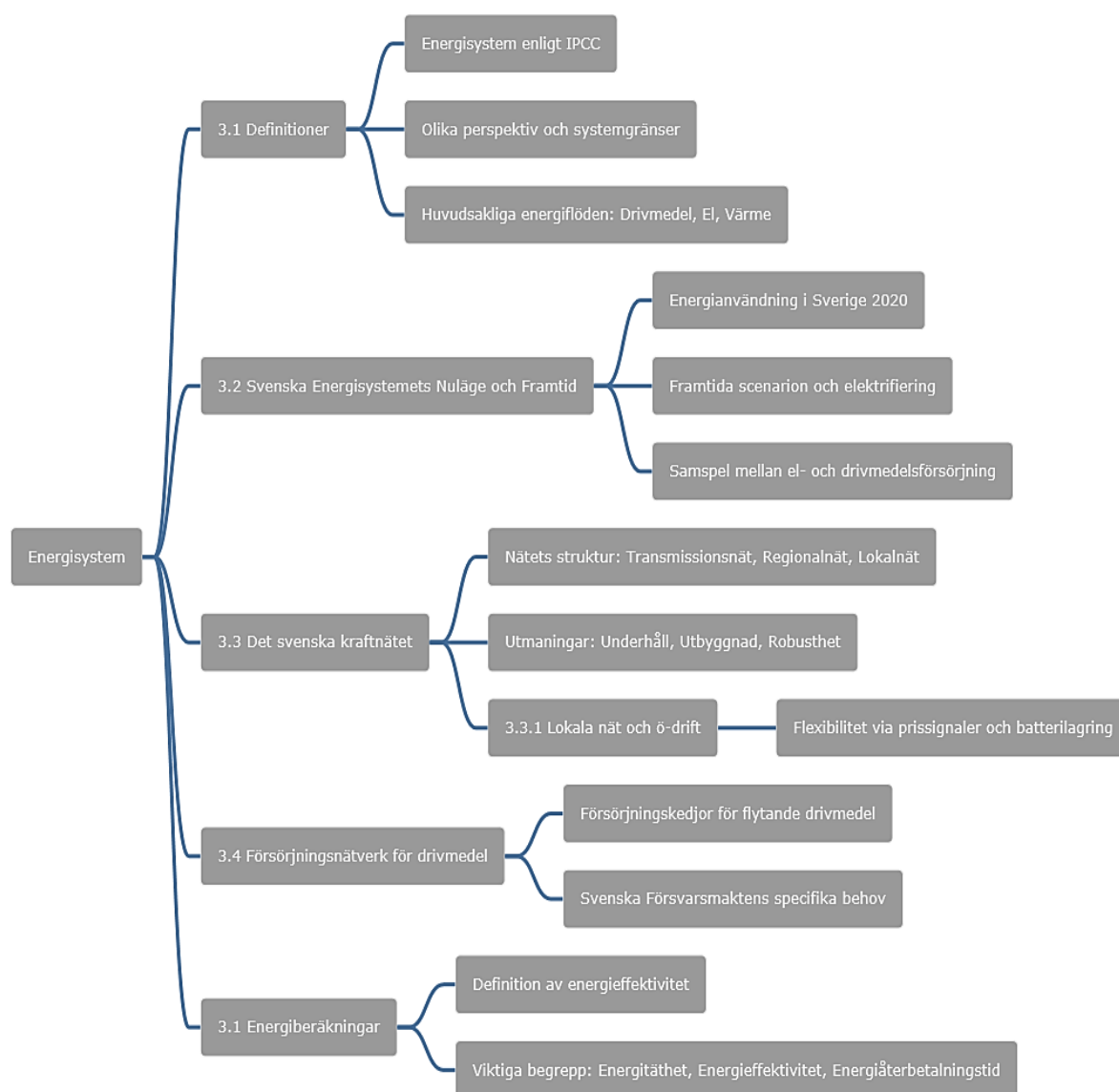
³⁴ Monteza, D. & Sakelis, V. 2022. State of the Art inom batteriproduktion. Examensarbete KTH. www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1664069/FULLTEXT01.pdf

³⁵ Försvarsmakten, 2021. Slutrapport LOG212104SF - Fältförsök ny logistikteknik, FM2021-3144:5.

³⁶ Kress, M. 2016. Operational Logistics: The Art and Science of Sustaining Military Operations. 2nd. edn. Springer International Publishing.

³⁷ Försvarsmaktens tekniska skola (2021). Slutrapport LOG212104SF - Fältförsök ny logistikteknik. FM2021-3144:5.

2.6 Grafisk sammanfattning av kapitel 2 – Energisystemet



Figur 2. Grafisk sammanfattning av kapitel 2 – Energisystemet

3 Logistiksystemets delar

I planering och styrning av försörjningskedjor är värdeskapande för slutkunden ett centralt perspektiv³⁸. I fråga om utveckling av energisystem för Försvarsmakten kan det därför vara en hjälp att definiera de funktioner som man önskar uppnå med systemet. Vad ska energin användas till? Här kan exempelvis listas: framdrift av farkoster, drift av alla typer av el-drivna system så väl rörliga plattformar som stationär infrastruktur, samt uppvärmning. För olika tillämpningar ställs olika krav som kan beskrivas i termer av robusthet, mobilitet (påverkas t.ex. av volymvikt och energiinnehåll), signatur, kostnad m.m. Denna typ av kravställningar bör vara utgångspunkten för planeringen av energisystemet. Klart är att det finns många olika alternativ för att tillgodose behoven.

Produktion, lager, transport och kund är delar som brukar ingå i ett logistikflöde (ofta även informations- och betalningsflöden). I fråga om försvarsverksamhet är det ofta mer tillämbart att prata om användare än om kunder, i synnerhet då specifika delar avses snarare än Försvarsmakten som helhet. I en försörjningskedja sker förädling i olika steg med transportflöden och lagring däremellan, från råvaruutvinning till slutanvändning. För energisystem nämns ofta ”from well to wheel” som ett uttryck för hela försörjningskedjan. Här följer en beskrivning av hur de olika delarna kan förstås kopplat till just energisystem.

Vi har här valt att utgå från användaren och beskriva flödet uppströms för att poängtera vikten av att utgå från behovet när ett flöde ska planeras. Det går dock inte att generalisera energiflöden som vare sig push (produktionsstyrda) eller pull (efterfrågestyrda) då området är brett och båda systemen kan förekomma inom en och samma försörjningskedja.

3.1 Användaren

Att skapa värde för en användare kan i detta sammanhang översättas med att skapa förmåga hos Försvarsmakten. Detta kan brytas ner till olika delfunktioner, exempelvis att skapa mobilitet, vilket i sin tur kan brytas ner till funktionen att få enskilda fordon att fungera. Detta räcker dock inte som kravbild utan användarens alla önskemål måste beskrivas ingående gällande vad fordonet ska klara av, d.v.s. vilken driftstid man behöver ha, under vilka klimatförhållanden som fordonet måste kunna drivas, krav på lågt signalvärde i form av värme etcetera. Bland användarens krav finns också klassiska logistiska aspekter så som robusthet, tillgänglighet och flexibilitet. För att ta fram ett system som uppfyller användarkraven behöver alla delar i logistikkedjan ses över. Det gäller också att beakta i vilken utsträckning Försvarsmakten är en del av marknaden i stort, och i vilken utsträckning behoven skiljer sig från andra kunders på marknaden.

Planeringen för det civila elnätet indikerar att det i framtiden kommer läggas allt större vikt vid användarflexibilitet³⁹, något som skulle kunna bli ett problem för Försvarsmakten då man har ett stort behov av att få ut effekt när behov uppstår. Risken för effektbrist kan komma att motivera fram egna lösningar. Försvarsmakten är dock långt ifrån ensamma om att ha en verksamhet med kritiska behov av el, utan detta gäller många områden inom totalförsvaret⁴⁰. Utifrån den insikten kan samverkan vara en möjlig väg att hitta resurseffektiva, men ändå tillfredsställande, gemensamma lösningar med andra aktörer. Även inom Försvarsmakten är det relevant att fundera över var det finns synergier mellan energibehoven hos de olika försvarsgrenarna.

³⁸ Mattsson, S. A. (2002). Logistik i försörjningskedjor. Studentlitteratur AB.

³⁹ Uppdrag att främja ett mer flexibelt elsystem. Regeringsbeslut I2022/01578. 2022-08-04.
www.regeringen.se/contentassets/8a55a8d9263e4969b6aa14f22ec44b14/uppdrag-att-framja-ett-mer-flexibelt-elsystem/

⁴⁰ Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. 2009. *Faller en - faller då alla?*
www.msb.se/siteassets/dokument/amnesomraden/krisberedskap-och-civilt-forsvar/stod-i-att-analysa-beroenden/faller-en---faller-da-alla.pdf.

3.2 Lagerhållning

Lager är möjligheten att hålla energi tillgänglig i väntan på förbrukning eller vidare transport. I verkligheten innebär detta ofta ett bergrum med drivmedel, en bensinstations tankar eller en parkerad tankbil i terrängen. Batterilagring är en förutsättning i batterielektriska fordon (BEV) liksom det är en förutsättning för att stabilisera ett lokalt elnät. Omvandling av el och vatten till vätgas är ett annat sätt att skapa lagringsbarhet av en energibärare som senare via bränsleceller kan omvandlas till el. Energiförlusterna i varje omvandlingssteg, liksom under själva lagringen, måste dock beaktas i planeringen. Förutom att energi lagrhålls i exempelvis ett batteri behöver även batterierna i sig lagrhållas. Lagerhållning innebär alltså att något fysiskt objekt, såsom ett batteri eller behållare för drivmedel, har en potentiell energi som kan nyttjas vid ett senare tillfälle.

Det generella systemet för el (via det svenska elnätet) innebär att produktion och användning sker momentant och att lagring endast sker i form av råvara (exempelvis vatten i dammar). Viss lagring och balansering med hjälp av batterier behövs dock som stödsystem. Formerna för distribution av el skiljer sig på detta sätt från traditionella försörjningskedjor och utmaningarna med att lagrhålla el i stor skala är betydande.

Med dagens teknik är det svårt att lagra stora mängder energi i batterier eftersom de har en låg energitäthet. Energitätheten i förhållande till vikt (viktdensiteten) är exempelvis omkring 45 gånger högre i diesel jämfört med tillgängliga litiumjonbatterier och motsvarande siffra för volymdensiteten är ca 15 gånger högre⁴¹. Volymdensiteten är ofta det som är avgörande för batterier liksom många andra energibärare. Jämförelsen med diesel blir dock något missvisande då den inte tar hänsyn till att batteriets energi är redo att användas direkt vid inkoppling, medan ett flytande bränsle behöver blandas med syre (luft) för att utvinna den lagrade energin, samt att bara ca 40 % av energiinnehållet i dieseln kan nyttjas av en förbränningsmotor. Nya batteriteknologier är på frammarsch, även om litium-jon-batteriet fortfarande dominerar⁴². Det finns också en bredd av lösningar inom olika nischade områden. Exempelvis kan batterier som ska verka utan tillsyn under många år, på avlägsna platser, kontinuerligt laddas upp genom den låga energin från radioaktivt sönderfall^{43,44}.

Att matcha den höga energitätheten i fossila bränslen är en utmaning för många fossilfria bränslen. Dock är skillnaden i energitäthet per liter mellan förnybar HVO (Hydrerad Vegetabilisk Olja) och fossil diesel knappt 6 %, och även här bör man beakta hur väl energin kan tas till vara vid förbränningen, vilket brukar minska skillnaden ytterligare mellan HVO och diesel. Per viktenhet är HVO något energitätare och det föreligger inte någon märkbar skillnad i lagringsegenskaper.⁴⁵

Det finns exempel på att använda metallpulver⁴⁶ för förbränning i syfte att generera vätgas och/eller el, vilket skapar möjlighet att lagra metallpulver, som har en mycket hög energidensitet och lagringsbarhet. Således finns det många olika lagringsmöjligheter i ett flexibelt energiflöde.

⁴¹ Cao, W., Zhang, J. and Li, H. Energy Storage Materials 2020 Vol. 26 Pages 46-55.
<https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.12.024>

⁴² Kim, T., Song, W., Son, D. Y., Ono, L. K., & Qi, Y. 2019. Lithium-ion batteries: outlook on present, future, and hybridized technologies. Journal of materials chemistry A, 7(7), 2942-2964.

⁴³ Park, J. 2017. Review and Preview of Nuclear Battery Technology.
<http://large.stanford.edu/courses/2017/ph241/park-j1/>

⁴⁴ Bocharov, S. N., Isakov, A. I., Petrov, Y. Y., Orekhova, K. N., Dementeva, E. V., Burakov, B. E., & Zamoryanskaya, M. V. (2021). Study of radioluminescence and cathodoluminescence of artificial diamond single crystals as prospective durable core material for nuclear electric batteries. Diamond and Related Materials, 120, 108658.

⁴⁵ Neste 2020. Neste renewable diesel handbook.
https://www.neste.com/sites/default/files/attachments/neste_renewable_diesel_handbook.pdf

⁴⁶ Ellis, H. Sahlén, W. Pastuhoff, M. Skarstind, M. 2022. Energilagring för reservkraft - Flödesbatterier och metallförbränning som energilagring för bergrum. FOI-R--5259--SE

Den önskvärda lösningen vore ett enhetsbränsle som kan lagras enkelt och länge, och nyttjas av alla. Dock verkar detta inte finnas, och lär inte heller finnas inom en nära framtid. I stället ser vi en stor bredd av energilösningar växa fram för att hantera olika behov.⁴⁷

3.3 Transport av energi

Detta stycke riktar sig mot transporter av energi från produktion till användare (där användningen i sig mycket väl kan vara en transport). Transporter kan ske i omgångar genom att en tankbil kör fram drivmedel, eller en lastbil kör fram batterier. Det går att tänka sig en lastbil som producerar el genom exempelvis bränsleceller packade i lastbilen och på så sätt fungerar som en rullande powerbank. Vanliga transportfordon och andra typer av militära fordon skulle även kunna användas för att tanka ur reservkraft i det fall förbandet anses behöva energin mer än fordonet, så kallade vehicle to grid-lösningar (V2G)⁴⁸. Men transport kan även ske kontinuerligt i kabel för el, slang för vätska, eller rör för gas.

Jämförelser av olika lösningars ekonomiska och operativa effektivitet (motsvarande engelskans efficiency och effectiveness) kommer att behöva göras för olika transportlösningar.⁴⁹ Det kan exempelvis gälla alternativen att lägga ner rör för vätgas till en tankstation jämfört med att köra tankbilar eller att utvinna energin direkt på förbrukningsplatsen för att minimera transporterna.

Olika energibärare ställer olika krav på logistiken och medför olika risker (både beträffande försörjningstrygghet och direkt säkerhet). Det kan exempelvis röra sig om system för hantering och transport av trycksatta behållare för vätgas eller om att säkerställa att rätt kompetens finns tillgänglig för att kunna hantera spänning i ett elnät (även hos mottagaren).

Ett flöde kan ske i många steg och det är viktigt att också planera för själva leveransen av energin liksom hanteringen vid lagerpunkter. Om ett fordon ska kunna tankas i terrängen behöver exempelvis rätt munstycken och liknande utrustning finnas tillgänglig. Det är en logistikuppgift i sig att säkerställa hanteringen i alla noder mellan vilka transport av olika slag sker.

I fråga om el som energibärare finns det fysiska kraftnät för transport. Att öka robustheten i nätet, så att störningar på ett fåtal noder inte slår ut stora delar av nätet är angeläget. Ett liknande synsätt bör tillämpas på logistiknätverk med andra typer av energibärare. I det fall det finns endast en möjlig transportör som kan köra en specialtransport med energi blir systemet känsligt, oavsett om det finns alternativa vägar att köra på. Robusthet handlar både om att fysiskt skydda noder, länkar och styrsystem och att minimera konsekvenserna om något slås ut. Begreppet resiliens används ibland överlappande med robusthet, men inom resiliensbegreppet poängteras vikten av att snabbt kunna åtgärda problem tydligare.

3.4 Produktion

Strikt taget är det vi kallar energiproduktion alltid en omvandling, men det är dock relevant att skilja ut det första steget i omvandlingsprocesserna från naturens råvaror, vilket vanligen brukar kallas primär energiproduktion, utifrån primära energikällor (vatten, vind, sol, bioråvara, olja, kol, naturgas eller uran). Utifrån dessa primära energikällor kan energin omvandlas till exempelvis flytande drivmedel, el, eller vidare från el, vatten och koldioxid till vätgas. Omvandlingar kan göras i många steg och kan i vissa fall även reverseras, dock alltid med större eller mindre energiförluster i varje omvandling.

När en dieseldriven generator används för att producera el till en verksamhet är detta ett sekundärt produktionssteg som sker nära användaren, men försörjningskedjan sträcker sig

⁴⁷ Ellis, H. Pastuhoff, M. (2021). Energisystem för robust energiförsörjning. FOI-R-500-SE.

⁴⁸ Lallo, E., Fridsén Skogsberg, R., Ellis, H., Skarstind, M. (2023). Vätgasdrivna Reservkraftssystem En förstudie av vätgasens möjligheter för strömförsörjning av militära befästningar. FOI-R--5444--SE.

⁴⁹ Kress, M. (2016). Operational Logistics: The Art and Science of Sustaining Military Operations. 2nd. edn. Springer International Publishing.

mycket längre än så, vilket har betydelse då ett robust system för energiförsörjning ska designas. Flytande drivmedel kräver vanligtvis import av råvaror. Många gånger sker även förädling utomlands. Stora avstånd och överskridande av nationsgränser ökar generellt både krav och risker i logistikkedjan. Det finns dock exempel på flytande drivmedel, exempelvis metanol, där produktion och förädling sker inom nationen. Att både primär och sekundär energiproduktion kan avses gör det viktigt att differentiera vilken typ som åsyftas.

El är en speciell vara sett ur ett logistikperspektiv, då den normalt produceras och förbrukas simultant i via kraftnätet. Något som dock kräver diverse stödtjänster och lagring av råvaror för att fungera. En fördel är att produktionen normalt är inhemsk och även kan vara mycket lokal. Exempelvis kan solpaneler direkt driva mindre energikrävande elektronik. Det är också möjligt att skapa lokala elnät som kan drivas utifrån olika lokala energikällor (se kapitel 2.3). Elproduktion (omvandling från ett energislag till ett annat) kan inte ske utan förluster, normalt i form av värme. Det gäller såväl solpaneler som generatorer av olika slag. Dock är värmeutvecklingen vid alstrande av el från batterier, solpaneler eller bränsleceller minimal i jämförelse med den från förbränningsmotorer, vilket kan ha betydelse för valet av drivsystem i operativa fordon där man önskar en låg värmesignatur.

För valet av produktionsalternativ har det stor betydelse om målsättningen är att finna möjligheter att nyttja förnybara primära energikällor, säkerställa möjligheter till lokal elförsörjning (från primära och sekundära, förnybara och fossila energikällor) eller båda delarna.

Energiproduktion är starkt sammankopplad med säkerhetspolitik, vilket ställer krav på riskbedömningar av de aktörer som ska producera kritiska drivmedel för svenskt försvar och de transportflöden som man förlitar sig på. Synen på energi, ofta i form av drivmedel, som en kritisk och strategisk tillgång, delas med Nato.⁵⁰

3.5 Logistik- och energiterminologi

Det är tydligt att det finns många gemensamma nämnare mellan energisystem och logistiksystem, vilket är naturligt då energisystem kan ses som en specifik variant av ett logistiksystem. Skillnaderna blir som tydligast i fråga om kraftnät där produktion och användning sker momentant, men även inom andra områden finns skillnader. Begreppen energibärare och omvandling är centrala eftersom effektiv lagring och transport kan kräva omvandling.

Begreppen robusthet, flexibilitet och tillgänglighet är gemensamma inom båda domänerna, men inom energiområdet har också det mer allomfattande begreppet energisäkerhet växt fram och fått spridning inom den vetenskapliga litteraturen. Begreppet används ofta på nationell eller global nivå och kan innefatta många olika dimensioner, exempelvis ekologisk, teknologisk, politisk, ekonomisk och militär energisäkerhet. Den stora bredden av områden som skapar energisäkerhet demonstrerar tydligt komplexiteten i att bygga långsiktigt robusta energisystem.⁵¹

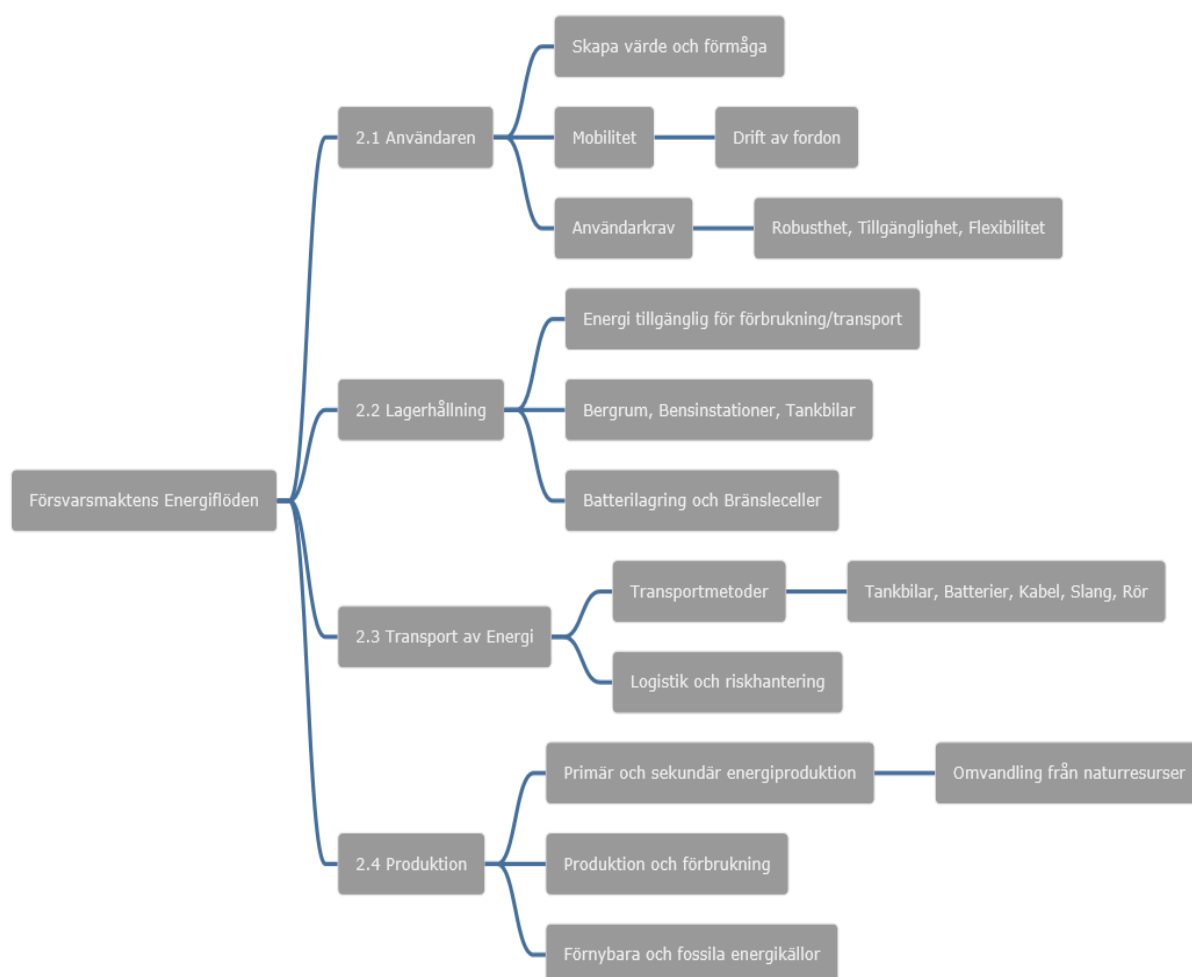
⁵⁰ Jonsson, D., & Veibäck, E. (2020). Nato och svensk civil beredskap – Ett kunskapsunderlag med fokus på NATO Baseline Requirements och svensk energiförsörjning. FOI-R--4937--SE.

⁵¹ Azzuni, A. & Breyer, C. (2018). Definitions and dimensions of energy security: a literature review. WIREs Energy and Environment 2018 Vol. 7. Issue 1.

Tabell 1. Summering av begrepp inom logistiksystem och energisystem.

	Begrepp logistiksystem	Begrepp energisystem
Användare	Kund Kundvärde	Förbrukare Måluppfyllelse, förmåga
Lagring	Kvalitetsförluster Vikt och volymdensitet	Energibärare Ev. behov av omvandling Energiförluster Energitäthet, vikt och volymdensitet
Transport	Transportmedel Vikt och volymdensitet Energiförbrukning	Transportmedel, elnät Energibärare Vikt och volymdensitet Energiförluster
Produktion	Primära/sekundära råvaror Produktion Energiförbrukning (Lokal), nationell, global	Primära/sekundära energikällor Omvandling Energiförluster Lokal, nationell, global
Övergripande	Resiliens, flexibilitet, tillgänglighet	Resiliens, flexibilitet, tillgänglighet Energisäkerhet

3.6 Grafisk sammanfattning av kapitel 3 – Logistiksystemets delar



Figur 3. Grafisk sammanfattning av kapitel 3 – Logistiksystemets delar.

4 Försvarsmaktens olika typer av användarbehov

Utgångspunkten för planering och beräkningar inom logistik är de behov som kan identifieras i verksamheten. Därefter byggs ett flöde upp och utifrån detta skapas ett nätverk som kan upprätthålla flödet. På samma sätt kommer behovet styra energiförsörjningen. Här har de olika typerna av behov grovt delats in i utrustning (personlig utrustning och dylika mindre lösningar som idag använder el), i farkoster (som representerar större behoven av energi) samt i anläggningar.

4.1 Energibehov för personlig utrustning

Storleken på energibehovet för en viss applikation är ofta avgörande för valet av energilösning och det är stor skillnad på de relativt begränsade behoven som gäller personlig utrustning och tekniska stödsystem, t.ex. radioapparater och datorer, jämfört med framdrift av farkoster. Batterier av olika slag blir ofta fördelaktiga alternativ för denna typ av utrustning och förnybara energikällor som sol kan vara attraktivt, trots begränsningar i effektuttag och planerbarhet, om energin kan lagras eller vara ett komplement till andra energikällor.

En trend mot mer elförbrukande utrustning har kunnat ses och det är rimligt att anta att den kommer att fortsätta. Detta trots att medvetenheten om energieffektivisering växt inom exempelvis it-området och bromsar ökningen inom vissa tillämpningar. Ett exempel på ett relativt nytt elförbrukande område är drönare, vars batterier måste kunna laddas.

4.2 Energibehov för farkoster

En stor och viktig fråga är hur olika typer av farkoster kommer att drivas i framtiden. Kommer det att ske med flytande drivmedel såsom idag i förbränningsmotorer, med gas eller direkt med el? Denna fråga är svår att besvara och resultatet lär bli en flexibel lösning där olika varianter kan hanteras, samt ändras efterhand som teknikutveckling kommer ikapp behovet.

Följande exempel illustrerar hur en farkost påverkar och kan påverkas av energiflödets olika möjligheter och utmaningar redan i designfasen av farkosten. Idag används förbränningsmotorer med diesel eller gasturbinmotorer, i olika varianter beroende på farkost. Dock finns varianter, såsom ubåtarna i ubåtsklassen Blekinge, där förbränningsmotor och gasturbinmotorer driver en elgenerator, som i sin tur försörjer elmotorer. Dagens dieselförsörjning innebär utländska råvaror (ofta även raffinering utomlands), lagerhållning och transport inom landet, och sedan sker eventuellt en blandning innan tankning av farkoster. De stora problemen är då dels att råvaruproduktionen är svår att säkerställa, då den sker utomlands, dels miljöproblemen med förbränning av diesel i sig och dels risken att lagstiftning (till följd av miljöproblem) i framtiden förbjuder användning av diesel. Även om dessa aspekter skulle kunna bortses ifrån (under förutsättning att Försvarsmakten får fortsatt dispens), tillkommer problem i de bakre delarna av Försvarsmaktens logistikkedja. Där finns ett beroende av civila fordon, vilka i framtiden sannolikt inte kommer att köras på fossila bränslen utan kanske på el. Även dessa måste kunna fungera i logistikkedjan som helhet och energiförsörjas. Det innebär att intern laddinfrastruktur kommer att vara en viktig fråga för försvarsmakten att driva. Det innebär också att utvecklingen av civila elfordon och den bakomliggande batteritekniska utvecklingen kommer att vara av fortsatt intresse för Försvarsmakten att följa.

Målet med farkostdriften är vanligen primärt framdriften, dvs. att omvandla energi till mekaniskt arbete. En sekundär förmåga, om än betydelsefull, är att energiförsörja radioapparater och annan stödutrustning efter behov. Det finns alltså ett visst behov av el specifikt också i farkosterna. En elmotor är också ett effektivt sätt att tillfälligt skapa ett högt drivmoment

och därmed god accelerationsförmåga för tunga farkoster, vilket innebär att en kompletterande elmotor kan öka prestandan hos en tung farkost. Detta, i kombination med minskat värmesignalement vid eldrift, väntas vara en viktig drivkraft mot en hybridisering av operativa militära fordon.⁵²

4.3 Energibehov för anläggningar

Inom kategorin anläggningar inkluderas allt ifrån ett regemente till en enskild bunker med utrustning som kräver el. Det kan också röra sig om tillfälliga anläggningar varför behoven varierar stort. Robusthet och effektivitet är dock, så gott som alltid, grundläggande målsättningar för energiförsörjningen till anläggningar. För hemliga anläggningar är det också väsentligt att minimera både värmesignatur och antalet påfyllnadsleveranser som krävs för driften. För en sådan anläggning, som vid normaldrift är ansluten till det nationella kraftnätet, kan vätgasgenerering komma att bli en gynnsam lösning för att upprätthålla ett ständigt lager av reservkraft i händelse av strömavbrott. Studier inom detta område pågår.⁵³

Arbete pågår också med att tillföra egen förnybar energiproduktion i form av solcellsanläggningar. Fortifikationsverket har identifierat 16 platser som intressanta för sådan utbyggnad och har för närvarande solcellsparker etablerade på sin mark i Skövde och Såtenäs. Kravställning vid upphandling har också stor betydelse för att minska klimatavtrycket från anläggningar, både under byggnation och användning.⁵⁴ En viktig fråga är hur robustheten i energiförsörjningen till anläggningar kan säkerställas i händelse av kris eller krig. Möjligheten till lokala nät för elförsörjning diskuteras vidare i kapitel 5.

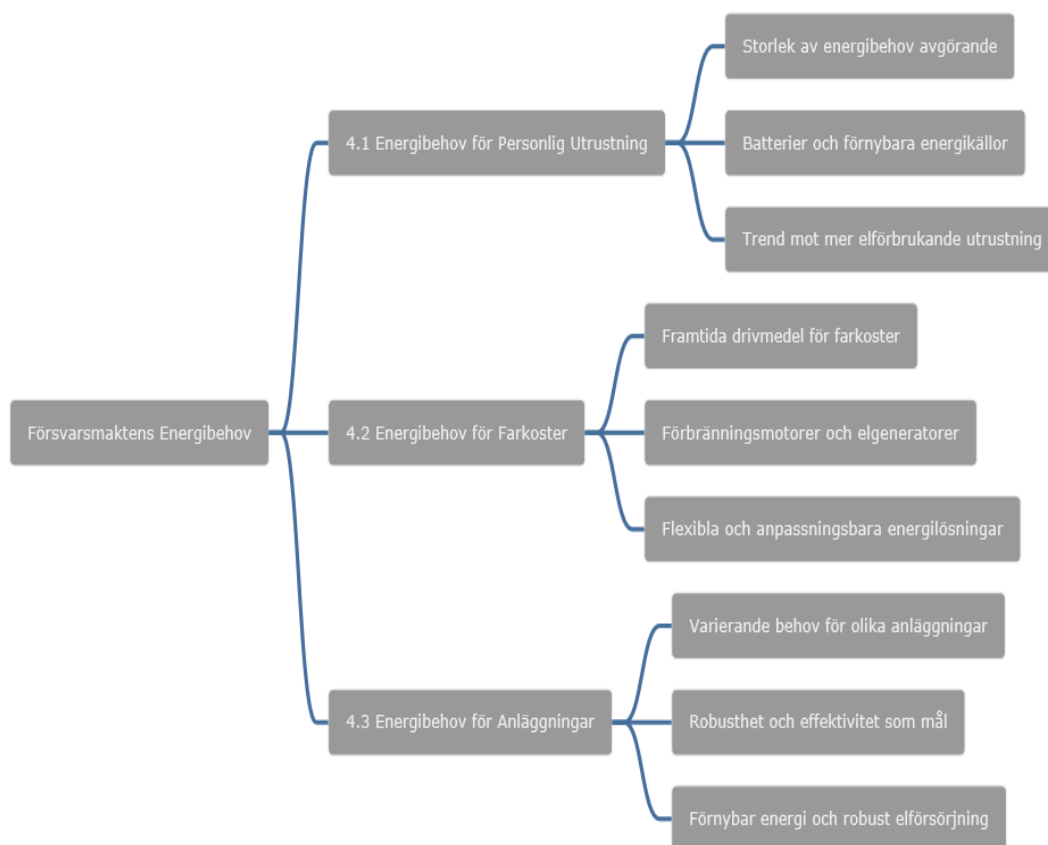
Vi ser ett stort behov av samsyn mellan energilösningar för anläggningar, transporter och operativa system, vilket kan illustreras genom följande scenario: Antag att stabil elförsörjning för ett regemente kan uppnås, även under krig, genom lokalt tillgängliga energikällor, lagringskapacitet och ett lokalt kraftnät. Transporter sker till stor del med elektrifierade fordon eller hybridfordon och bland de operativa systemen finns både eldrift, hybriddrift och dieseldrift. Regimentet får därmed möjlighet att energiförsörja både framåt och bakåt, d.v.s. fungera som energihubb. Frågan är dock om energiresurserna räcker och, i annat fall, hur olika användare ska prioriteras. Scenariot illustrerar också vikten av att de olika energibehoven i fredstid och i krig beaktas som utgångspunkt i framtagandet av energilösningar.

⁵² National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2021). Powering the US Army of the Future. <https://www.nationalacademies.org/our-work/powering-the-us-army-of-the-future>.

⁵³ Lallo, E., Fridsén Skogsberg, R., Ellis, H., Skarstind, M. (2023). Vätgasdrivna Reservkraftsystem En förstudie av vätgasens möjligheter för strömförsörjning av militära befästningar. FOI-R--5444--SE.

⁵⁴ Fortifikationsverket. (2023) Hållbar utveckling. <https://www.fortifikationsverket.se/hallbarhet/hallbar-utveckling> Besökt 2023-12-06.

4.4 Grafisk sammanfattning av kapitel 4 – Försvarsmaktens olika typer av energibehov



Figur 4. Grafisk sammanfattning av kapitel 4 – Försvarsmaktens olika typer av energibehov.

5 Möjliga lösningar för en framtida energiförsörjning som svarar mot Försvarsmaktens behov

Följande kapitel diskuterar möjligheter att åstadkomma en effektiv framtida energiförsörjning baserat på de behov som hittills beskrivits och logistiska möjligheter att försörja dessa behov. Avsnitt 5.1 och 5.2 belyser två olika koncept för elförsörjning inom anläggningar och av utrustning som inte är inriktad på transport. Avsnitt 5.3 beskriver lösningar för funktionsområdet farkoster. Slutligen, i avsnitt 5.4, beskrivs synergier mellan dem.

Ett logistiskt synsätt innebär helhetssyn på energisystemet. I linje med detta vill vi framhålla att för samtliga beskrivna energisystem behövs, förutom energibärare och energiteknik, även människor med rätt kompetens som kan sköta driften och underhålla tekniken.

5.1 Försvarsmakten i solitär elförsörjning

En inriktning mot solitär elförsörjning innebär att Försvarsmakten sätter upp egna nät för varje lokalt regemente, bunker eller annat avgränsat militärt område. Dessa nät kan drivas fristående i så kallad ö-drift. Anläggningarna kan vara kopplade till det nationella kraftnätet i normalläget, men det finns också anläggningar som är hemliga, perifera eller mobila, där driften alltid måste ske lokalt. För att ö-drift ska vara möjligt måste den el som förbrukas inom ett lokalt nät kunna produceras direkt i anslutning till nätet och någon form av lager som garanterar en kalkylerad minimidriftstid bör hållas på plats. Detta kan lösas på många olika sätt, exempelvis via en tank med diesel, som dock måste omsättas eller hanteras inom den tillåtna lagringstiden. För anläggningar som drivs i konstant ö-drift innebär motsvarande diesellösning att påfyllnad måste göras regelbundet för att upprätthålla energiflödet. Utveckling av alternativ till diesellagring pågår för närvarande på FOI. Exempelvis kan lokal generering av vätgas vara en sådan möjlighet i reservkraftssammanhang.⁵⁵

Att producera reservkraft via en generator kräver strikt taget ingen batterilagring eftersom generatoren kan slås på när energibehovet uppstår. Men det är ändå troligt att möjligheten till batterilagring kommer att innebära en stor utveckling för denna typ av nät, då det kan minska energiförlusterna i systemet avsevärt och fungera som ett extra reservlager. Batterilagring möjliggör också nyttiggörande av mer tillfälliga energikällor i systemet, exempelvis bränsleceller eller solceller. På så vis möjliggörs också en utveckling mot fossilfrihet.

Inom den amerikanska militären ser vi hur koncept utvecklas för att försörja baser med kärnkraft, så kallade små modulära reaktorer (SMR). Dessa reaktorer försörjer ett lokalt elnät och kan ladda olika typer av elektrifierad utrustning.⁵⁶ Ubåtar har sedan länge energiförsörjts på liknande vis. Modulära reaktorer är förknippade med höga kostnader och de risker som energislaget i sig utgör. Det finns dock anledning att följa denna utveckling.

5.2 Försvarsmakten i lokal el-samverkan

För Försvarsmaktens större stationära anläggningar finns också alternativet att skapa robusthet i elförsörjningen genom möjlighet till gemensam ö-drift med närliggande lokalsamhälle eller delar av ett lokalsamhälle. Detta skulle kunna ge synergier med andra samhällskritiska verksamheter. Ett sådant nät kan också innehålla större producerande anläggningar, exempelvis ett kommunalt kraftvärmeverk, en vindkraftspark eller ett massabruk. I händelse av att delar av transmissionsnätet slås ut och inte kan fylla sin funktion eller att effektbrist

⁵⁵ Lallo, E., Fridsén Skogsberg, R., Ellis, H. & Skarstind, M. (2023). Vätgasdrivna Reservkraftssystem En förstudie av vätgasens möjligheter för strömförsörjning av militära befästningar. FOI-R--5444--SE.

⁵⁶ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2021). Powering the US Army of the Future. <https://www.nationalacademies.org/our-work/powering-the-us-army-of-the-future>.

uppstår av andra skäl kan det lokala nätet försättas i ö-drift. Denna typ av nät kräver avancerade styrsystem och batterilagringskapacitet för att fungera. Även här krävs möjligheter att tillföra lagerhållen energi i händelse av kris, exempelvis diesel, biodrivmedel eller vätgas. Oavsett vilken energibärare som ska stå för lagerhållningen krävs noggranna logistiska överväganden och design av försörjningskedjan för att klara uppgiften. Detta diskuteras vidare i avsnittet *5.4 Synergier mellan försörjningskedjor* nedan, då frågeställningarna kring drivmedelsförsörjning för elproduktion och för användning i farkoster i stor utsträckning är de samma.

5.3 Energisystem för farkoster

Följden av den utveckling som beskrivits i avsnitt 2.4 och 4.2 är att diesel troligtvis kommer behöva ersättas på sikt även i Försvarmaktens farkoster. Att fossila bränslen fasas ut från samhället behöver dock inte betyda att förbränningsmotorer helt fasas ut, i alla fall inte i samma takt. Biodrivmedel kommer troligen även i framtiden vara ett alternativ för tunga transporter och flyg, det transportslag som är svårast att ställa om till eldrift. Även elektrobränslen väntas bli en del av den framtida drivmedelsmarknaden då efterfrågan på alternativa bränslen ökar. Bland elektrobränslen finns drivmedel som är mycket lika sina fossila motsvarigheter för flyg och markfordon, men som producerats från vätgas och koldioxid genom ett antal avancerade förädlingssteg. Sådana högförädlade elektrobränslen kräver ingen anpassning av dagens förbränningsmotorer.

Vätagasdrift kan ses som en form av elektrifiering, som ännu inte nått kommersialisering vad gäller framdrift av tunga fordon, men som väntas göra det inom de närmsta åren. Vätagasdrift ger snabbare tankning och längre körsträcka än batteridrift vilket kan vara en stor fördel även om energieffektiviteten i systemet som sådant är lägre än i det batterielektriska.⁵⁷

Biodrivmedel är en begränsad tillgång, men en fördel är att det finns förutsättningar att producera dem inom landets gränser. Detta är i stor utsträckning en fråga om politisk styrning då branschen påverkas starkt av regleringar, lagstiftning, styrning och stöd, även från EU-nivå. I takt med att persontrafiken elektrifieras, liksom den del av godstrafiken och tunga arbetsfordon som har bäst förutsättningar, återstår en allt mindre del av transporterna som konkurrerar om biobränslet. I nuläget finns ingen annan teknik som kan användas för att sänka koldioxidutsläppen från det militära flyget. Det samma gäller för huvuddelen av den civila flygsektorn, även om vissa elektrifieringsprojekt pågår.^{58, 59} I vilken utsträckning biobränslen kommer att implementeras är huvudsakligen en fråga om prioriteringar då godkända bränslen kommer att finnas för de flesta av Försvarmaktens behov, men till en högre kostnad. Viss tillredning av flygbränsle sker mycket sent i Försvarmaktens försörjningskedja och det är av särskild vikt att finna goda lösningar för hur hela logistiken för flygbränsle ska fungera då bio-jet bränslen inkluderas i flödet.

Farkoster behöver inte bara energi för sin framdrift utan även för att driva olika elektriska system. Därför finns ofta en elmotor eller ett batteri som laddas av förbränningsmotorn. Längst fram i energiflödet finns alltså ett behov av energi i form av just el. När logistik designas med exempelvis SCOR-modellen⁶⁰, är behoven (se kapitel 4) utgångspunkt för designen. Ett liknande tankemönster kan vara användbart i utformningen av energisystem för farkoster.

Ett batteri som driver en farkost (eller delar av den) kan laddas via den kraftkälla som finns tillgänglig, t.ex. via ett lokalt elnät eller direkt från en generator. Lämplig anslutning krävs naturligtvis. Energikällan i elnätet eller bränslet till generatorn kan därmed vara flexibelt.

⁵⁷ Li, S., Djilali, N., Rosen, A., Crawford, C. & Sui, P.C. (2022). Transition of heavy-duty trucks from diesel to hydrogen fuel cells: Opportunities, challenges, and recommendations. *International Journal of Energy Research* 2022 Vol. 46 Issue 9 Pages 11718-11729.

⁵⁸ Adu-Gyamfi B. A. & Good C. (2022). Electric aviation: A review of concepts and enabling technologies. *Transportation Engineering* 2022 Vol. 9 Pages 100134.

⁵⁹ Chokshi, N. The New York Times. <https://www.nytimes.com/2023/11/03/business/electric-planes-beta-technologies.html> Besökt 2023-11-20

⁶⁰ SCOR. <https://scor.ascm.org/> Besökt 2023-02-05

Det gör energilösningen som sådan flexibel och framtidssäkrad, eftersom energikällan kan bytas ut när ny teknologi blir mogen. De stora hindren för batteridrift av farkoster är för närvarande den begränsade räckvidden, tiden för laddning, det stora effektbehov som krävs för snabb laddning samt tillförlitligheten under kalla förhållanden. I vilken mån vissa av dessa hinder kan väntas lösas av teknikutvecklingen är en fråga som bör studeras närmare.

Vi ser i huvudsak tre spår för framdrivningen av tunga fordon i framtiden.

1. Förbränningsmotor som drivs av någon form av biodrivmedel, t.ex. biogas eller bio-baserad HVO för framdrivning av fordon. Stödsystem drivs via batteri (dagens teknik). Den tekniska mognadsgraden är redan nu hög, men en utmaning är den begränsade tillgången på biodrivmedel. Även e-bränslen, som liknar diesel men kan anses fossilfria (under rätt förutsättningar), skulle kunna vara aktuella drivmedel i framtiden.
2. Batterielektrisk drift (BEV) för transportfordon och hybriddrift för operativa militära fordon. De första tunga BEV-lastbilarna har börjat tas i kommersiell drift i Sverige. Huvudutmaningar är räckvidden, tidsåtgången för laddning samt behovet av laddinfrastruktur.⁶¹ Hybridfordon som har flexibiliteten att kunna drivas både med el och flytande drivmedel är också en högtintressant lösning för militär verksamhet, som prioriterar flexibilitet och robusthet högre än vad som är fallet inom kommersiell verksamhet. Hög vikt och hög investeringskostnad är de huvudsakliga begränsningarna.
3. Drift via bränslecell. De första tunga vätgasdrivna lastbilarna rullar redan på vägarna⁶². Trots det finns utmaningar i den tekniska mognadsgraden och de krav som kommer att ställas på hanteringen. Säkerheten vid exempelvis beskjutning är en viktig fråga inom militära applikationer och den låga energitätheten per volymenhet bränsle utgör en stor logistisk utmaning. Jämfört med dagens batterielektriska lastbilar förväntas bränsleceller dock ge en relativt lång räckvidd och snabbare laddning. Det är också en teknik som väntas satsas på inom civil verksamhet.

Slutligen är det av största vikt att konstruktionen av de farkoster som planeras för idag sker med öppenhet för att teknikutvecklingen sker snabbt. Det gäller i synnerhet de typer av farkoster och system som förväntas brukas under lång tid.⁶³ För lastbilar som används i den bakre logistikkedjan är livslängden kortare jämfört med större plattformar och därför finns större möjligheter att anpassa nya generationer till den tekniska utvecklingen. Trots det kan det finnas behov av stora investeringar i system för exempelvis intern laddinfrastruktur eller infrastruktur för hantering av vätgas.

För tunga maskiner och farkoster är det ännu inte säkert att säga vilken teknik som kommer att vara ledande år 2050, varför flexibilitet i design och möjliggörande av framtida modifieringar sannolikt kommer att vara värdefullt. Teknikutveckling sker inte linjärt utan kan efter en lång period av små framsteg, plötsligt ta fart. Det sker ofta i samband med att tekniken blivit redo för de första stegen av kommersialisering. En sådan utveckling har exempelvis kunnat ses på elbilssidan de senaste tio åren.

5.4 Synergier mellan försörjningskedjor

Ett rimligt antagande om framtiden är att fordon likväl som fortifikationer i fält kommer att behöva el, även om kraven skiljer sig mellan olika tillämpningar, exempelvis i fråga om spänning. Olika former av energibärare (t.ex. dieselliknande bränslen) och energikällor (t.ex. solceller) kan då användas för att försörja ett lokalt elnät eller en generator som kan ladda upp batterier eller förbrukas momentant. En full elektrifiering i förbrukarled behöver

⁶¹ Closer Reel. (2023). Elektrifierade lastbilar. <https://closer.lindholmen.se/projektreel/elektrifierade-lastbilar>. Besökt 2023-12-05.

⁶² Energigas Sverige (2022). Vätgas hjälper transportjätte att ställa om. <https://www.energigas.se/publikationer/tidningen-energigas/vatgas-hjalper-transportjatte-att-stalla-om/>

⁶³ Andersson, A., Andersson, H., Simonsson, L. & Mårtensson, T. (2023). Försvarsförmåga och klimatneutralitet - strategisk planering för en värld som ställer om. FOI. Memo 8104.

alltså inte innebära att hela flödet blir elektrifierat. Det som skapar logistiska utmaningar är just flödet bakom elnätet eller kraftkällan. En mångfald av alternativ för denna försörjning innebär att logistiken behöver ha stor flexibilitet för att hantera olika energibärare från olika energikällor. En möjlighet till förenkling vore att precisera ett mindre antal flöden över tid. Det kan då behöva göras avvägningar mellan enkelhet och flexibilitet.

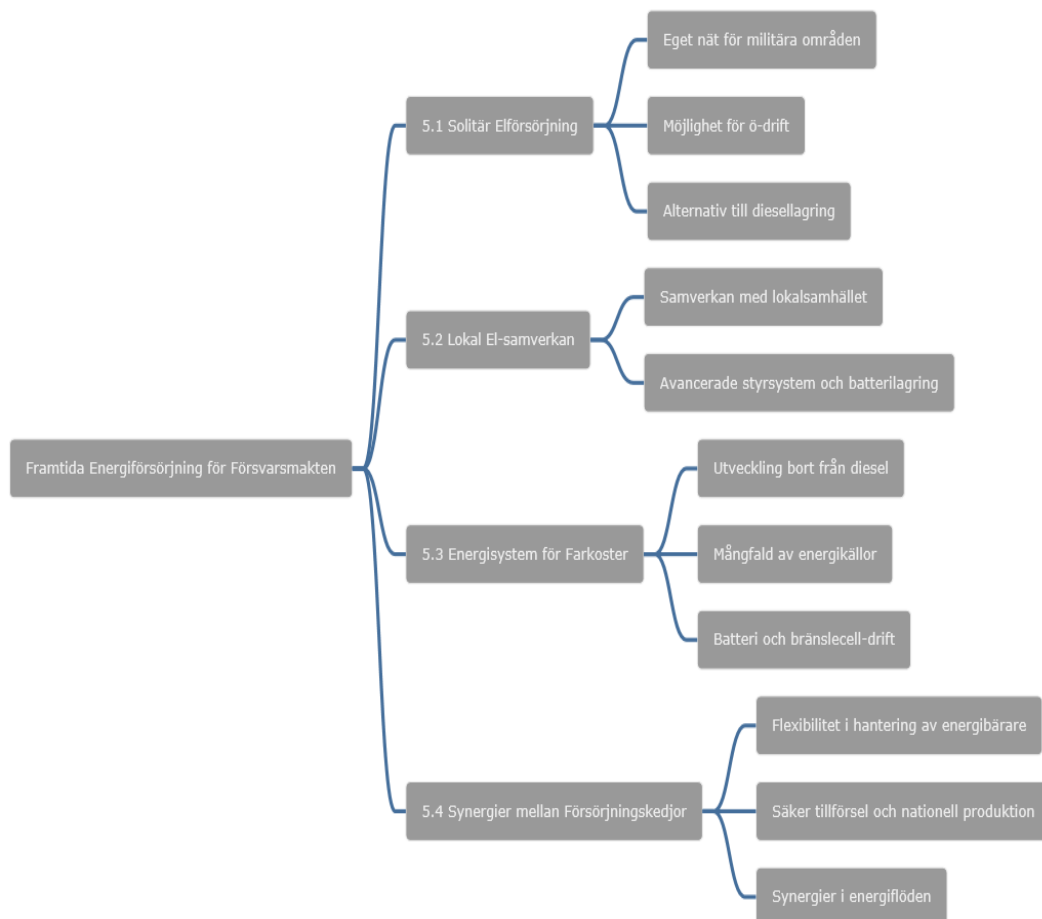
Tillförsel av drivmedel för att generera energi behöver ske säkert och om möjligt bör produktion ske nationellt, eller än mer lokalt, för att säkerställa oberoende. Det finns också frågetecken kring i vilken mån Nato kommer att påverka valet av energilösningar inom det svenska försvaret. Klart är att dessa val måste möjliggöra att både kunna ge och ta emot världsstödet inom Nato.⁶⁴

Farkoster med eldrift bör kunna laddas via lokalt elnät (och vid behov kunna ge energi till nätet), men även för farkoster med förbränningsmotorer kan det finnas synergier mellan flödet av energi för elproduktion och drivmedel. Det finns troligen energibärare som skulle kunna användas för båda funktionerna, t.ex. metanol eller vätgas. Och i fallet med flytande drivmedel finns synergier i transporter och lagerhållning även om olika varianter krävs för olika ändamål.

På samma sätt som ö-drift kan skapa försörjningstrygghet i kraftnätet måste en logistikkedja för flytande bränsle eller gas vara uppbyggd som ett nätverk där en utslagen nod inte bryter hela försörjningskedjan. Det kräver en omfattande designprocess för att framtidssäkra ett sådant nätverk.

⁶⁴ Reichel, B. & Jonsson, D. K. (2023) Svenskt Världsstödet - Kunskapsunderlag för civilt försvar med fokus på energi. FOI-R--5441--SE.

5.5 Grafisk sammanfattning av kapitel 5 - Möjliga lösningar för en framtida energiförsörjning som svarar mot Försvarmaktens behov



Figur 5. Grafisk sammanfattning av kapitel 5 - Möjliga lösningar för en framtida energiförsörjning som svarar mot Försvarmaktens behov.

6 Summering och förslag till fortsatt arbete

I designen av ett framtida energisystem för Försvarmakten är det naturligt att utgå från de behov som finns, t.ex. framdrift av farkoster och drift av stödsystem, men också en analys av de tekniska och logistiska möjligheter som finns att tillgodose behoven. Tydliga målsättningar för ett framtida energisystem bör specificeras. Utifrån det logistikperspektiv som presenterats i denna rapport är det rimligt att inkludera följande nyckelbegrepp:

- **Robusta nätverk**, både i fråga om elförsörjning via kraftnät och logistiknätverk för andra typer av energibärare.
- **Flexibilitet** avseende möjligheten att ersätta en energibärare med en annan när ny teknik mognat fram, men också möjligheten att producera el via olika flexibla lösningar.
- **Utgå från funktionen** som ska uppnås och designa flödena därefter. Dialogen med brukare av systemen är väsentlig för detta arbetssätt.
- **Integrerade system**, vilket innebär att designa energisystem som verkar tillsammans och ger synergier.

En ständig kärnfråga för logistiken är avvägningen mellan robusthet och effektivitet. Ska det vara ett system med många möjligheter och hög kapacitet till en hög kostnad eller ett system som exakt uppfyller behovet. Ett resilient system ökar dock chanserna att på lång sikt hamna rätt i utvecklingen, vilket i slutändan skapar effektivitet.

Försvarmakten kommer att påverkas starkt av den utveckling mot fossilfrihet som sker i det civila samhället. Det gäller inte minst i gränssnittet mellan militärt och civilt, där logistikorganisationen arbetar. Likaså kommer man att påverkas av de ökade militära förmågor som möjliggörs av nya energilösningar som hybriddrift. Eldrift i farkoster och ökat behov av el i fält måste inte innebära att Försvarmakten driver egna elnät, men denna rapport har tagit upp möjligheter med hur lokala nät kan öka robustheten i elförsörjningen. Hur denna möjlighet bäst ska nyttjas är intressant att fortsätta studera.

Även om en fullständig elektrifiering skulle uppnås i användarled innebär det inte att alla energiflöden inom logistiken enbart kommer att innehålla el. Troligare är en framtida lösning där el nyttjas längst fram i flödet, men där det finns olika flöden av energi som leder fram till att el distribueras och används.

Denna rapport innehåller många exempel, men har inte haft ambitionen att fullständigt genomlysna möjliga energitekniker av intresse för Försvarmakten. Utvecklingen går mycket snabbt, varför det är angeläget att löpande göra omvärldsanalyser av tillgängliga energitekniker. De begrepp och synsätt som tas upp i denna rapport bör utgöra ett underlag i bedömningen av vilka tillgängliga tekniker som har potential att vara en del av Försvarmaktens framtida energisystem och en behovsanalys bedöms vara en viktig del i ett sådant arbete. Ett behov som tagits upp är kravet på att kunna samverka inom Nato. Vad detta får för konsekvenser på kravställningar inom olika delsystem är ett viktigt område för vidare studier. Likaså bör det finnas goda möjligheter till forsknings- och utvecklingssamarbeten inom Nato som kan underlätta övergången till Försvarmaktens framtida energisystem.

Referenser

- Adu-Gyamfi B. A. & Good C. 2022. Electric aviation: A review of concepts and enabling technologies. *Transportation Engineering* 2022 Vol. 9 Pages 100134
- Agnew, S., & Dargusch, P. 2017. Consumer preferences for household-level battery energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 609-617.
- Andersson, A., Andersson, H., Simonsson, L. & Mårtensson, T. 2023. Försvarsförmåga och klimatneutralitet - strategisk planering för en värld som ställer om. FOI. Memo 8104.
- Arsad, A. Z., Hannan, M. A., Al-Shetwi, A. Q., Mansur, M., Muttaqi, K. M., Dong, Z. Y., Blaabjerg, F. 2022. Hydrogen energy storage integrated hybrid renewable energy systems: A review analysis for future research directions. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 47 Issue 39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.208>
- Bocharov, S. N., Isakov, A. I., Petrov, Y. Y., Orekhova, K. N., Dementeva, E. V., Burakov, B. E., & Zamoryanskaya, M. V. 2021. Study of radioluminescence and cathodoluminescence of artificial diamond single crystals as prospective durable core material for nuclear electric batteries. *Diamond and Related Materials*, 120, 108658.
- Cameron, D., & Svensson Dahlin, M. 2017. Analys av Sveriges framtida elsystem: utmaningar och lösningsområden.
- Cao, W., Zhang, J. and Li, H. *Energy Storage Materials* 2020 Vol. 26 Pages 46-55. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.12.024>
- Devine, W. D. 1983. From shafts to wires: Historical perspective on electrification. *The Journal of Economic History*, 43(2), 347-372.
- Dinçer, I. & Erdemir, D., 2023. *Introduction to Energy Systems*. John Wiley & Sons.
- Ellis, H. & Pastuhoff, M. 2021. Energisystem för robust energiförsörjning. FOI-R-500-SE
- Ellis, H., Sahlén, W., Pastuhoff, M. & Skarstind, M. 2022. Energilagring för reservkraft - Flödesbatterier och metallförbränning som energilagring för berggrum. FOI-R--5259--SE
- Energimyndigheten 2018. Vägen till ett 100 procent förnybart elsystem - Delrapport 1: Framtidens elsystem och Sveriges förutsättningar. ER 2018:16.
- Energimyndigheten 2020. Scenarier över Sveriges energisystem. ER 2021:6. www.energimyndigheten.se/statistik/prognoser-och-scenarier/langsiktiga-scenarier/
- Energimyndigheten 2021. Framtidens Elektrifierade samhälle. ER 2021:28. www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2021/ny-analys-fran-energimyndigheten-om-hallbar-elektrifiering/
- Energimyndigheten 2022. Energiläget 2022, med energibalanser för år 1970-2020. ET2022:09. www.energimyndigheten.se/statistik/energilaget/
- Engström, R., Gode, J., & Axelsson, U. 2009. Vägledning för att beräkna påverkan från förändrad energianvändning på de svenska miljömålen. Framtagen med stöd av Miljömålsrådet, Energimyndigheten och Naturvårdsverket.
- Försvarsmaktens tekniska skola. 2021. Slutrapport LOG212104SF - Fältförsök ny logistikteknik. FM2021-3144:5.

- InterFlex project summary, January 2017 - December 2019. <https://interflex-h2020.com>
- IPCC Sixth Assessment Report. Synthesis released 2023. Glossary Search. <https://apps.ipcc.ch/glossary/>
- Jonsson, D., & Veibäck, E. 2020. Nato och svensk civil beredskap – Ett kunskapsunderlag med fokus på NATO Baseline Requirements och svensk energiförsörjning. FOI-R--4937--SE.
- Kim, T., Song, W., Son, D. Y., Ono, L. K., & Qi, Y. 2019. Lithium-ion batteries: outlook on present, future, and hybridized technologies. *Journal of materials chemistry A*, 7(7), 2942-2964.
- Kress, M. 2016. Operational Logistics: The Art and Science of Sustaining Military Operations. 2nd. edn. Springer International Publishing.
- Lallo, E., Fridsén Skogsberg, R., Ellis, H. & Skarstind, M. 2023. Vätgasdrivna Reservkraftsystem En förstudie av vätgasens möjligheter för strömförsörjning av militära befästningar. FOI-R--5444--SE.
- Li, S., Djilali, N., Rosen, A., Crawford, C. & Sui, P.C. 2022. Transition of heavy-duty trucks from diesel to hydrogen fuel cells: Opportunities, challenges, and recommendations. *International Journal of Energy Research* 2022 Vol. 46 Issue 9 Pages 11718-11729.
- Marocco, P., Ferrero, D., Lanzini A., Santarelli. M. 2022. The role of hydrogen in the optimal design of off-grid hybrid renewable energy systems *Journal of Energy Storage*. Vol. 46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103893>
- Mathiesen, B.V., Lund, H., Connolly, D., Wenzel, H., Østergaard, P. A., Möller, B., Nielsen, S., Ridjan, I., Karnøe, P., Sperling, K., Hvelplund, F. K. 2015. Smart Energy Systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions.
- Mattsson, S. A. 2002. *Logistik i försörjningskedjor*. Studentlitteratur AB. ISBN: 91-44-01929-7.
- Monteza, D. & Sakelis, V. 2022. State of the Art inom batteriproduktion. Examensarbete KTH.
- Morton Jr, D. L. 2002. Reviewing the history of electric power and electrification. *Endeavour*, 26(2), 60-63.
- Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. 2009. Faller en - faller då alla? www.msb.se/siteassets/dokument/amnesomraden/krisberedskap-och-civilt-forsvar/stod-i-att-analysera-beroenden/faller-en---faller-da-alla.pdf.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2021. Powering the US Army of the Future. <https://www.nationalacademies.org/our-work/powering-the-us-army-of-the-future>.
- Nordmark, I. 2021. El- och bränslecellsdrift inom massgodstransporter i städer och tätorter, ingår i Samverkansprogrammet för förnybara drivmedel och system - Sammanfattande projektresultat 2018-2021. Sammanfattande projektresultat_FDoS_2022_LR.pdf (f3centre.se)
- Mentzer, J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D & Zacharia, Z. G. 2001. Defining supply chain management. *Journal of Business Logistics* 2001 Vol. 22 Issue 2.

Park, J. 2017. Review and Preview of Nuclear Battery Technology.
<http://large.stanford.edu/courses/2017/ph241/park-j1/>

Powering the U.S. army of the future. The National Academies Press 2021.
<https://doi.org/10.17226/26052>.

Reichel, B. & Jonsson, D. K. 2023. Svenskt Vårdlandsstöd - Kunskapsunderlag för civilt försvar med fokus på energi. FOI-R--5441--SE.

Wei, M., & McMillan, C. A. 2019. Electrification of industry: potential, challenges and outlook. Current Sustainable/Renewable Energy Reports, 6(4), 140-148.

Öberg, S., Odenberger, M., Johnsson, F. 2022. International Journal of Hydrogen Energy Vol. 47 Issue 1. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.035>

Beslutsdokument

Uppdrag att främja ett mer flexibelt elsystem. Regeringsbeslut I2022/01578. 2022-08-04.
www.regeringen.se/contentassets/8a55a8d9263e4969b6aa14f22ec44b14/uppdrag-att-framja-ett-mer-flexibelt-elsystem/

Webbsidor

Chokshi, N. The New York Times.
<https://www.nytimes.com/2023/11/03/business/electric-planes-beta-technologies.html>
 Besökt 2023-11-20.

Closer Reel. 2023. Elektrifierade lastbilar.
<https://closer.lindholmen.se/projektreel/elektrifierade-lastbilar> Besökt 2023-12-05.

Energigas Sverige. 2022. Vätgas hjälper transportjätte att ställa om.
<https://www.energigas.se/publikationer/tidningen-energigas/vatgas-hjalper-transportjatte-att-stalla-om/>

Energimyndigheten. www.energimyndigheten.se/fornybart/solelportalen/lar-dig-mer-om-solceller/solcellers-miljopaverkan/ Besökt 2023-03-20

Fortifikationsverket. 2023. Hållbar utveckling.
<https://www.fortifikationsverket.se/hallbarhet/hallbar-utveckling> Besökt 2023-12-06.

Nato, Resilience, civil preparedness and Article 3.
https://www.nato.int/cps/en/natohq/topics_50093.htm Besökt 2023-06-27.

Naturvårdsverket. Sveriges klimatmål och klimatpolitiska ramverk.
www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomställningen/sveriges-klimatarbete/sveriges-klimatmal-och-klimatpolitiska-ramverk/ Besökt 2023-11-20.

Svenska kraftnät. www.svk.se/om-kraftsystemet/ Besökt 2023-05-30.

SCOR. <https://scor.ascm.org/> Besökt 2023-02-05

