

Metoder och verktyg för designrymdskartläggning

Tillämpat på markdomänen

MATHILDA KARLSSON HAGNELL, ARVID CARLSTEDT



Mathilda Karlsson Hagnell, Arvid Carlstedt

Metoder och verktyg för designrymdskartläggning

Tillämpat på markdomänen

Titel	Metoder och verktyg för designrymskartläggning – Tillämpat på markdomänen
Title	Methods and tools for Tradespace Exploration – For ground vehicles
Rapportnr/Report no	FOI-R--5503--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2023
Antal sidor/Pages	29
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	Försvarsmakten
Forskningsområde	Vapen, Skydd och säkerhet
FoT-område	Marksystem
Projektnr/Project no	E85086
Godkänd av/Approved by	Cecilia Dahlgren
Ansvarig avdelning	Försvarteknik
Exportkontroll	Innehållet är granskat och omfattar ingen information som är underställd exportkontrollagstiftningen

Bild/Cover: Försvarsmakten. Fotograf: Anna Norén

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 markförband och markfordon behöver uppfylla framtida förmågekrav för att hantera nya omvärldssituationer, uppgifter och hotbilder. För att säkerställa uppfyllnad och omsätta förmågekrav krävs prediktiva metoder och verktyg för analys och utvärdering av framtida markfordonskoncept. Designrymskartläggning, eller *Tradespace exploration* (TSE), är en simuleringsbaserad konceptgenererings- och värderingsmetod som stöttar sådan analys genom att utforska ett systems designrymd. Liknande metoder har använts av FOI för tidig ubåts- och ytfartygsdesign. Motsvarande arbete har nu initierats för markdomänen på FOI inom Försvarsmaktens samlingsbeställning för forskning och teknikutveckling – marksystem (FoT MS).

I denna rapport presenteras en förstudie på området som tydliggör metod, verktyg, nytta och en tidig version av ett internt utvecklat verktyg med fallstudie. FOI:s verktyg söker identifiera framtida trender, fokusområden och gynnsamma teknikkonfigurationer som möjliggör tidig inriktning för framtida fordonsanskaffningar och fordonsutveckling för att bemöta den globala marknad med taktade volymer som militära markfordon utgör.

Metoden kan användas för att generera beslutsunderlag för planering- och anskaffningsarbete, hotanalys och strategisk försörjningssäkerhet. Djupare analyser på fordonsnivå möjliggörs också där exempel kan vara huvudbeväpningsstorlek och ammunitionskapacitet, olika upphängningssystemers framdrift i terräng, samt integration av nya energivapensystem.

Föreslagen intern verktygsutveckling kommer att kräva tid och resurser till utveckling och upprätthållande men metodens breda nytta motiverar fortsatt arbete.

Nyckelord: Markfordon, Koncept, Designrymd, Designrymskartläggning

Summary

The Swedish Army and its manouver units need the ability to operate in new situations, perform new tasks and face new threats. New predictive methods able to assess future vehicle concepts are needed to meet these challenges. Tradespace exploration (TSE), where design spaces are constructed through the use of simulation frameworks and models, is one such method. Similar work has been done at FOI for naval design and has now been initiated for vehicle design within the Swedish Army's research and development programme - ground systems (FoT MS).

This report descibes TSE, available tools, possible applications and an early developed framework with case study. The FOI-developed framework aims at identifying future trends, focus areas and vehicle configurations that support the formulation of early-stage national design directives needed for acquisition processes set within the global vehicle market.

TSE studies can support army planning, acquisition, threat assessments and national supply-chain aspects analyses. Selected TSE-models enable detailed vehicle system analyses on weapon types and sizes, ammunition capacity, suspension systems aspects and the integration of new energy weapon systems.

The internal framework and tool development requires time and resources but its broad applicability and potential justifies further development within the field.

Keywords: Manouver units, Concept development, Designspace, Tradespace, Trade space exploration (TSE)

Innehållsförteckning

1	Inledning	6
1.1	Läsanvisningar.....	7
2	Designrymskartläggning.....	8
2.1	Parametersvepning kontra optimering	8
2.2	Verktyg och utövare.....	10
2.2.1	LDW och verktygssviten WSTAT/Aries	10
2.2.2	SubAn och ShipAn.....	13
3	Möjligheter inom markdomänen.....	15
3.1	Tekniktrendanalyser och anskaffningsunderlag.....	15
3.2	Hotanalyser.....	15
3.3	Analys av delsystem och teknikintegrationsaspekter	15
4	Verktyg för kartläggning av designrymden	17
4.1	Behov.....	17
4.2	Optimering och balansering.....	17
4.3	Värde, plattform och delsystem.....	18
4.4	Komponenter	18
4.5	Dimensionering.....	18
4.6	Prestanda- eller effektmått	18
4.7	Kostnad.....	19
4.8	Generering av designrymd	19
5	Fallstudie – Förbrukning kontra fordonsstorlek	20
5.1	Avgränsningar.....	20
5.2	Resultat.....	20
5.3	Resultatets begränsningar.....	22
5.4	Alternativa effekts- och kostnadsmått	22
5.5	System-av-systemnivå.....	22
6	Diskussion	23
7	Framtida arbete	25
8	Referenser.....	26

Bilaga 1 – Seriehybridmodell

1 Inledning

Försvarsmaktens markförband behöver ha förmåga att verka med markplattformar både idag och imorgon, givet nya omvärldsförutsättningar och uppgifter där framtida slagfält och hot måste planeras för. Metoder och verktyg som kan användas för att utvärdera framtida markfordonkoncepts förmågor och effekter behövs för att stötta både i myndigheternas planerings- och anskaffningsarbete men också för att ta fram underlag för andra ändamål som hotbildsanalys och strategisk försörjningssäkerhet. Inom markdomänen är vikten av utvecklandet av prediktiva metoder och verktyg särskilt tydlig eftersom Försvarsmakten bland annat står inför en nyanskaffning av stridsfordon.

Ett markfordon består av en mängd system och delsystem som väljs och kombineras under produktframtagningen eller i samband med senare fordonsuppgraderingsarbete. Framtagandet och uppgraderingen av ett markfordon är en uppgift som består av både beslut och systemdimensionering. Ett sådant besluts- eller kombinatoriskt optimeringsproblem har sällan en exakt lösning och kräver numeriska lösningsmetoder i sökandet efter olika möjliga koncept [1]. Optimeringsproblemet återfinns för farkostdesign där exempelvis luft- [2] och sjödomänen [3] kan nämnas. För militära fordon bör problemet också betraktas för samverkande plattformar på högre och lägre förbandsnivåer. Delar av detta övergripande kombinatoriska problem kan liknas med problemen *Weapon target assignment* (WTA) och *Missile allocation problem* (MAP) inom luft- och sjöstrid [4].

En metod som kan användas för att kartlägga många parallella fordonskoncept och teknikkonfigurationer är designrymskartläggning, internationellt betecknat som *Designspace exploration* (DSE) eller *Tradespace exploration* (TSE) [5, 6]. Inom TSE är en designrymd, *the Tradespace*, den yta som spänns upp av möjliga koncept som svarar mot ställd kravspecifikation för ett visst effektmått. Flera parallella designrymder utgör underlag för vidare analys och avvägningar mellan koncept. Detta gör metoden särskilt lämplig för farkost- och systemdesign som involverar motstridiga behov och val. Design av ett militärt markfordon med balans mellan skydd, verkan, rörlighet och soldatstödsystem exemplifierar dessa designutmaningar där exempelvis förbättrat konventionellt skydd på grund av vikt påslag tenderar att försämra fordonets rörlighet.

Designrymskartläggning kan användas både i tidiga designsfaser som en del i konceptgenerering och avdömning samt i senare designsfaser om breda produkt- och utvecklingsmetoder såsom *Set-Based Design* (SBD) [7] används. Det amerikanska försvarsdepartementet arbetar brett inom området och har under en längre tid utfört designrymsstudier för olika militära farkoster och domäner; mark, luft och sjö [8]. Inom markdomänen utförs designrymsstudier inom flera delar av den amerikanska arméns forskningscentrum (DEVCOM) [9], där markfordonsforskningscentrum (GVSC) [10] tillsammans med akademiska partners [11] är viktiga aktörer. Utförda designrymsstudier och tillhörande metodutveckling berör både tidiga och senare designsfaser, där också utveckling inom SBD berörs [12, 13].

FOI har arbetat med liknande metoder för marina tillämpningar. Detta arbete har resulterat i verktygssviter för ubåts- och ytfartygsdesign [14, 15]. Verktygen används för att med hjälp av parametriska modeller utforska en stor mängd möjliga koncept som tillsammans motsvarar en designrymd givet en viss kravspecifikation. I denna designrymd kan särskilt lämpliga initiala koncept identifieras för vidare bearbetning på vägen mot ett nytt farkostkoncept.

Motsvarande arbete har saknats inom markdomänen på FOI och har nu initierats inom Försvarsmaktens samlingsbeställning för forskning och teknikutveckling – marksystem (FoT MS). Arbetet bedöms möta centrala forskningsfrågor inom FoT-projektet gällande utformning och värdering av nya markfordon där effekt och avvägningar till följd av integrationen av nya tekniska lösningar söks. Denna rapport presenterar förstudien på

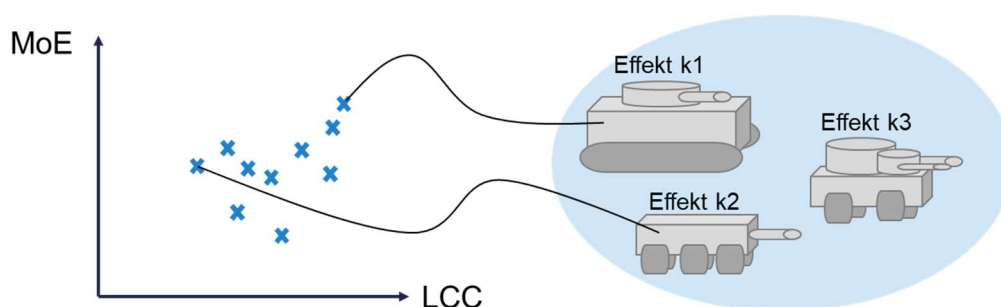
området designrymdskartläggning där metod, nytta och en tidig version av ett internt utvecklat ramverk för markfordon beskrivs.

1.1 Läsanvisningar

Rapporten inleds med kapitel 2 där metoden beskrivs och en översyn av aktörer och verktyg på området ges. Därefter följer kapitel 3 med en analys av möjlig nytta och användning av metoden inom markdomänen. I kapitel 4 beskrivs ett tidigt ramverk för ett internt utvecklat verktyg på området. Kapitel 5 beskriver en kort fallstudie vilken syftar till att illustrera en möjlig användning av verktyget. Rapporten avslutas med kapitel 6 och 7 med en sammanfattande diskussion om metoden där också aspekter gällande tillgängliga verktyg, internt utvecklingsbehov och slutligen framtida arbete lyfts.

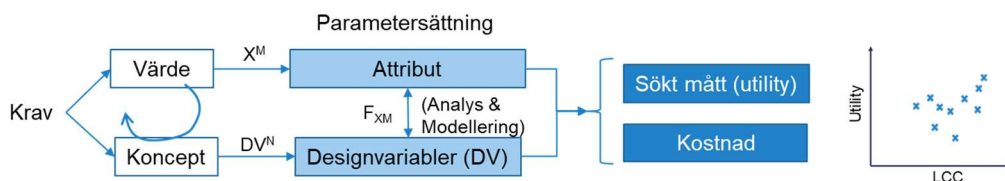
2 Designrymskartläggning

Designrymskartläggning är en konceptgenererings- och värderingsmetod i vilken ett systems designrymder, eller de ytor som spänns upp av systemets möjliga konceptkonfigurationer, utforskas. Koncept som befolkar en designrymd värderas typiskt med avseende på livscykelkostnad (*Lifecycle cost* – LCC) och utvalt effektmått (*Measures of effectiveness* – MoE), likt illustrerat i figur 1. Effektmått är ett lämpligt mätvärde för designrymsstudier då det mäter hur väl ett förband kan utföra sitt uppdrag givet förmågor, taktik och operativ miljö. För att befolka en designrymd med tillförlitliga koncept behövs väl utbyggda systemspecifika ramverk och parametersatta systemmodeller som har kapacitet att översätta behov till koncept.



Figur 1. En fiktiv designrymd bestående av 10 koncept vilken illustrerar en generisk livscykelkostnad (LCC) kontra ett generiskt effektmått (MoE) för ett antal hypotetiska vapenbärande markplattformar.

Metoden kan beskrivas som i figur 2, där krav eller behov genererar och värderar kostnadssatta koncept med hjälp av designvariabler och underliggande systemattribut. Översättningen mellan designvariabler, systemattribut och färdiga koncept görs genom modellering med underbyggande systemspecifika ramverk och parametersatta systemmodeller. Ramverk och systemmodeller behöver beskriva det fysiska systemet utifrån funktion, prestanda och effekt. Vilka designvariabler som betraktas väljs utifrån given frågeställning och uppställda krav. Teoretiskt sett kan designvariabler definieras genom hela systemhierarkin på system-av-system-, system-, delsystem- eller till och med på individuell komponentnivå. Hög detaljnivå i frågeställningen kräver dock i allmänhet hög detaljnivå i använt ramverk och tillhörande systemmodeller. Värderade och kostnadssatta koncept ställs sedan jämförda varandra för att grafiskt illustrera designrymden.



Figur 2. Ett koncept definieras av uppställda designvariabler (DV) som genom framtaget modellbaserat ramverk definierar involverade systemattribut och slutligen konceptets sökta prestanda- eller effektmått (inom TSE benämnt som *utility*) och en drivande kostnad. När varje koncepts prestanda- eller effektmått och kostnad placeras jämförda varandra konstrueras en grafisk designrymd, längst till höger i figuren. Figur anpassad från [16].

2.1 Parametersvepning kontra optimering

Vilka genererade koncept som befolkar designrymden beror på hur designvariablerna varieras och vilka kriterier som används för att betrakta ett koncept som godkänt. Om alla genererade koncept godkänns bestämmer variationen av betraktade designvariabler och involverad modellering designrymden. Variationen kan göras genom uppräknings av alla kombinationer av värden för beaktade designvariabler enligt metoderna *exhaustive*

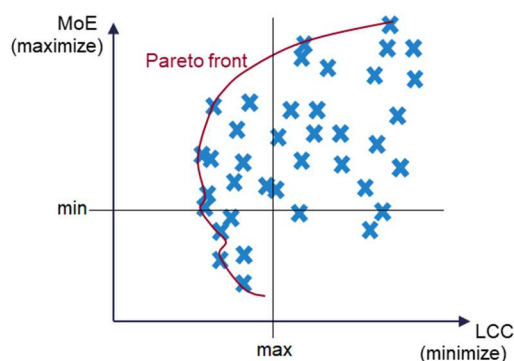
enumeration eller totalsökning (*exhaustive search*) [17]. Den resulterande designrymden blir då en typ av parametersvepning. Införs kriterier för att iterera genererade koncept mot kravställning och beräknade effekter blir variationen av designvariabler istället startvärden för en optimeringsprocess. Bägge alternativen har för- och nackdelar [18].

En parametersvepning kan lösa problemet men på grund av det kombinatoriska problemets storlek är strategin beräkningsintensiv att tillämpa för större konfigurationsmängder [19]. En numerisk lösningsstrategi, där ett mindre antal, väl valda, alternativ och konfigurationer lyfts fram kan därför vara nödvändigt för att nyttja metoden vid större konfigurationsmängder. En sådan lösningsstrategi kan liknas vid olika faktoriella experiment eller designstudier där ett mindre antal representativa kombinationer av ingående storheter inkluderas i utförd studie, detta för att balansera resultat med antal utförda experiment eller designanalyser [20].

Att optimera ett kombinatoriskt problem är också utmanande, och färre lösningsstrategier existerar för heltals- och kombinatoriska problem jämfört med traditionella kontinuerliga linjära eller icke-linjära optimeringsproblem [1]. Några optimeringsmetoder och algoritmer som är av intresse för detta arbete inkluderar heuristiska metoder såsom genetiska algoritmer (GA) och *Simulated annealing* (SA) [21] och också dynamisk programmering (DP) av Markovbeslutsprocessen (MDP) [13]. Där det är möjligt bör också problemet sökas transformeras eller linjäriseras till den kontinuerliga lösningsrymden för att minimera mängden heltalsvariabler. Det då kontinuerliga optimeringsproblem är mer stabila vilket medför att mängden möjliga optimeringsalgoritmer ökar.

Vidare kan olika kombinerade arbetssätt vara framgångsrika där parametersvepning och optimering används inom valda delar av problemet för att söka efter en tillräckligt bra lösning.

För en designrymd genererad med hjälp av optimeringsmetoder kan Paretofronten [1], eller den linje som kan konstrueras mellan den mängd optimala koncept som avgränsar designrymden, identifieras, se figur 3.



Figur 3. Paretofronten tillsammans med minimalt sökt effekt kontra maximalt tillåten livscykelkostnad avgränsar den möjliga designrymden. Beroende på optimeringsfunktion och värdering av effektmått kontra kostnad är olika koncept nära Paretofronten av intresse för vidareutveckling.

De specifika koncept som utgör Paretofronten är designnytterligheter där framtagna designvariabelvärden precis uppskattas prestera enligt viktad kravställning. Vid en senare mer detaljerad analys kan vissa koncept visa sig underprestera. Därmed blir också närliggande koncept, vilka presterar väl med viss marginal, intressanta och möjligen också mer troligt funktionsdugliga på sikt. Det kan därmed vara värdefullt att inte enbart identifiera koncept på Paretofronten utan också närliggande koncept i efterföljande produkt-, eller teknikutvecklingsprocess.

2.2 Verkt yg och ut ovare

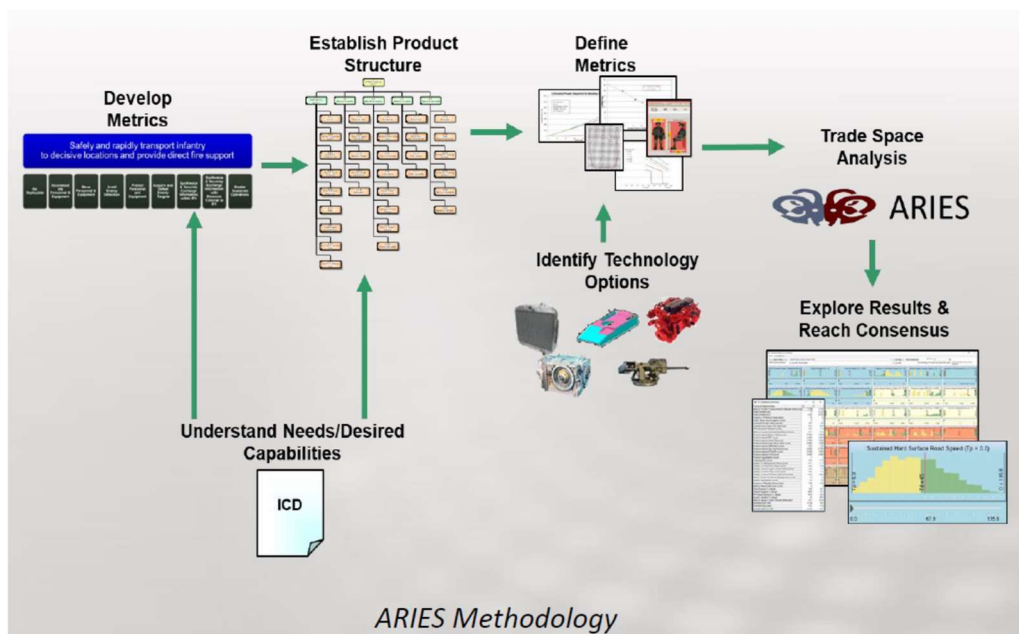
Tv   verktyg som användas för designrymskartläggning  r *Whole system trades analysis tool* (WSTAT) och *Advanced requirements integration & exploration system* (Aries) [22]. DEVCOM och GVSC använder och bidrar till utvecklingen av dessa verktyg. De kompletterar också med egenutvecklade verktyg, såsom *Logical decisions for Windows* (LDW) [23]. Delar av dessa ramverk relaterat till optimering och visualisering av koncept planeras bli kommersiellt tillgängligt under 2023. Ett sådant kommersiellt tillgängligt ramverk behöver dock kompletteras med modeller och data kopplat till fordonsystem av intresse. Från ett nationellt perspektiv skulle alltså kompatibla plattform- och systemmodeller behöva utvecklas för att göra ramverket användbart. På den marina sidan möjliggör FOI:s egenutvecklade verktygssviter *SubAn* och *ShipAn* f r ubåt- och fartygsdesign kartläggning av designrymden [15].

Det finns också flera kommersiella verktyg som inkluderar olika funktioner eller moduler som kan användas för att sammanställa delar av designrymder. Några större verktyg v rda att nämnas  r *ISIGHT* [24], *Simcenter HEEDS* [25], *Ansys DesignXplorer* [26] och *Hyperworks-Design explorer* [27]. Sammantaget är dessa verktyg i grunden olika typer av ingenj rsverktyg (CAE), där ramverk byggts kring teknik och konstruktionsspecifika områden såsom *Computer-aided design* (CAD), *Finite element analysis* (FEA), *Computational fluid dynamics* (CFD), *Multibody dynamics* (MBD) och *Computer-aided manufacturing* (CAM). Givet detta tenderar modellering med dessa verktyg att ske på hög detaljnivå och  r därmed bäst lämpade för senare produktutvecklingsskeden snarare än tidiga preliminära svepningar av designrymden.

Det finns även ett antal fristående kommersiella mjukvaror såsom *Optimus* [28] och *pSeven* [29] och några publikt tillgängliga verktyg för specifika komponentsystem som exempelvis kretsdesign [30]. Publika verktyg för prediktiv DSE eller TSE med markfordonsysteminriktning saknas i nuläget.

2.2.1 LDW och verktygssviten WSTAT/Aries

Verktygen WSTAT och Aries  r framarbetade av *Sandia national laboratories* (Sandia) [22] i samarbete med DEVCOM. Dessa verktyg  r inte fristående utan kompletteras med  rmspecifika system- och konceptmodeller nödvändiga för att genomföra övergripande designrymsstudier inom markdomänen.  rmspecifika system- och konceptmodeller utvecklas internt av olika forskningsgrupper inom DEVCOM, där GVSC arbetar tillämpat på markfordon. Andra verktyg framtagna av DEVCOM såsom LDW används också i olika delar av analysen [23].



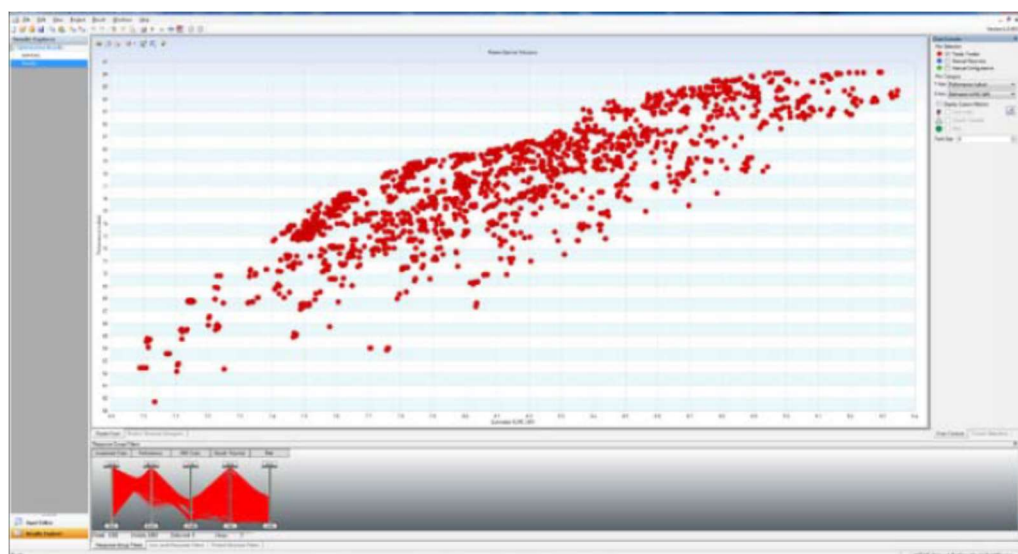
Figur 4. Illustrativt processflöde över utforskande framtagning av kravställning enligt Aries. Återgett med tillåtelse från Sandia [31].

Nämnda verktyg används i olika delar av processen av en designrymdsstudie. Först används Aries för att generera en kravställning på ett system genom att utforska och väga samman motstridiga krav, önskemål och drivkrafter, enligt figur 4. För att förstå behov, nytta och krav ska det första stadiet i processen involvera berörda intressenter. Den resulterande kravspecifikation från denna process består typiskt av tillåtna intervall på kravsatta parametrar, se figur 5, där det är möjligt att identifiera överlapp med andra kravsatta parametrar. Identifieringen och visualiseringen av dessa överlapp kan bidra till att tidigt identifiera, och jämkna, problematiska delar av kravställningen. Systemlösningar som berörs i kravställningen identifieras också.

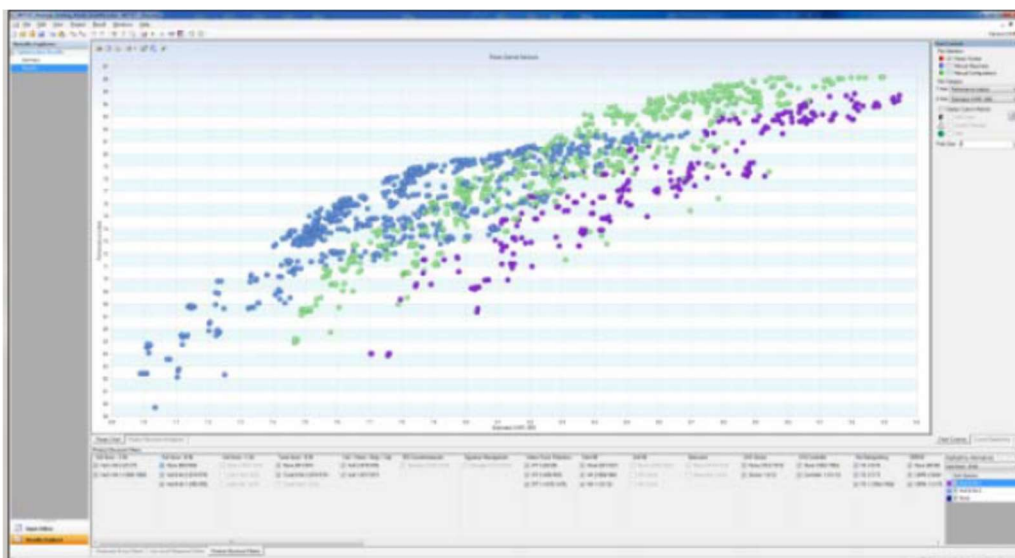
Functional Objective Name	Tp	Q
Ability to Fit Within Transport Assets & Negotiate Ramps (cou)	5.750	14.750
Weight Available (lbs)	0	37.230
Power Available (kW)	0.000	97.930
Frequency of Refueling Pauses (tanks)	46	32
Infantry Squad Carrying Capacity (score)	6	11
Acceleration & Dash Speed (seconds)	35.0	9.8
Sustained Hard Surface Road Speed (kph)	63.4	135.8
Off-Road Speed/Trafficability (index)	33.9	17.8
Ability to Traverse Worldwide Road Network (score)	34.1	81.8
Protection Against Medium Caliber (score)	0.7600	1.0000
Protection Against RPG (score)	0.2500	1.0000
Protection Against Indirect Fire (score)	0.7900	1.0000
Protection Against Under Vehicle Attack (score)	0.6600	1.0000
Protection Against CBRN Attack (score)	0.00	3.01
Protection Against Tank Fired Round (score)	0.4200	0.7200
Protection Against EFP/SAIED (score)	0.3300	1.0000
Protection Against ATGM (score)	0.4000	1.0000
Protection Upgradeability (score)	1	2
Targeting Ability (score)	0.50	0.75
Lethality vs. Standing Enemy Infantry (score)	0.01	0.75
Lethality vs. Prone Enemy Infantry (score)	0.20	0.56
Lethality vs. Enemy Lightly Armored Vehicle (score)	0.25	1.47
Lethality vs. Enemy Heavy Armor (score)	0.00	1.01
Lethality vs. Enemy Personnel Within Structure (kg)	4.000	8.000
Ability to Conduct Simultaneous Engagements (score)	33	92
Lethality Upgradeability (score)	0.0	0.8
Frequency of Reloading Pauses (days)	1.00	3.00
Ability to Reload Under Armor (score)	0	2
Visual Signature (% change)	16.8	-10.7
Thermal Signature (% change)	186.8	31.7
RF Emission Signature (% change)	155.0	42.5
Acoustic Signature (% change)	0.0	-90.0
Ability to Operate in Silent Overwatch Mode (days)	0.01	50.00
Estimated AUMC (\$M)	18 160	7 397
Schedule Risks (years)	2.50	0.00
Estimated D&S Cost (\$M)	26 288	6 630

Figur 5. Intervall för kravställda parametrar ges. Återgett med tillåtelse från Sandia [31].

När kravställningen har fastställts och berörda tekniker identifierats används WSTAT tillsammans med LDW och system- och konceptspecifika modeller interna för GVSC för att generera koncept som befolkar designrymden. Konceptfamiljerna itereras fram genom optimering av möjliga teknikkonfigurationer. Designrymden kan presenteras för olika sökta krav, se figur 6 och figur 7. Tekniktrender kan också identifieras i de olika konfigurationerna likt i figur 7.



Figur 6. Kartlagd designrymd i form av en flerdimensionell Paretofront, eller en optimal lösningskurva, där varje markerad punkt är en familjekonfiguration. Med tillåtelse från Sandia [22].



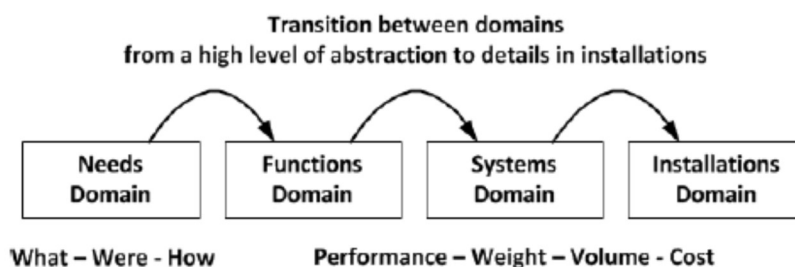
Figur 7. Genererade Paretofronter kan också analyseras med avseende på tekniktrender, här markeras identifierade tekniktrender med olika färgscheman. Med tillåtelse från Sandia [22].

När lämpliga kandidater valts från den kartlagda designrymden kan mer detaljerad analys, visualisering och manuell kvantifiering av intressanta konceptalternativ göras med hjälp av verktyget LDW. I den manuella kvantifieringen kan upp till sju parallella alternativ behandlas. Kvantifieringen och den resulterande rangordningen av alternativ bör göras tillsammans med involverade intressenter och återkopplas mot den kravspecifikation som genererats från verktyget Aries en tidigare del i processen.

Verktygen och metodiken som används av GVSC är under utveckling tillsammans med partners som *Automotive research center* (ARC) [11], *Clemson university* [32] och *Wayne State University* [13]. Nästa identifierade steg för verktygen är att utveckla verktygen från systemnivå, till system-av-systemnivå. Denna utveckling kräver sannolikt vidare utveckling av styrande underliggande optimeringsmetodiker. För detta ändamål har DP av en MDP identifierats som en möjlig intressant metodik [13], men givet problemets storlek har också behovet att undersöka alternativa och kompletterande metoder lyfts [11].

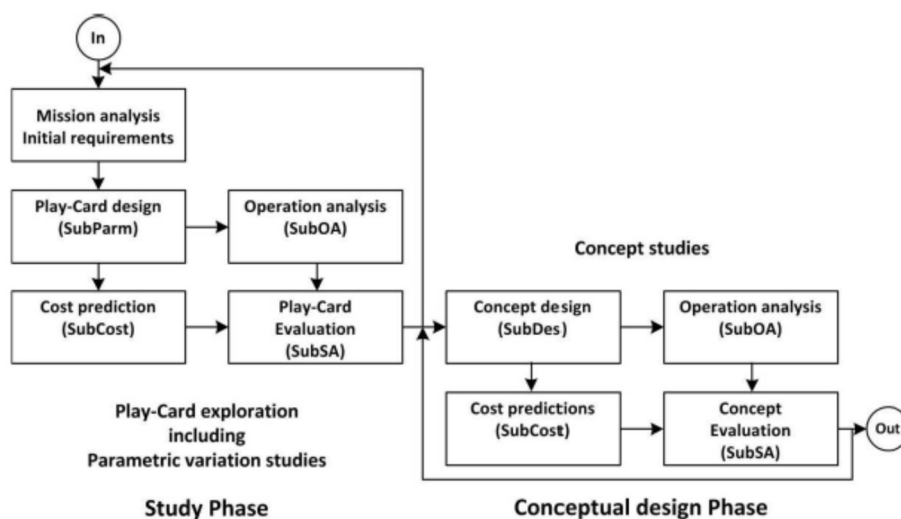
2.2.2 SubAn och ShipAn

De inom FOI utvecklade designverktygen SubAn för ubåtsdesign [14, 33] och ShipAn för ytfartyg [15] genererar en stor mängd tidiga fartygskoncept givet övergripande designbehov. Designarbete med dessa verktyg följer flödet enligt figur 8, med rörelsen från nytta till funktion, system och installationsdomän där prestanda, vikt, volym och kostnad modelleras över tid i takt med att designbeslut tas och konstruktionsparametrar bestäms. Flödet kan liknas vid beskriven arbetsprocess för designrymskartläggning inom DSE och TSE enligt figur 2. Resultatet är en avsmalnande designrymd i takt med att kunskap erhålls och designbeslut tas.



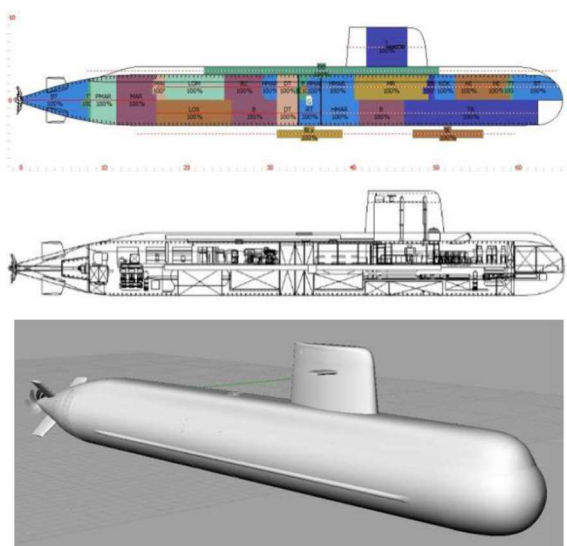
Figur 8. Schematisk bild av designprocess och rörelser mellan designstadier betraktade inom verktyget SubDes. Återgivet med tillstånd från [34].

Utvecklingsflödet kan också beskrivas baserat på undermoduler och funktioner enligt figur 9. I samma figur illustreras också den tidiga konceptfasen, eller studiefasen, och de tillhörande moduler som är ansvariga för tidig kartläggning av designrymden.



Figur 9. Flödesschema över integrerad process mellan SubDes och övriga länkade verktyg som tillsammans täcker tidiga produktutvecklingsstadiet fram tills konceptuell design. Återgivet med tillstånd från [34].

Efter tidig kartläggning kan varje koncept, inom verktygen benämnda som spelkort, utforskas vidare med stöd av *SubDes* där spelkort kvantifieras. SubDes medger justering och balansering relativt storlek och övergripande fysik, se figur 10. Detta för att vidare bearbeta och optimera betraktade spelkort.



Figur 10. Från topp till botten: Designprocess med *SubDes* där spelkort används för att generera koncept som sedan kan vidare utvecklas och slutligen röra sig från 2D till 3D-upplösning. Återgivet med tillstånd från [34].

Verktygen är väl underbyggda med kunskap och erfarenhet gällande ubåt- och ytfartygskonstruktion. Över tid introduceras dock ny teknik och möjliga funktioner vilket medför att vidmakthållande och utveckling av verktygen är ett ständigt pågående arbete inom FOI.

3 Möjligheter inom markdomänen

Verktyg för designrymskartläggning kan ha flera tillämpningar inom markdomänen. De kan användas för att göra tekniktrendanalyser och generera beslutsunderlag gällande anskaffning av framtida militära markfordon. Det ramverk och tillhörande systemmodeller som krävs för att göra designrymsstudier kan användas som verktyg för hotanalyser. Vidare kan systemmodeller som utgör en del i ett framtida verktyg användas i analyser av specifika delsystem och teknikintegrationsaspekter för ett markfordon i stort.

3.1 Tekniktrendanalyser och anskaffningsunderlag

En prediktiv designrymd kan, likt identifierat i figur 7, användas för att identifiera tekniktrender och utgöra underlag för vidare trendanalyser. Dessa typer av trendanalyser kan ge riktning till pågående och framtida anskaffningsprocesser gällande Försvarsmaktens framtida markfordon. Vidare kan inriktning ges till framtida forskning- och teknikutveckling. Detta kan bidra till nationell kompetensutveckling och även framtida försörjningssäkerhet.

Om en designrymsstudie har tillräckligt stor mängd designvariabler kan metoden också visa sig användbar för att identifiera nyttan med olika fordonsfunktioner eller fordonstyper. Man kan exempelvis tänka sig att en tät designrymd som inkluderar både bemannade och obemannade fordonstyper kan användas för att identifiera när vilken fordonstyp är att föredra framför den andra. Detta skulle kunna besvara olika typer av funktionsfrågor kopplade till nya obemannade markfordon.

3.2 Hotanalyser

Ett väl utbyggt verktyg för designrymskartläggning kan potentiellt nyttjas för att analysera motståndarförmågor. En typisk intressant analys skulle kunna bestå i en översättning av ett underlag i form av fotografier, rörlig bild eller annan media avbildande ett markfordon till ett sammansatt virtuellt fordon. Tillförlitligheten i en sådan analys står i förhållande dels till osäkerhet i använd underrättelseinformation, dels till de avgränsningar och antaganden som verktyget för designrymskartläggning har. För att möjliggöra denna typ av analys behöver alltså nämnda avgränsningar och antaganden göras med hänsyn till inte bara kunskap och prediktion av interna nuvarande och framtida förmågor, utan också de gällande troliga motståndare.

3.3 Analyser av delsystem och teknikintegrationsaspekter

Ett verktyg för designrymskartläggning kan användas för att analysera olika system- och integrationsfrågor för en markplattform. Typiska systemfrågor kan inkludera olika dimensionerings- och utrymmesfrågor. Exempel kan vara storlek på ingående komponentfamiljer och närliggande stödjande systemfunktioner. Vidare kan olika alternativa systemarkitekturer jämföras för att tydliggöra skillnader med fördelar och nackdelar. Typiska integrationsfrågor rör implementering av teknik eller system på en befintlig plattform. Integrationsfrågor medför dimensionering och påverkan av både introducerad teknik och befintliga system. Om betraktad teknik ligger långt i framkant och därmed är mer tekniskt omogen behöver analyserna av nödvändighet bli mer prediktiva. För att exemplifiera nyttan med ett potentiellt verktyg för designrymskartläggning har några system- och integrationsfrågor på plattformsnivå identifierats. Några exempel på system- och integrationsfrågor är;

- Inverkan av huvudbeväpnings kaliberstorlek kontra omkringliggande system och medförd ammunitionskapacitet.
- Framdrivningseffekt och inverkan av drivlinetyp, det vill säga fossil- eller hybriddrivlina, kontra omkringliggande system.
- Specifika drivlinefrågor gällande kalibrering av komponenter och komponentfamiljen i stort, där ett exempel kan vara en utredning av fördelaktigt storleksförhållande mellan batteri och framdriftsmotor för en hybriddrivlina.
- Inverkan och val av markkontaktssystem, såsom hjul eller band, som funktion av framkomlighetskrav med representativa hindertyper och terräng samt övriga fordons- och besättningsbehov.
- Jämförande analyser av olika upphängningssystem gällande framdrifts krav i terräng, fordonsergonomi och tillgängligt fordonsutrymme.
- Tillgänglighet och översyn av besättningsutrymmen kontra fordonsvolym.
- Integration av olika typer av besättningsskyddssystem, såsom automatiska motorsläckningssystem.
- Integration av nya vapensystem såsom högenergivapen, exempelvis mikrovågsvapen (HPM) eller laservapen (HEL). Dimensioneringsaspekter här involverar förutom utrymmeskrav och struktürkänslighet också elektronikinfrastrukturen i stort.
- Integration av nya aktiva skyddssystem (APS). Dimensioneringsaspekter här involverar likt för högenergivapen utrymmeskrav och struktürkänslighet och elektronikinfrastuktur.

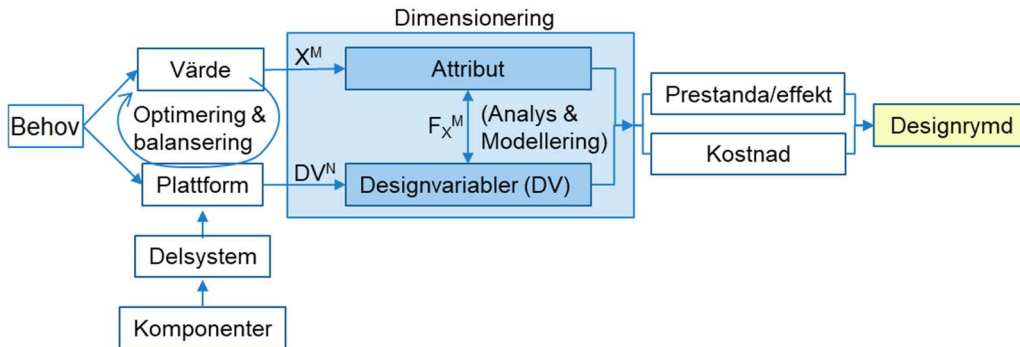
Några system- och integrationsfrågor specifikt för obemannade markfordon har också identifierats. Några exempel är;

- Identifiering av möjliga fordonsfunktioner såsom olika typer av soldatstöd (*loyal wingman* eller *buddy*), *Casualty evacuation* (CASEVAC), eller olika logistikfunktioner kopplat till övergripande fordonsparametrar för att synliggöra möjligheter och utmaningar med obemannade fordon.
- Framdrivningseffekt och inverkan av drivlina för mindre kontra större obemannade fordon där aspekter såsom tyst framdrift eller smygläge kontra uthållighet är viktiga parametrar.
- Jämförande analyser av olika upphängningssystem gällande framdrifts krav i terräng, fordonsergonomi och tillgängligt fordonsutrymme kopplat till tilltänkta fordonsfunktioner.

Notera att flera av dessa systemfrågor har mer eller mindre täta tvärkopplingar. Exempelvis är drivlinan tätt bundet till val av markkontaktssystem och upphängningssystem, men också till övriga elektriska komponenter som ska dela effektbehovet för hela fordonet. Denna komplexitet understryker behovet av det breda simuleringsbehovet, där ett verktyg för designrymskartläggning kan ge information kopplad till hela fordonet när en specifik systemfråga utreds.

4 Verkt yg f r kartläggning av designrymden

Ett verktyg för designrymskartläggning kräver ett ramverk bestående av en stor mängd samverkande systemmodeller, styrda av lämpliga dimensioneringsmetoder som knyter behov i kravställning till prediktiva koncept. Strukturen för en första version av verktyget *Vehicle tradespace explorer* (VTE) f lj r flödet i figur 11.



Figur 11. Ett verktyg för kartläggande av designrymd b r för varje genererat koncept översätta behov till plattform genom underliggande optimering, balansering och dimensionering av de ingående delsystemen.

Nuvarande verktyg  r ett ramverk, framtaget för att möjliggöra integration och framtagandet av framtida nödvändiga systemmodeller för att beräkna nödvändig fysik som forordonsdynamik, stridseffekter och kostnader. Ramverket är framtaget i *Python* [35].

4.1 Behov

Uppdragstyp inklusive terr ngf ruts ttningar och hinder tillsammans med betraktade styrande designvariabler definieras vid uppstart av en körning. Viktiga uppdragstyper som b r göras tillgängliga i ett framtida verktyg  r exempelvis strids-, rekognoserings-, evakuerings- och logistikuppgifter.

4.2 Optimering och balansering

Ett markfordon behöver leverera tillräcklig effekt för sökta förmågor. F r ett militärt markfordon kan exempelvis de förmågor som beskriver j rntriangeln, det vill säga verkan (v), skydd (s) och rörlighet (r), f r sökta stridsuppgifter betraktas. Skrivet som ett optimeringsproblem kan jämkningen mellan förmågor i j rntriangeln beskrivas som maximerandet av sökt strids- eller systemeffekt F kontra tillgänglig designvolym V enligt optimeringsproblemet

$$\max F(v, s, r) = p_v v \left(\sum_{i=1}^n f_{vi}(\bar{x}) \right) + p_s s \left(\sum_{i=1}^n f_{si}(\bar{x}) \right) + p_r r \left(\sum_{i=1}^n f_{ri}(\bar{x}) \right)$$

Utsatt för $F_v < V$, momentbalans för relevanta hinder
 $\bar{x}$ = designvariabler och parametrar

Ekvation 1

där p  r individuellt normaliserade viktsfunktioner som ans ts för att gradera ingående förmågor relativt varandra, f är individuellt bidrag till funktionseffekt per betraktad förmåga och F_v  r funktionsf rm gornas summerade volym. De individuella funktionsbidragen är typiskt kopplade till konkreta fordonskomponentsystem, där ett exempel kan vara framdriftseffekt och drivlinepaket. Samtliga av dessa underfunktioners volym behöver dessutom samsas inom en och samma designvolym V . Genererat fordon behöver också befinna sig i momentbalans f r kravställda hindertyper, vilket medför att positionering av komponentsystem givet vikt och fordonets masscentrum måste

balanseras. Sammantaget blir alltså kombinationen av förmågor ett svårlöst kombinatoriskt problem som behöver lösas för varje koncept i med volym V_i . Notera också att den tillgängliga designvolymen i sig själv är en viktig designparameter eftersom exempelvis minimerad höjd också minimerar fordonssignaturen. I detta skede är beskrivet optimeringsproblem identifierat som ett framtida arbete. Generering av designrymd är vidare beskrivet i stycke 4.8.

4.3 Värde, plattform och delsystem

Markfordonet betraktas som en plattform bestående av delplattformarna markkontaktbas, chassi, torn och station. Stationen kan ha kommunikations- eller verkansfunktion. Plattformdelarna beskrivs av olika attribut som beskriver dimensioner och funktioner. Chassi och hjulbas är plattformsdelar som alltid måste definieras, medan torn och stationer är valbara. De olika plattformsdelarna äger och bidrar till olika delar av sökt funktionsprestanda. Chassi, torn och eventuella stationer bidrar till den totala volymen V_i , medan hjulbasen placeras relativt övriga fordonsdelar.

4.4 Komponenter

Komponenter eller komponentfamiljer som bidrar till individuella funktionseffekter enligt ekvation 1 för ett fordon introduceras på lämplig plattformsdel. Varje komponent eller komponentfamilj har inte sällan tvärkopplingar till andra system, vilket gör att framtagandet av nya modeller för att beskriva dessa behöver ta hänsyn till detta.

När en komponent introducerats på lämplig plattformsdel behöver den beaktas i optimeringsproblemet definierat i ekvation 1 ovan. Detta betyder att komponenten måste placeras i tillgänglig designvolym enligt prioriteringsordningen

1. **Funktions och tillgänglighetsbehov.** Exempelvis behov av tillgänglighet gällande underhåll. Typiskt behov gällande motorpaket kan vara att detta bör placeras relativt fordons yttervägg för att möjliggöra snabbt motorbyte.
2. **Signaturbehov.** Tillåts fri placering av värmeutsläppande komponenter såsom avgassystem, eller är dessa enbart tillåtna i skymt läge?
3. **Försörjningskrav.** Exempelvis inledning och bortledning av luft och avgaser till motorpaket kräver kontakt till närmsta av signaturkrav tillåtna yttervägg.
4. **Fri placering.** Komponenter som kan placeras fritt relativt kvarstående fri designvolym.

4.5 Dimensionering

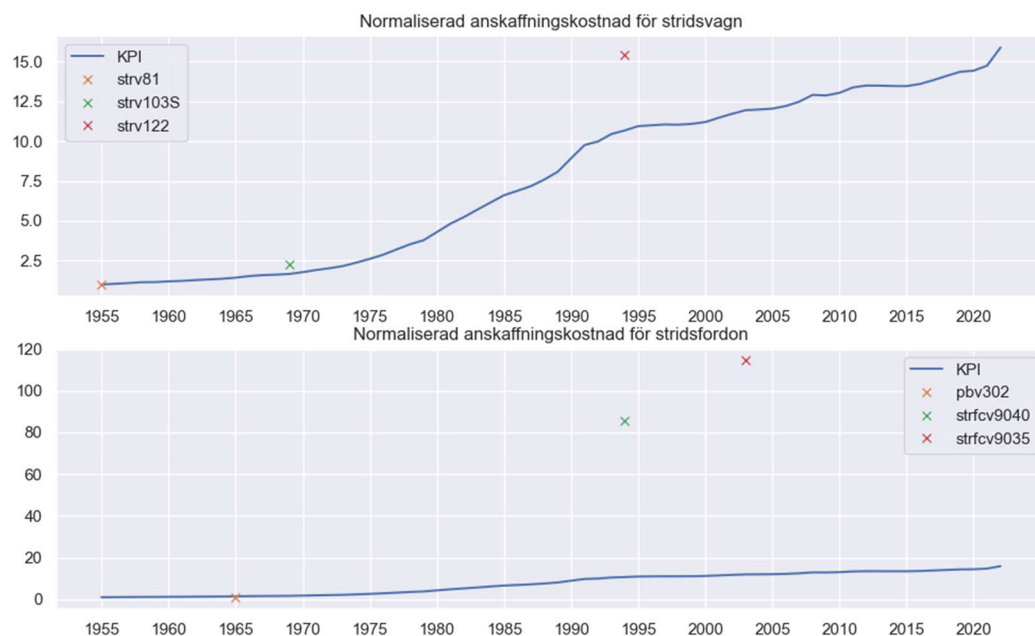
Komponenter behöver dimensioneras relativt övergripande designvolym och ställda driftbehov. Vald dimensioneringsmetod beror på komponent och system. Exempelvis behöver motorsystem såsom dieselmotor väljas så att drivlinesystemet stödjer fordonsvikts- och framkomlighetskrav.

4.6 Prestanda- eller effektmått

Genererade koncept behöver värderas relativt ett prestanda- eller effektmått. Prestandamått mäter funktionen hos ett eller flera samverkande delsystem och är ofta ett typiskt tekniskt mått. Ett prestandamått kan exempelvis vara ett fordons bränsleförbrukning eller ett vapensystems mått på träffsäkerhet. Effektmått värderar hur väl ett system löser en given uppgift. Ett effektmått kan därmed formuleras för olika systemnivåer och vara mer eller mindre aggregerat relativt det betraktade militära systemet.

4.7 Kostnad

Kostnader för ett nytt militärt markfordon bör beakta fordonets hela livslängd, från design och inköp till användning med uppgraderingar fram tills uppfylld teknisk livslängd med efterföljande återbruk. I denna förstudie representeras kostnad dock enbart av historiskt justerad viktsnormaliserad anskaffningskostnad relativt markfordonstyp, stridsvagn kontra stridsfordon, se figur 12.



Figur 12. Normaliserad anskaffningskostnad för svensktillverkade stridsvagnar och stridsfordon, inklusive pansarbandvagn 302, mellan åren 1965 och 2020. Data från [36].

4.8 Generering av designrymd

Designrymden bestäms för närvarande av sökta ytterligheter i plattformsmått för chassi, torn och eventuella stationer. Designrymden genereras mellan dessa ytterligheter genom att kombinera dessa plattformsmått för att generera efterfrågat antal koncept. Det möjliggör kartläggning av mindre kontra större designrymd med avseende på behov.

En designrymd befolkad av få antal koncept blir inte komplett, dock kan olika sätt att kombinera designvariabler och värden bredda även en tunt befolkad designrymd. Exempelvis kan en designrymd konstruerad från ett fåtal slumpmässiga kombinationer av plattformsdelar också innehålla koncept nära faktisk Paretofront. En sådan metod kan representera en balans mellan beräkningsstorlek och antal konfigurationer för stora designrymskartläggningar som involverar en stor mängd designvariabler. När VTE-verktyget används för att generera en designrymd baserat på ett fåtal koncept används denna metod för att söka bredda underlaget.

5 Fallstudie – Förbrukning kontra fordonsstorlek

En fallstudie har genomförts för att stödja framtagandet av ramverket och initiera arbetet med att identifiera och ta fram nödvändiga systemmodeller.

5.1 Avgränsningar

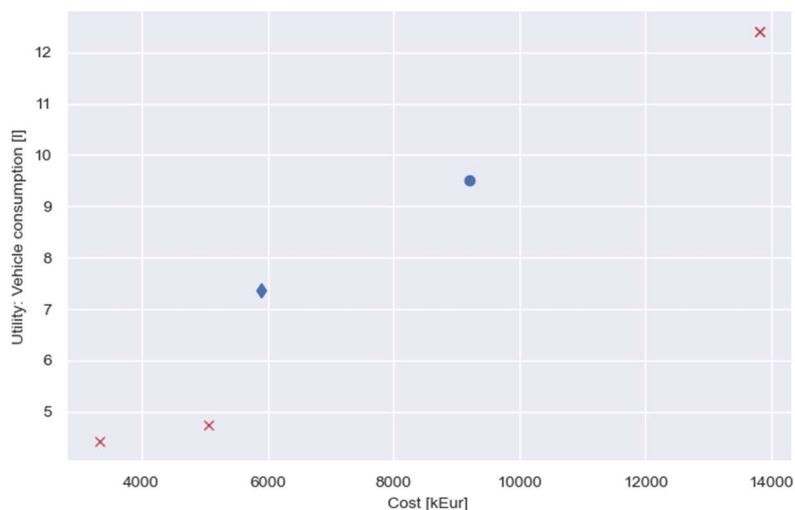
Viktigt att notera är att resultatet från fallstudien inte är komplett utan har fokuserat på ett antal utvalda komponentsystem kopplat till rörlighet. Verktöget bör vidareutvecklas för att inkludera utelämnade komponentsystem kopplat till rörlighet. Dessutom behöver verktöget kompletteras med komponentsystem relaterat till verkan och skydd. Resultaten ska därmed främst ses som illustrativa, med fokus på möjlig framtida nytta med vidareutvecklat verktyg.

5.2 Resultat

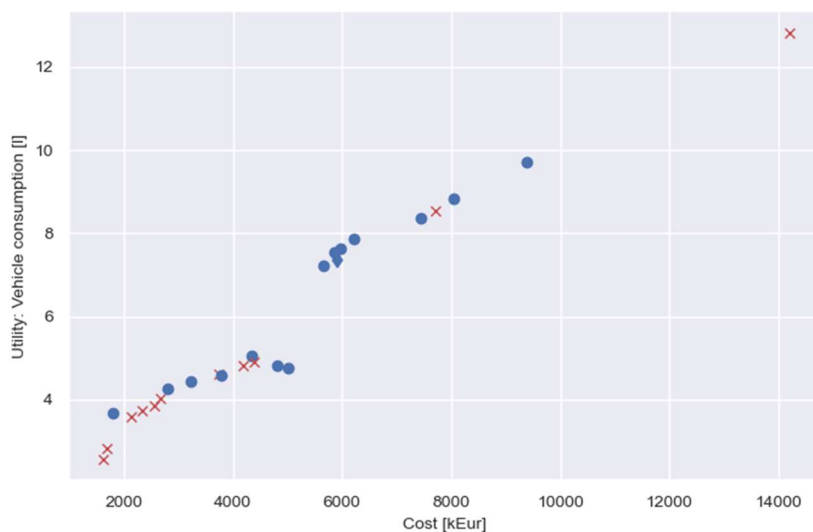
Resultatet av fallstudien är en designrymd med avseende på bränsleförbrukning för en hybriddrivlina. Hybriddrivlinan beskrivs vidare i bilaga 1 – seriehybridmodell. En designrymd har alltså genererats där prestandaparametern bränsleförbrukning inom förmågan rörlighet ställs mot historiskt justerad anskaffningskostnad för fordonskoncept av olika storlekar. För denna fallstudie har följande designparametrar varierats:

- Chassibredd: min 2 m – max 6 m
- Chassilängd: min 1.5 m – max 10 m
- Chassihöjd: min 2 m – max 3 m
- Tornbredd: min 1 m – max 5 m
- Tornhöjd: min 1 m – max 2 m

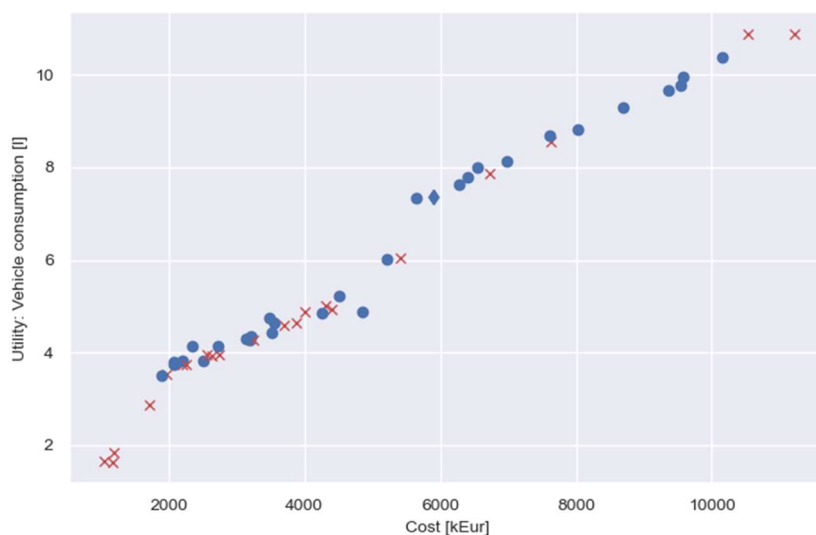
Ett antal genererade designrymder med olika densitet ges i Figur 13 till figur 15.



Figur 13. Uppspänd designrymd där bränsleförbrukning ställts mot historiskt justerad anskaffningskostnad för fem fordonskoncept för betraktat intervall.



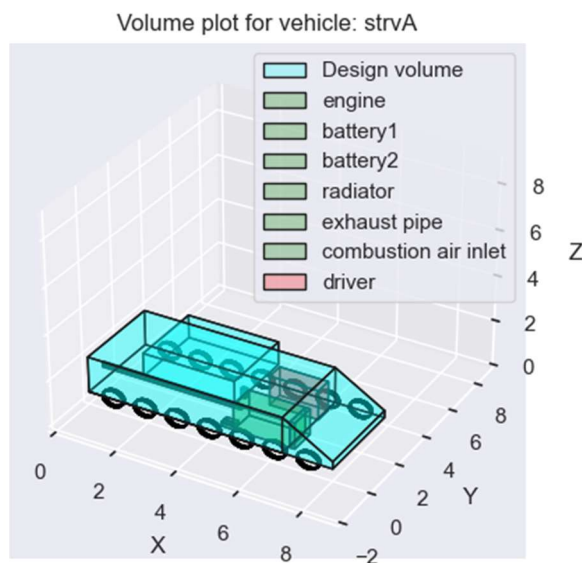
Figur 14. Uppspänd designrymd där bränsleförbrukning ställts mot historiskt justerad anskaffningskostnad för 25 fordonskoncept för betraktat intervall.



Figur 15. Uppspänd designrymd där bränsleförbrukning ställts mot historiskt justerad anskaffningskostnad för 50 fordonskoncept för betraktat intervall.

Varje markerat värde motsvarar ett koncept. Ett koncept markerat med diamant är ett första initialt koncept med kända dimensioner och överensstämmer mellan alla tre genererade designrymder. Koncept markerade med röda kryss har bedömts som inte funktionsdugliga. Anledningar kan vara flera, såsom att krävda komponenter inte ryms inom designvolymen eller att torn inte ryms relativt chassistorlek. Dessa typer av koncept kan i vidare arbete sållas bort men behålls i detta läge eftersom även inte helt funktionsdugliga alternativ kan innehålla intressanta designval som kan beaktas manuellt i ett senare skede. För högre densiteter, figur 14 och figur 15, antar genererad designrymd liknande format som de som visas i figur 6. Eftersom generering av koncept i denna förstudie är slumpmässig varierar designrymder i de tre figurena.

För att vidare undersöka ett koncept kan det illustreras individuellt, se figur 16 nedan, med tillgänglig designvolym befolkat av delsystem och komponenter. Ett antal representativa delsystem och komponenter, såsom motor och förarutrymme, befolkar designvolymen. I detta förarbete har enbart ett fåtal delsystem och komponenter betraktats och ytterligare arbete krävs för att beskriva ett komplett fordon. Vidare behövs tillgänglig designvolym troligen justeras vidare.



Figur 16. Illustration av representativ tillgänglig designvolym (cyan) befolkad av några representativa komponenter (grön) och en förare (röd).

5.3 Resultatets begränsningar

Den i förstudien begränsade mängden komponenter kombinerat med det låga antalet betraktade designparametrar gör att designrymden i dessa figurer är mer illustrativ än representativ. Det är dock möjligt att identifiera potentialen i metoden, där en stor bredd av konfigurationer med olika resultat kan analyseras parallellt.

5.4 Alternativa effekts- och kostnadsmått

I nuvarande fallstudie betraktas fallet prestandaparameter kontra anskaffningskostnad. Anskaffningskostnad bör på sikt utvecklas till en bredare livscykelkostnad för att ta hänsyn till inte bara anskaffning utan också användningskostnad, underhåll, del- och fulluppgraderingar och sluthantering och återbruk. Andra värderingsmått än kostnader kan dock också vara av intresse att studera på sikt. Några sådana värderingsmått kan exempelvis vara stödjande logistikkedja, soldaters träningsbehov, utbildning och användar- och operatörsvänlighet. Vidare kan ett sammanslaget komplexitetsmått som värderar både kostnad, träningskrav och utmattningsimplikationer av ökad teknikkomplexitet vara värdefullt att utveckla för denna typ av analys.

5.5 System-av-systemnivå

På sikt kan även ett verktyg för designrymskartläggning vidareutvecklas mot ett fullstort system-av-system-optimeringsproblem, där flera lager av hierarkin löses, från delsystem till plattformskonfiguration till förbandskombination. Att adressera detta fulla system-av-system innebär dock en signifikant insats. Resultat från en sådan vidareutveckling är inte givna och kan om realiserbart förväntas först på sikt. Som ett första steg bör verktyget användas i kombination med representativa prestanda- och stridseffektsmått härledda från viktiga aspekter inom system-av-systemnivån. Detta upplägg kan liknas vid tidigare arbete på prestandamått och stridseffekter [37]. Då denna metodik gör att olika stridseffekter kan betraktas parallellt kan denna approximation ge en god balans mellan problemkomplexitet, beräkningskostnad och tydlighet i resultat.

6 Diskussion

Designrymdskartläggning är en lovande metod för vidare systemarbete inom markdomänen. Metoden med ramverk och samverkande systemmodeller kan användas för att stödja planerings- och anskaffningsarbete av Försvarmaktens framtida markfordon och inom hotanalys. Dessutom kan specifika systemmodeller användas vid djupare analys av utvalda fordonssystem. Arbetet med att ta fram ramverk och systemmodeller bidrar också till myndigheternas kunskapsuppbyggnad. Eftersom hela markfordonet står i centrum bidrar också arbetet till utökad samverkan mellan individuella discipliner och specifika områden viktiga för framtida militära markfordon. Denna effekt kan i sig självt motivera vidare arbete.

Idag saknas publikt eller kommersiellt tillgängliga verktyg för designrymdskartläggning fullt utbyggda för markfordon. De verktyg som finns tillgängliga är begränsade till övergripande ramverk och systemhantering och behöver därmed byggas ut för markfordon före användning. För komponentdesign kan exempelvis delar av arbetet göras inom flera breda CAE-mjukvarusviter. Dessa mjukvarusviter kräver dock tillgång till detaljerade CAD-modeller och resulterande data behöver sorteras och omvandlas till sökt värderingsmått. Den amerikanska verktygssviten WSTAT/ARIES, utvecklad just för designrymdsstudier och konceptjämförelser, är inte heller nyckelfärdig utan behöver kompletteras med specifika markfordonsmodeller relevanta för nationella behov innan representativa designrymdsstudier kan göras inom detta ramverk. Dessutom är det viktigt att notera att den amerikanska verktygssviten är uppbyggd över en större mängd organisationer. Detta medför sannolikt att en större mängd resurser krävs för att förvalta, utveckla och använda ramverket. Det är i dagsläget osäkert om ett sådant arbetssätt och ramverk kan uppfyllas ur ett nationellt resursperspektiv. Sammantaget visar detta på att inget verktyg i sin helhet uppfyller möjligheterna med metoden utifrån ett nationellt kunskaps- och resursperspektiv. Detta motiverar FOI:s interna arbete med verktygsutveckling inom området. Det är värt att uppmärksamma att FOI:s verktygsutveckling också bör stödja införlivandet av andra tillgängliga verktyg och parallella ramverk när motiverat.

FOI:s verktygsutveckling inom den marina domänen, med verktygen SubAn och ShipAn, är en god förlaga för ambitionen också inom markdomänen. Det finns dock några viktiga skillnader att notera för markdomänen vilket styr detaljnivån på ett framtida verktyg. Till att börja med är nuvarande tendens att markfordon snarare anskaffas från en globalt tillgänglig fordonsserie än att de utvecklas nationellt. Dessutom behöver markfordon anskaffas i större mängd och till lägre enskild kostnad. Detta kräver en taktad, mer kostnadspressad, produktionsprocess med en högre andel automatiserade processer. En design med högre andel automatiserad process är svår att modifiera i ett senare skede. För en köpare betyder detta att denne antingen behöver involvera sig redan i produktutvecklingsskedet, alternativt bli begränsad till det för plattformen modulariserade systemet. Sammantaget medför detta att framtida verktyg bör användas för att identifiera trender, fokusområden och gynnsamma framtida teknikkonfigurationer och effekten av dem snarare än att dimensionera individuella konstruktionsparametrar. Detta för att möjliggöra framtagandet av underlag för tidiga designspecifikationer som kan stötta anskaffningsprocessen av framtida markfordon.

Verktygsramverket som presenteras i denna rapport visar metodens potential. Nyttan med att analysera en stor bredd av tidiga parallella koncept är tydlig. Inkluderingen av en grafisk representation av teknik kontra volym illustrerar inte bara det övergripande optimeringsproblemet, utan tydliggör också nödvändigt vidarearbete. Detta då ramverket så här långt är glest befolkat av de system och delsystem som utgör ett markfordon.

Även om framtagandet av ett FOI-verktyg för kartläggning av designrymden har stor potential finns det också utmaningar. Utmaningarna rör utveckling och validering av verktyg med involverade systemmodeller, men också faktisk tillämpning av det i

intressanta fallstudier. Tid och resurser kommer att krävas till verktygets utveckling och upprätthållande.

Behov och analysbredden som möjliggörs av ett verktyg för designrymskartläggning är stort och överväger aspekter gällande investerad tid och utmaningar. Nuvarande omvärldssituation med allt högre ställda krav på tillväxt och förbättringsarbete inom Försvarmakten betyder också ökade krav på alla försvarsmyndigheters berednings- och anskaffningsarbete, hotbildsanalysarbete och försörjningssäkerhetsplanering. Verktyg för designrymskartläggning och resulterande designrymsstudier kommer sannolikt att möjliggöra detta arbete på sikt. Därmed motiveras vidare arbete på området.

7 Framtida arbete

Framtaget verktyg för kartläggning av designrymden är ett tidigt ramverk och är inte ett färdigt verktyg. Verktöget är glesst befolkat av de system- och delsystem som behövs för att fullt ut beskriva ett militärt markfordon. I nuvarande verktyg inkluderas ett antal viktiga system gällande rörlighet. Fler behöver tillkomma. I förstudien behandlas inte heller skydds-, och verkanssystem eller system kopplat till soldatstöd och ledningssystem. Arbete inom dessa områden kommer alltså behöva kompletteras med.

Förutom att utvidga betraktade system behöver delar av metodiken vidareutvecklas. Bland annat behöver nuvarande modeller vidareutvecklas kopplat till optimeringsproblem, kostnader och effektmåttutveckling.

För att stötta vidare arbete bör framtida utveckling kretsa runt specifika frågeställningar och fallstudier. Några möjliga har identifierats i stycke 3.3.

8 Referenser

- [1] P. W. Christensen och A. Klarbring, An introduction to structural optimization, Springer, 2010.
- [2] S. Gudmundsson, General aviation aircraft design, Butterworth-Heinemann Inc, 2014.
- [3] A. Papanikolaou, Ship Design - methodologies of preliminary design, New York: Springer, 2014.
- [4] A. Kline, D. Ahner och R. Hill, "The weapon-target assignment problem," *Computers and operations research*, pp. 226-236, 2019.
- [5] M. Gries, "Methods for evaluating and covering the design space during early design development," *Integration, the VLSI journal*, pp. 131-183, 2004.
- [6] A. M. Ross och D. Hastings, "The tradespace exploration paradigm," *INCOSE International Symposium*, pp. 1706-1718, 2014.
- [7] B. Toche, R. Pellerin och e. al., "Set-based design: a review and new directions," *Design Science*, vol. 6, 2020.
- [8] K. Smead, "A descriptive guide to conducting trade space analysis (TRAC-M-TR-15-029)," TRADOC analysis center (now TRAC), Monterey, 2015.
- [9] US Army, "U.S. Army Combat Capabilities Development Command (DEVCOM)," 2023. [Online]. Available: <https://devcom.army.mil/>. [Använd 08 12 2023].
- [10] US Army, "Ground vehicle systems center (GVSC)," 2023. [Online]. Available: <https://www.usarmygpsc.com/>. [Använd 8 December 2023].
- [11] Automotive research center (ARC), "Best practices for computational tradespace exploration, analysis and decision-making," 2023. [Online]. Available: <https://arc.engin.umich.edu/research/projects/best-practices-for-computational-tradespace-exploration-analysis-and-decisionmaking-tradespace-exploration-analysis-and-decisionmaking/>. [Använd 8 12 2023].
- [12] E. Specking, G. Parnell, E. Pohl och R. Buchanan, "Early design space exploration with model-based system engineering and set-based design," *Systems*, vol. 6, nr 4:45, 2018.
- [13] S. H. Rapp, Product development resilience through set-based-design, Wayne state university: Wayne State University Dissertations, 2017.
- [14] M. Nordin, A Novel Submarine Design Method. Based on technical, economical and operational factors of influence, Göteborg: Doktorsavhandling vid Chalmers, 2015.
- [15] M. Garmelius, E. Ovegård, J. Persson, F. Schönfeldt och M. Milton, "Slutrapport för FoT-projektet Simuleringsbaserad systemdesign och sjöoperativ värdering," FOI Memo 8038, 2022.
- [16] A. Ross och D. Rhodes, "Value-driven tradespace exploration for system design - modeling and exploring the tradespace," MIT, Massachusetts, 2010.
- [17] H. Adeli, Advances in design optimization (1st ed), CRC Press, 2014.

- [18] B. Thompson, "Tradespace analytics to support major acquisition programs," 2020. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1807362>. [Använd 8 December 2023].
- [19] R. Bellman, "Dynamic programming," *Science*, pp. 34-37, 1966.
- [20] C.-S. Cheng, *Theory of Factorial Design: Single- and Multi-Stratum Experiments* (1st ed), Chapman and Hall/CRC, 2013.
- [21] J. R. Martins, A. Arbor och A. Ning, *Engineering design optimization*, Cambridge university press, 2021.
- [22] Sandia National Laboratories, "WSTAT - Whole systems trades analysis tool," 2023. [Online]. Available: <https://www.sandia.gov/csr/center-for-systems-reliability/tools/wstat/>. [Använd 8 December 2023].
- [23] US Army, DEVCOM, "Analytical tools - Logical Decisions for Windows (LDW)," 2023. [Online]. Available: <https://www.cbc.devcom.army.mil/decision-analysis/analytical-tools/>. [Använd 8 December 2023].
- [24] Dassault systèmes, "ISIGHT & The Simulia execution engine," 2023. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/isight-simulia-execution-engine/portfolio/>. [Använd 8 December 2023].
- [25] Siemens, "Simcenter Heeds," 2023. [Online]. Available: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/integration-solutions/heeds/>. [Använd 8 December 2023].
- [26] Ansys, "DesignXplorer," 2023. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/>. [Använd 8 December 2023].
- [27] Altair, "https://altair.com/hyperworks," 2023. [Online]. [Använd 8 December 2023].
- [28] Noesis solutions, "Optimus," 2023. [Online]. Available: neosissolutions.com/our-products/optimus.
- [29] Datadvance, "pSeven," 2023. [Online]. Available: <https://www.pseven.io/>. [Använd 8 December 2023].
- [30] D. Paletti, D. Conficconi och M. D. Santambrogio, "Dovado: An open-source design space exploration framework," i *2021 IEEE International Parallel and distributed processing symposium workshops (IPDPSW)*, Portland, 2021.
- [31] Sandia National Laboratories, "ARIES- Advanced requirements integration & exploration system," 2023. [Online]. Available: [sandia.gov/csr/center-for-systems-reliability/tools/aries/](https://www.sandia.gov/csr/center-for-systems-reliability/tools/aries/). [Använd 8 December 2023].
- [32] J. Daniels, C. Turner, J. Wagner, N. Masoudi och e. al., "Designing the design space: evaluating best practices in tradespace exploration, analysis and decision-making," i *SAE International journal of advances and current practices in mobility-v131-99EJ*, 2022.
- [33] M. Nordin och M. Garmelius, "Cost estimation, prediction and risk analysis in the early phases of submarine design," FOI-R-3888-SE, Stockholm, 2015.
- [34] M. Nordin, M. Garmelius och L. Bossér, "A Comparative study on the seamlessness between the parametric based design programmes SubParm and SubDes compared to built submarines," FOI-R--3887--SE, Stockholm, 2016.

- [35] G. Van Rossum, J. Drake och L. Fred, "Python 3 reference manual," CreateSpace, Scotts Valley, CA, 2009.
- [36] P. Nordlund, J. Åkerström, B. Öström och H. Löfstedt, "Kostnadsutveckling för försvarsmateriel," FOI-R--3213--SE, Stockholm, 2011.
- [37] E. Fedina, N. Stensbäck, J. Stenberg och J. Agnarsson, "Stridseffekt för mekaniserad strid," FOI-R-5098-SE, Stockholm, 2020.
- [38] The MathWorks Inc., *MATLAB (R2015b)*, Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2023.

Bilaga 1 – Seriehybridmodell

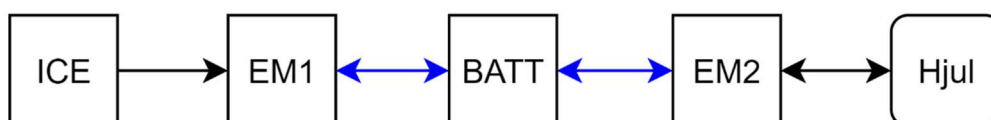
Bakgrund

Med hybridfordon avses ett fordon med två eller fler system för framdrivning. Detta kan till exempel vara en bil utrustad med en förbränningsmotor och en elmotor som utnyttjas i olika delar av körningen för att förbättra bränsleförbrukningen. Grundtanken är att olika former av motorer presterar bättre eller sämre i olika arbetsområden och genom att utnyttja dem där de presterar som bäst kunna förbättra hela farkostens framföring. Områden som kan vara av intresse att prestera bättre inom skulle till exempel kunna vara tyst gång, låg bränsleförbrukning eller bättre prestanda i form av till exempel accelerationsförmåga. Det finns olika former av hybrida konfigurationer som ger olika för och nackdelar. De två vanligaste systemen är seriehybrid samt parallellhybrid. En internt utvecklad seriehybridmodell används i utförd TSE-analys.

Seriehybrid

En seriehybrid är uppbyggd så att en förbränningsmotor (ICE) är kopplad med utgående axel direkt på en elmotor (EM1) som agerar som generator. EM1 genererar ström som laddar en energikälla t.ex. ett batteri. Batteriet är i sin tur kopplat till en annan elmotor (EM2) som används till att driva fordonet framåt. Förenklat skulle en seriehybrid kunna beskrivas som ett elfordon med integrerad laddningsförmåga eller förlängning av batterikapaciteten.

Seriehybridsystemet kan ses i figur 17.



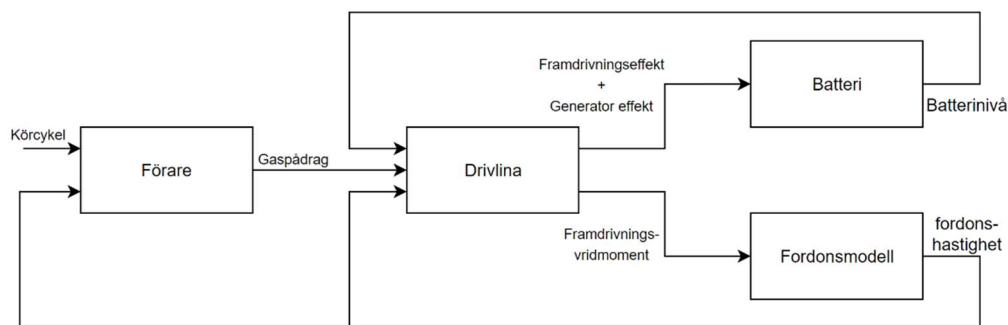
Figur 17. Principskiss för en seriehybrid där överföringen av energi sker enligt pilarna. Svart och blå pil innebär mekanisk energiöverföring respektive elektrisk energiöverföring.

Fördelen med en seriehybrid är att förbränningsmotorn är frikopplad från framdrivningen av fordonet. Eftersom en förbränningsmotor har ett väldigt specifikt intervall i vilket den har hög verkningsgrad kan förbränningsmotorn utnyttjas för laddning av batteriet där förbränningsmotorn arbetar med högst verkningsgrad för att få ut så mycket energi från bränslet som möjligt till framdrivning. Vidare kan förbränningsmotorns effekt väljas mer fritt eftersom den inte har kravet på sig att accelerera fordonet utan endast behöver kunna ladda energikällan tillräckligt för att hålla fordonet operativt.

Modell

Seriehybriden är modellerad i *Matlab R2015b* och *Simulink* [38]. Parametrar för fordon och tillhörande drivlina definieras i Matlab medan fordonets dynamik och interaktion med omgivningen simuleras i Simulink. Simulinkmodellen är uppbyggd i fyra större block. Dessa kan ses i figur 18 och består av ett förarblock, en drivlina, ett batteri och en

fordonsmodell.



Figur 18. Överblick av hur Simulinkmodellen är uppbyggd med dess 4 funktionsblock samt de variabler som skickas dem emellan.

Förbränningsmotor, generator, batteri och elmotor modelleras i vidare detalj med hjälp av representativt underliggande beteende och medförda konstanter. Exempelvis används en typisk momentkurva representativ för dieselmotorer som utgångspunkt för förbränningsmotors beteende avseende verkningsgrad och vridningsmoment relativt motorstorlek. Vidare justeras också parametrar för fordonets vikt, mått, motståndskoefficienter för rullfriktion, luftmotstånd och väglutningen relativt de konceptdata som genererats inom TSE-analysen.

TSE-analys

Parametrar i hybriddrivmodellen ansätts genom styrande TSE-ramverk för varje körning för att generera ett specifikt koncepts bränsleförbrukning givet en användarcykel. Eftersom fokus för arbetet presenterat i denna rapport är att bygga upp övergripande ramverk beaktas enbart en konstant hastighet över en körtid om 10 min. För faktisk representativ bränsleförbrukning bör en full körcykel givet avsedd användning introduceras. Introduceras en full körcykel ökar också övergripande beräkningstid.

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se