

Förstudie av rörligheten hos stridsfordon

Modeller, metoder och teknologier

JOHANNES ANDERSEN, EKATERINA FEDINA,
GUSTAV TOLT, NICLAS STENSBÄCK



Johannes Andersen, Ekaterina Fedina, Gustav
Tolt, Niclas Stensbäck

Förstudie av rörligheten hos stridsfordon

Modeller, metoder och teknologier

Titel	Förstudie av rörligheten hos stridsfordon – Modeller, metoder och teknologier
Title	Pilot study of combat vehicle mobility – Models, methods and technologies
Rapportnr/Report no	FOI-R--5280--SE
Månad/Month	April
Utgivningsår/Year	2022
Antal sidor/Pages	30
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	FM
Forskningsområde	Vapen, Skydd och säkerhet
FoT-område	Marksystem
Projektnr/Project no	E85026
Godkänd av/Approved by	Cecilia Dahlgren
Ansvarig avdelning	Försvarteknik

Bild/Cover: David Kristiansen, Försvarsmakten

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

Ett stridsfordons rörlighet har jämte verkan, skydd och övriga förmågor en avgörande betydelse för dess förmåga att verka. Denna förstudie presenterar en sammanfattning av kunskapsläget inom FOI samt beskriver kortfattat forskningsläget inom området överlag. Inventeringen av existerande modeller inom rörlighet hos FOI har tydliggjort behovet av att påbörja framtagandet av delsystemmodeller inom fordonsdynamik samt behovet av att utveckla lämplig metodik för att aggregera resultat från delsystemnivå (prestanda) till plattform- och förbandsnivå. En metodik för detta har arbetats fram och presenteras i rapporten. Det framtida arbetet bör fortgå i två tåter: dels fortsatt modellutveckling, dels studier av särskilt viktiga framtida teknologier.

Nyckelord:

Stridsfordon, stridsvagnar, rörlighet, stridseffekt, fordonsdynamik

Summary

The mobility of a combat vehicle is, next to firepower and protection as well as other capabilities, of crucial importance for its combat effectiveness. This pre-study presents a summary of the current state of knowledge within FOI as well as the overall state of research within the area of mobility. A survey of the existing models for mobility simulations available at FOI has made clear a need for future development of subsystem models within the area of vehicle dynamics as well as the need to develop a suitable methodology to aggregate results from subsystem levels (performance) to military units (combat effectiveness). A methodology to address this has been developed and is presented in the report. Future work should proceed with continued model development and studies of technologies of particular interest.

Keywords:

Combat vehicles, main battle tanks, mobility, combat effectiveness, vehicle dynamics

Innehållsförteckning

1	Inledning	6
1.1	Bakgrund.....	6
1.2	Syfte.....	7
1.3	Definition av rörlighet.....	7
1.4	Läsanvisningar.....	8
2	Rörlighetsforskning i Sverige och omvärlden.....	9
2.1	Litteraturstudie med fokus på tidigare forskning inom FOA och FOI...9	
2.1.1	Fram till och med 1970-talet	9
2.1.2	1980-talet	11
2.1.3	1990-talet	12
2.1.4	2000-nutid	14
2.1.5	Närliggande forskning på FOI kopplat till rörlighet	15
2.2	NATO Reference Mobility Model	15
2.3	Aktiviteter i NATO Science & Technology Organisation	18
2.3.1	AVT-327 – Standardization Recommendation (STANREC) Development for Next-Generation NATO Reference Mobility Model (NG-NRMM)	18
2.3.2	AVT-341 – Mobility Assessment Methods and Tools for Autonomous Military Ground Systems.....	19
2.3.3	AVT-CDT-308 – Cooperative Demonstration of Technology for Next-Generation NATO Reference Mobility Model (NG- NRMM)	19
2.4	Aktiviteter i European Defence Agency	20
2.5	Alternativa framdrivningskoncept	20
3	Metodik för värdering av rörlighet	22
4	Pågående verksamhet	25
4.1	Utveckling av stridsfordonsmodeller.....	25
4.2	Uppskattning av rörlighet utifrån geografisk information	26
5	Slutsatser och framtida arbete	28
6	Referenser.....	29

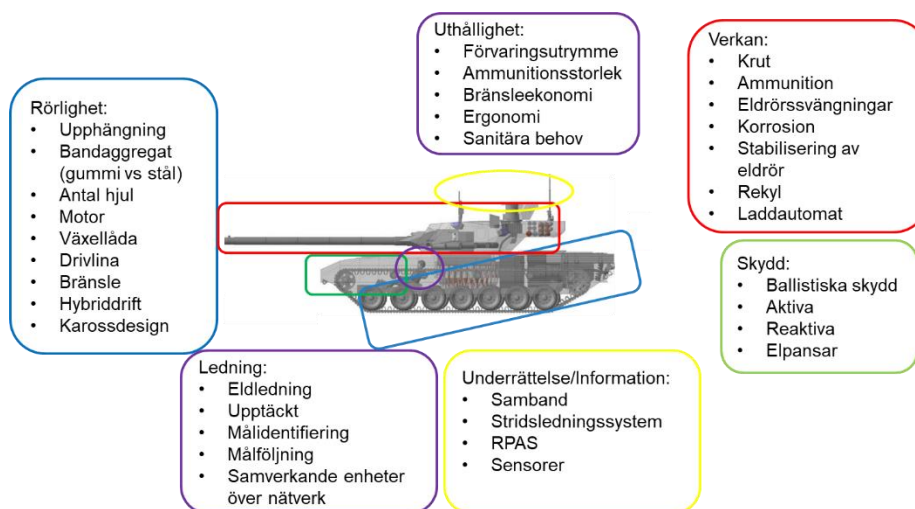
1 Inledning

Projektet *Markfordon – rörlighet och systemintegration* är en del i det nystartade FoT-området *Marksystem*. Projektet syftar till att dels utveckla modeller och metoder för att värdera effekten av fordons rörlighet ur ett stridstekniskt perspektiv, dels utveckla metoder och verktyg för systemdesign inklusive analys och integration av viktiga framtida teknologier. I denna rapport beskrivs hur man i detta FoT-projekt har problematiserat kring rörligheten hos framtidens markplattformar, ur flera perspektiv; hur rörligheten bör värderas, vilka modeller och tekniska underlag som krävs för detta och slutligen hur analys av fordons rörlighet kan användas i olika tillämpningar för Försvarsmakten. Rapporten föreslår ett antal områden som bör studeras vidare, samt lyfter fram de modeller och underlag som bedöms som viktiga för att kunna stötta Försvarsmakten i dess kommande omsättning av markplattformar.

Rörlighet är en viktig egenskap för Försvarsmaktens förband. Detta studeras från flera perspektiv inom ett antal olika projekt vid FOI. Inom FoT-området finns projektet *Operativ värdering av markstrid*, där värdering av förband studeras med exempelvis krigsspel och genom modellutveckling på högre taktisk nivå. Inom angränsande FoT-områdena *Vapen & skydd*, *Ledning & MSI* samt temaområdet *Autonomi och obemannade system* med flera finns beröringspunkter med verksamheten som beskrivs i denna rapport.

1.1 Bakgrund

FoT-Marksystem ska arbeta systemövergripande och ta vara på detaljkunskap och fenomenforskning som pågår i andra FoT-områden för att aggregera kunskap och systemnivå. Förståelse och metodutveckling för systemintegration är beroende av denna aggregering. Figur 1 illustrerar ett stridsfordonssystem uppdelat schematiskt i dess grundläggande förmågor. Forskning genomförs vad gäller verkan och skydd samt underrättelse och ledning i de respektive FoT-områdena *Vapen och skydd*, *Sensorer och signaturanpassning* samt *Ledning och MSI*. Rörlighet har hittills inte varit tydligt omhändertaget av något FoT-område.

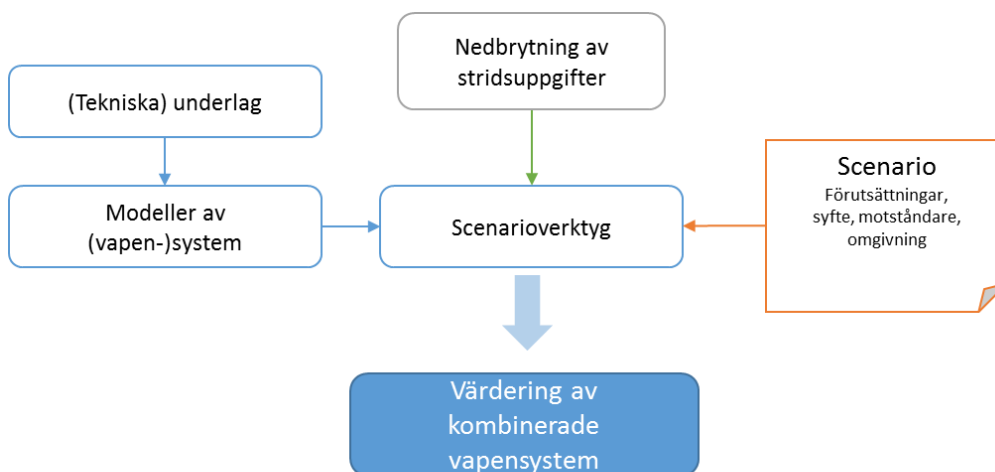


Figur 1. Ett stridsfordonssystem uppdelat i ett urval av dess grundläggande förmågor.

Projektet *Värdering av kombinerade vapensystem* (FoT *Vapen och skydd*) har sedan tidigare bedrivit forskning om metoder och verktyg för att värdera hur vapensystem bidrar till markstridsförbands stridseffekt¹ framför allt på stridsteknisk nivå. Värderingen av

¹ Med stridseffekt menas här hur väl förbandet löser sina stridsuppgifter.

markplattformar, framförallt stridsfordon, fokuserades på vapen och skydd. Inom det projektet har man utvecklat en värderingsmetod som illustreras i Figur 2. Här värderas ett eller flera system i en modellerad omgivning. De värderade systemen består av prestandamodeller för vapensystem som utvecklas från tekniska underlag. Systemen värderas baserat på hur väl de löser en given stridsuppgift, i en specifik situation.



Figur 2. Värdering av vapensystemets stridseffekt, för en given stridsuppgift vars syfte ges i ett scenario. Resultatet blir systemets bidrag till stridseffekt som är beroende av de ingående modellerna men även av syftet med stridsuppgiften, stridssätt och taktiska metoder.

Forskning på rörlighet av markfordon inom FOI har varit nedprioriterat under flera årtionden. Tekniska underlag för moderna stridsfordon, modeller för rörlighet i varierade detaljeringsnivåer samt metoder för att värdera rörlighet är pusselbitar som saknas för att kunna göra en komplett värdering av stridfordonssystemet enligt Figur 2.

Ett av projektets mål de kommande åren är att höja kunskapsnivån vad gäller modellering av rörlighet samt att analysera på vilken detaljeringsnivå rörlighet behöver modelleras. Vidare bör stridseffekten, beroende på fordons prestanda, kunna värderas och förmågor som bidrar till stridsfordonets övergripande förmåga att lösa sin uppgift i en given situation identifieras.

Verksamheten inom detta delområde är intimt sammankopplad med forskning kring framkomlighet. Metoder för att värdera rörlighet för ett enskilt fordon, exempelvis stridsställningsbyte, acceleration, svängprestanda samt förmågan till hindertagning, gravtagning, stig- och sidolutningsförmåga och vadning bör utvecklas med hjälp av framkomlighetsmodeller och värderingsmetoder.

1.2 Syfte

Denna rapport syftar till att beskriva statusen inom forskningsområdet, presentera en värderingsmetodik, identifiera forskningsfrågor och värderingsbehov rörande rörlighet samt att föreslå framtida arbete.

1.3 Definition av rörlighet

För att tydliggöra vad som avses med begreppet rörlighet listas här de definitioner av rörlighet och framkomlighet som återfinns i [1]:

- *Strategisk rörlighet* är rörlighet till ett insatsområde och då i första hand **förflyttning av resurser** för genomförande av eller underhållande av insatsen. Sker genom egen förflyttning eller med hjälp av strategiska transportresurser.
- *Operativ rörlighet* är rörlighet inom ett insatsområde och då i syfte att **samordna tillgängliga resurser** inom insatsområdet. Sker genom egen förflyttning eller med hjälp av transportresurser.
- *Taktisk rörlighet* syftar till att **samordna system** för verkan och andra funktioner på stridsfältet **så att ställda mål kan uppnås**. Inom markarenan kan taktisk rörlighet ses som vilka egenskaper en farkost har avseende manöverförmåga och framkomlighet.
- *Stridsteknisk rörlighet* beskriver en enskilds farkosts rörlighet och då **i syfte att nå en position** från vilken farkosten kan avge verkan alternativt rörlighet i syfte att undgå motståndarens bekämpning. I princip samma egenskaper som manöverförmåga.
- *Framkomlighet* påverkar hur stor del av ett **område** som farkosten kan nyttja.
- *Manöverförmåga* påverkar farkostens förmåga till **riktningsförändringar, hastighet och acceleration**.

Vid värdering av ett stridsfordons rörlighet kan ibland begreppen ha ett betydande överlapp. Överlag kan man dock säga att denna rapport uppehåller sig framförallt inom stridsteknisk rörlighet, med undernivåerna framkomlighet och manöverförmåga.

1.4 Läsanvisningar

De fyra huvudkapitlen som följer introduktionen i denna rapport har skrivits med något olika syften:

- I kapitel 2 sammanfattas den litteraturstudie som genomförts. Här finner läsaren en överblick över den forskning som genomförts av FOI och FOA inom området, samt även information från ett urval av andra relaterade rapporter och publikationer. Man kan säga att detta kapitel ger läsaren en bild av hur FOI ligger till jämfört med omvärlden, och detta kapitel passar läsare som vill bilda sig en uppfattning av forskningshistoriken.
- I kapitel 3 beskrivs en forskningsmetodik som adresserar det kunskapsgap som identifierats i kapitel 2. Detta kapitel är lämpligt för läsare som är intresserade av särskiljningen av olika nivåer av simulering av ett stridsfordons rörlighet, från delsystem och prestanda till förbandssimuleringar och stridseffekt.
- I kapitel 4 beskrivs pågående arbete och passar läsare som vill få en lägesbild av nuläget samt se exempel på hur metodiken omsätts rent praktiskt.
- I kapitel 5 sammanfattas slutsatser och rekommendationer för framtida arbete utifrån projektets resultat.

2 Rörlighetsforskning i Sverige och omvärlden

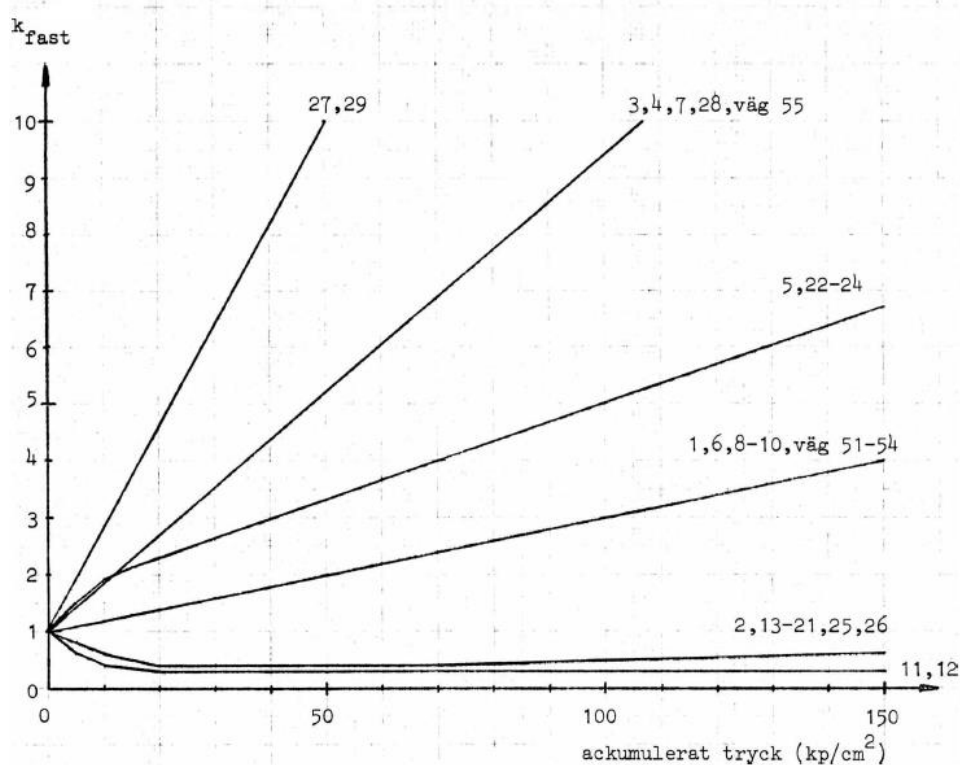
Då forskning kring rörligheten hos stridsfordon inte har bedrivits en längre tid av FOI är en lämplig inledning på förstudien en historisk återblick via litteraturstudien som genomförts. En del annat forskningsarbete presenteras, framförallt de samarbeten som projektet deltar i. Avslutningsvis redovisas kort ett exempel på vad forskningen kan tänkas inriktas mot framöver.

2.1 Litteraturstudie med fokus på tidigare forskning inom FOA och FOI

Denna litteraturstudie som syftar till att sammanfatta nuvarande kunskapsläge har genomförts med fokus på FOA- och FOI-rapporter, men även inkluderat läroböcker inom militärteknik samt vissa utländska artiklar. Noteras bör att detta endast är ett litet urval av rapporter inom detta område, men att de i stort bör ge en god bild av historiken. Nedan beskrivs innehållet i rapporterna och några av dessas slutsatser. För bättre översikt redovisas de i kronologisk ordning.

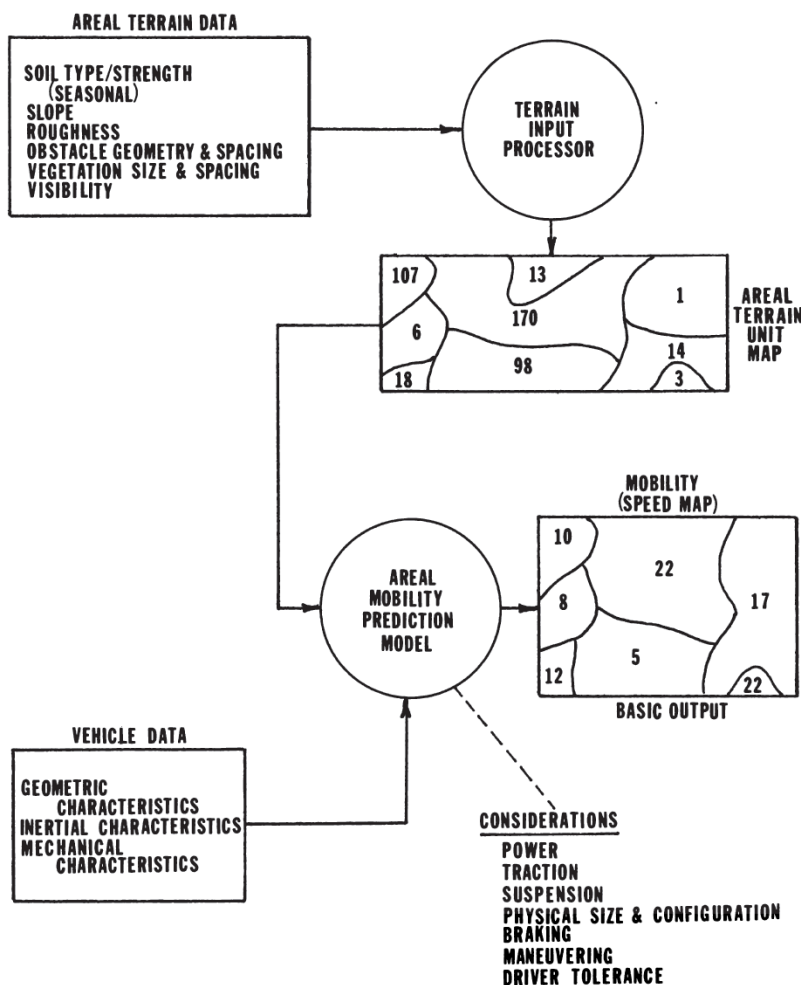
2.1.1 Fram till och med 1970-talet

Flertalet av de rapporter som skrivs under 60- och 70-talet analyserar förbands rörlighet utifrån ett strategiskt eller operativt perspektiv, dvs rörlighet *till ett insatsområde* eller rörlighet *inom ett insatsområde i syfte att samordna tillgängliga resurser*. Det finns här exempel på skydd genom rörlighet [2] [3] och hur man kan simulera kolonnkörning på väg eller i terräng med olika frekvenser av fastkörning [4] [5] [6] [7]. Även om möjligheterna för mer omfattande beräkningar är större idag, så kan man basera enklare studier på den erfarenhet och empiri som finns i de sistnämnda rapporterna. Ett exempel på typ av erfarenhetsbaserad information som återfinns i dessa rapporter ses i Figur 3 nedan.



Figur 3. Effekten av flertalet passager över en viss given terräng, här presenterat med faktor för fastkörningsfrekvens som funktion av ackumulerat hjul- bandmarktryck. Återges i faksimil från [7]. Det ackumulerade hjul- och bandmarktrycket är den sammanlagda summan av marktrycket från alla de fordon som genomfört passagen. Siffrorna i anslutning till kurvorna refererar till olika terrängklassificeringar och vägar.

Utöver Natos mobilitetsmodell, NATO Reference Mobility Model NRMM, som berörs separat i avsnitt 2.2, så finns en rapport [8] från dåtidens DARCOM (numera Army Material Command, AMC, vilket kan ses som motsvarigheten till svenska FMV), som går in på enklare terra-mekanik, exempel på användande av geodata samt rörlighet som skydd. AMC mobility model, som är förlagan till NRMM, beskrivs även kortfattat i rapporten, se Figur 4.



Figur 4. Uppbyggnad av AMC Mobility Model, där ingående terrängdata och fordonsdata via modellen genererar en mobilitetskarta där fordonets maxhastighet i olika partier kan utläsas. Faksimil från [8].

2.1.2 1980-talet

En genomgående historisk återblick på pansarstrid, inklusive en del djupare tekniska detaljer som även är gällande i dagens, dvs tredje generationens, stridsvagnar återfinns i [9]. Rapporten redogör för olika typer av resonemang kring bl.a. effekterna av ökat skydd versus ökad verkan och hur detta återspeglas i stridsförloppen, där utvecklingen av pansar leder till ökad rörlighet men också motsatt effekt när tekniksprång inom vapenverkan tillfälligt minskar rörligheten. Växelverkan mellan utvecklingen av nya vapentyper och nya skydd berörs på motsvarande sätt. Vidare ger rapporten ett antal värdefulla tumregler, bl.a. lämpliga förhållanden mellan bandlängd och spårvidd, maximala g-krafter kontra besättningens ergonomi, gradering av bandfordons framkomlighet utifrån olika typer av hinder, effektbehov som funktion av fordonsvikt etc.

Arbete med geodata exemplifieras i [10], där flygbildstolkning och rekognosering har använts för att kartlägga framkomliga stråk för band- och stridsvagnar i betäckt terräng. Rapporten fokuserar i första hand på metodologin i samband med tolkningen av flygbilderna, men då det även ingår en kostnadsuppskattning för vidare kartläggning så kan man anta att ett syfte med inventeringen kan vara att använda dessa framkomlighetskartor för operationell planering i samband med strid.

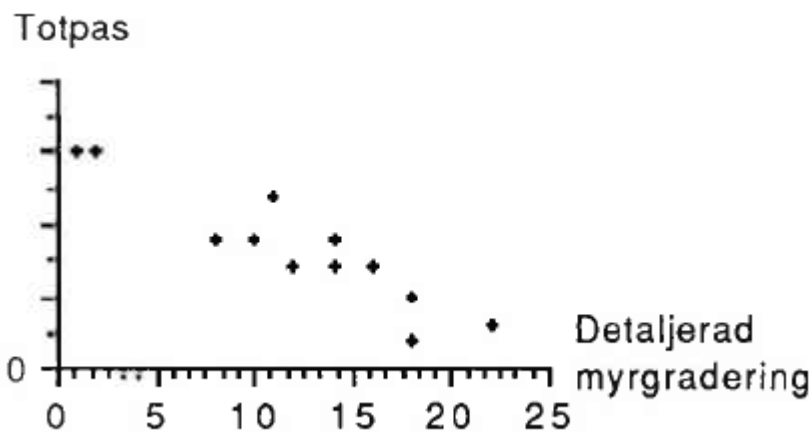
2.1.3 1990-talet

Detaljerad markmätning, fordonsprovning och modellering för att undersöka framkomlighet på myrar i Norrland, beskrivs i [11] och [12]. Provingen omfattade flertalet av dåtidens stridsfordon, såsom Strv103, IKV91, Bv206 m.fl. Även en prototyp för Stridsfordon 90 provades, och det kan i sammanhanget vara intressant att nämna att delar av beskriven mätmetodik (specifikt användningen av bevameter² för att undersöka markens fysikaliska egenskaper) i rapporten användes under framtagningen av Stridsfordon 90 [13]. Utöver bevameterundersökningar genomfördes markmätningar med konpenetrometer och vingborr samt även torvdjupsmätningar med radar. Det visade sig att det fanns vissa svårigheter i själva genomförandet av markmätningarna och att resultaten från dessa heller inte korrelerade bra mot de framkomlighetsprov som genomfördes med fordon. Istället fann man att det s.k. *Mean Maximum Pressure* [14], MMP, som är ett medelvärde av bandtrycket, samt myrtyp (framförallt typ av vegetation) hade bäst överensstämmelse med provresultaten avseende framkomlighet och markens bärighet för flera passager. Se Formel 1, där W är fordonets tyngd i kN, m är antalet bärhjul hos fordonet, c är den kontaktytan³ av en länk i proportion till länkens totala⁴ projicerade yta [%], b är bandbredden [m], p_d är totala längden på en bandplatta [m] och d är bärhjulens diameter [m].

Formel 1. Medelvärde av bandtrycket på mark, även kallat MMP

$$MMP = \frac{1.26W}{2mcb\sqrt{p_d d}}$$

I Figur 5 visas resultaten från flera passager över olika myrtyper.



Figur 5. Totalt antal möjliga passager som funktion av myrgradering (myrtyp). Faksimil från [11].

Utifrån dessa samband beskriver rapporten en sammanvägd framkomlighetsmodell som anger ett intervall som med en uppgiven sannolikhet på 80% svarar på frågan hur många passager ett visst fordon kan klara över ett givet terrängavsnitt. Modellen simulerar framkomlighet på öppna myrar och kan användas för olika stridsfordon.

² En bevameter är ett mätverktyg för att mäta jordens mekaniska egenskaper såsom markens bärighet samt skjuvstabilitet.

³ Med kontaktyta avses den del av länken som är i kontakt med marken.

⁴ Med länkens totala yta avses länkens längd (mellan bandbultar, dvs. P_d) multiplicerat med bandbredden b .

Taktisk rörlighet, dvs *rörlighet inom stridsområdet*, modelleras i [15] där man återanvänder empiriska samband från [7] avseende fastkörning kombinerat med en mer omfattande terrängklassificering och något mer detaljerade fordonssdata. Modellen innefattar inte strid, och kan ses som en vidareutveckling av de modeller som fokuserade på kolonnkörning som togs fram under 60- och 70-talen, dock med en högre upplösning kring just terrängen och fordonens beskaffenhet.

För operativ rörlighet, dvs rörlighet inom ett insatsområde, utvecklades en modell [16] [17] som utöver modelleringen av själva transporten även inkluderar olika typer av störningar såsom flyganfall, C-anfall etc. Fordonens hastighet är indata till modellen, vilket innebär att framkomlighet på vägar eller i terräng endast kan beaktas via detta indata. Exempel på resultat från denna modell ses i Figur 6.

Antalet marscherade km för förbandet är:		528			
Antalet utslagna fordon/grupp är:		0	0	0	0
Drivm.förbr./fordonsgrupp är:		0	6600	3696	1848 liter
Förslitningsskador		:	0	0.53	0.18 0.05 st
1.lvrbbat Startar Dygn 1 kl 1200					
3	1	:1200	4	1	:1201
5	1	:1618	150	1	:1758
6	1	:1958	7	1	:2200
8	1	:2248	9	1	:2345
151	2	:0033	10	2	:1233
Förbandets tät är i mål: Dygn 2 kl 1424					

Figur 6. Exempel på utdata från operativ rörlighetsmodell (ORM), där bl.a. drivmedelsförbrukningen och total marschtid ges. Faksimil från [16].

Rörlighet under vinterförhållanden, specifikt snödjupets påverkan, tjäldjup i myrar och liknande frågeställningar berörs i [18]. I rapporten föreslås en modul för att hantera vinterförhållanden, exempelvis implementerad i OPERAMA (en avdömningsmodell utvecklad av FOA för markstrid på högre taktisk nivå). Indata anges i form av snödjup, istjocklek, m.m., antingen direkt eller genom angivande av tidpunkt på året samt plats. Modellen väljer sedan automatiskt en rörlighetsmatris som tilldelar olika fordonstyper olika värden på framkomligheten, beroende på hur rörliga de är i det aktuella snödjupet. Modellen baseras i stor utsträckning på empiri, med flertalet tumregler kring framkomlighet vintertid som funktion av marktryck, markfrigång, snökonsistens m.m. Ett exempel på detta ses i Figur 7.

	Snödjup		
Tjäldjup	< 60 cm	60-100 cm	100-130 cm
normaljord: < 35 cm (-)	D	M	D
normaljord: > 35 cm (+)	G	M	D
myrmark: < 40 cm (-)	D	M	D
myrmark: > 40 cm (+)	G	M	D

(G = God framkomlighet, M = Måttlig framkomlighet, D = Dålig framkomlighet,
+ = positiv effekt på framkomligheten, - = negativ effekt)

Figur 7. Framkomlighetsbedömning för stridsvagnar utifrån snödjup, tjäldjup och marktyp. Faksimil från [18].

Man kan säga att en vintermodul enligt den som beskrivs i rapporten ger korrektionsfaktorer för rörlighet under vinterförhållanden, dvs *relativt* den rörlighet fordonen och förbanden har under normala sommarförhållanden.

2.1.4 2000-nutid

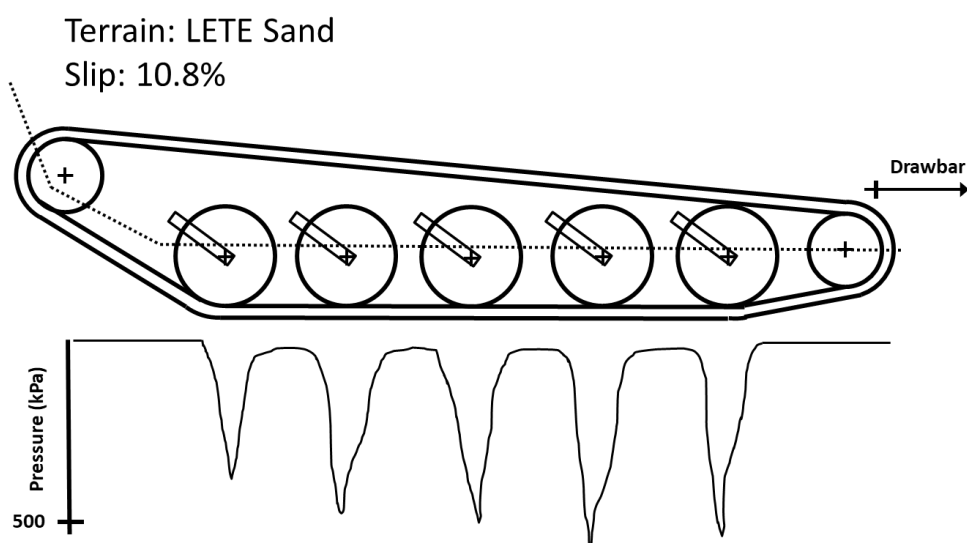
En marschmodell där doktriner för förbandets uppträdande under förflyttning ingår beskrivs i [19]. Simuleringen är genomförd i scenarioverktyget FLAMES [20] och består av ett antal undermodeller:

- En kognitiv modell som fattar beslut om de framryckande enheternas vägval, kringgång runt fiendestyrkor och liknande baserat på uppsatta regler/doktriner
- En utrustningsmodell som beskriver hastighet, avståndshållning till framförvarande fordon och liknande
- En sensormodell som upptäcker hinder, fiender, utslagna enheter etc.
- En radiomodell där kommunikationen mellan enheter simuleras

Förbandets rörlighet kan sedan utvärderas beroende på vilka händelser som läggs in i scenariot, t.ex. hinder, fiendeangrepp eller förlorat befäl. Ingen hänsyn till terräng tas, stridsförloppet simuleras inte och ej heller fordonens dynamik ingår i modelleringen.

Försvårshögskolan har översiktligt beskrivit rörlighet och dess inverkan på strid i en lärobok i militärteknik [1]. Boken sammanfattar ett antal praktiska tumregler och empiriska samband samt använder sig av ett terrängtypschema utifrån grundförhållande, ytstruktur och lutning, GYL [21], där bärighetsklasser, jordartsklasser, ytstrukturklass, hindertäthet och lutningsklass ingår. Denna klassning kompletteras även med stamtäthet. Vidare innefattar boken även beräkningar för erforderlig effekt hos terränggående fordon, riktlinjer för maximalt marktryck beroende på markförhållanden, hur framryckning över ojämn mark påverkar eldröret m.m.

För det inom rörlighet relevanta delområdet terramekanik, dvs markens egenskaper i interaktionen med hjul eller bandaggregat, finns det en väl etablerad modell som sammanfattas i [22]. Med utgångspunkt från mätningar av markens egenskaper samt fordonets geometri så kan modellen estimerar det varierande marktrycket, markskjuvningen och nedsjunkningen. Själva mätningarna är desamma som genomfördes i [11], men modelleringen som beskrivs i denna artikel är mer uttömmande. Se exempel i Figur 8.



Figur 8. Principbild av modellering av det varierande marktrycket i ett bandaggregat. Ritat av författaren.

Detta sätt att modellera terramekanik har fått ett stort genomslag i bl.a. Natos mobilitetsmodell [23] och är en väl etablerad metod.

Senare arbete inom modellering av rörlighet på FOI återfinns i [24] samt av FOI handledda examensarbeten [25], [26] och [27], där fokus i stor utsträckning har legat på modellframtagning inom fordonsdynamik, däribland hjulupphängning, styrning och reglering av torn m.m. Dessa modeller avviker till viss del från tidigare modeller utvecklade av FOI i det avseendet att de simulerar *delsystem* i stridsfordonet, dvs innefattar egenskaper hos enskilda ingående komponenter.

Sammanfattningsvis kan man säga att utvecklingen av modelleringen av rörlighet inom FOI har gått från att ha en hög aggregeringsnivå, där man i stor utsträckning modellerat rörlighet på förbandsnivå, till mer detaljerade simuleringar av fordonens ingående delsystem.

2.1.5 Närliggande forskning på FOI kopplat till rörlighet

Inom FOI-projektet *Gemensamma teknikbehov inom autonomi/obemannade system*, GT-OAS, genomfördes en studie kring tekniker för obemannade farkoster vilka beskrivs mer ingående i projektets slutrapport från 2020 [28]. I rapporten belyses de svårigheter obemannade markfordon har kopplat till detektering av terräng, värdering av terräng och väjning vid hinder. Svårigheterna resulterar i en hastighetssänkning som är en klart begränsande faktor för användandet av denna typer av fordon i mekaniserade förband.

Möjligheten att använda autonoma fordon för bl.a. evakuering av skadade beskrivs i [29]. I sådana användarfall kommer det autonoma systemets förmåga att bedöma terräng, dels i termer av ren framkomlighet, dels med avseende på de krav på medicinskt tillräddliga vibrations- och accelerationsnivåer som blir en konsekvens av terrängkörningen.

2.2 NATO Reference Mobility Model

Under andra halvan av 1970-talet vidareutvecklade Nato sin modell AMC-74 [8] till vad som kom att kallas NATO Reference Mobility Model, NRMM [30]. Denna omfattande modell kombinerar förenklad fordonsgeometri, geometri hos hinder, klassificering av markförhållanden och empiriska erfarenheter för att kunna representera terrängen likt en mosaik av olika mindre områden där framkomligheten kan beräknas. Se Tabell 1 **Error! Reference source not found.** för en översikt av ingående data till modellen.

Tabell 1. Översikt av ingående data för beräkning av mobilitet i NRMM, uppdelat i terräng-, fordons- och förarpåverkan.

Terrain	Vehicle	Driver
Surface Composition Type Strength	Geometric characteristics	Reaction Times Recognition Distance
Surface Geometry Slope Altitude Discrete Obstacles Roughness Road Curvature Road Width Road Superelevation	Inertial characteristics Mechanical characteristics	Acceleration and impact tolerances Minimum acceptable speeds
Vegetation Stem size Stem spacing		
Linear Geometry Stream cross section Water velocity Water depth		

I modellen begränsas hastigheten framförallt av 6 faktorer:

1. Hjulen eller bandets fäste för att övervinna markfriktion, uppförsbackar, hinder och vegetation.
2. Besättningens ergonomi.
3. Förarens motvilja att köra snabbare än vad sikten medger.
4. Manövrering för att undvika hinder (kringgång).
5. Acceleration och retardation mellan hinder som körs över.
6. Skada på hjul eller band.

Modellen är uppdelad i ett relativt stort antal subrutiner, ca 50 stycken, som exekveras i följd. Nedan följer en översikt över hur modellen körs:

1. Fordonsdata sammanställs utifrån mätdata eller uppskattningar och formateras enligt de indatafiler som programmet accepterar.
2. Terrängdata sammanställs.
3. Hinder och markförhållanden som finns i terrängdatat pre-processas.
4. Utifrån fordonsdata, och till viss del terrängdata, beräknas fordonsdynamiken där resultat i termer av maxhastighet som funktion av olika ergonomiska krav, maximal hinderhöjd som funktion av hastighet, maximal acceleration m.m. genereras.
5. En extra hindermodul körs för att ge mer detaljerade svar på markfrigång, max fäste m.m.
6. Resultaten från de föregående beräkningarna aggregeras i huvudprogrammet NRMM där scenarion (dvs rutter genom terränger) körs och ger detaljerade svar på bl.a. de hastigheter som fordonet kan hålla genom "mosaikerna" av de hinder- och terrängförhållanden som ruten innebär.

Själva uppbyggnaden av scenarion, dvs på vilka sätt ett tänkt fordon ska köras genom denna mosaik, lämnas åt användaren.

NRMM uppdaterades löpande under en längre tid, där man även tog fram en mer omfattande reviderad version, NRMM II, men mot slutet av 2010-talet såg man ett behov av att på ett vidare sätt kunna extrapolera uppmätta fordonsprestanda i kombination med

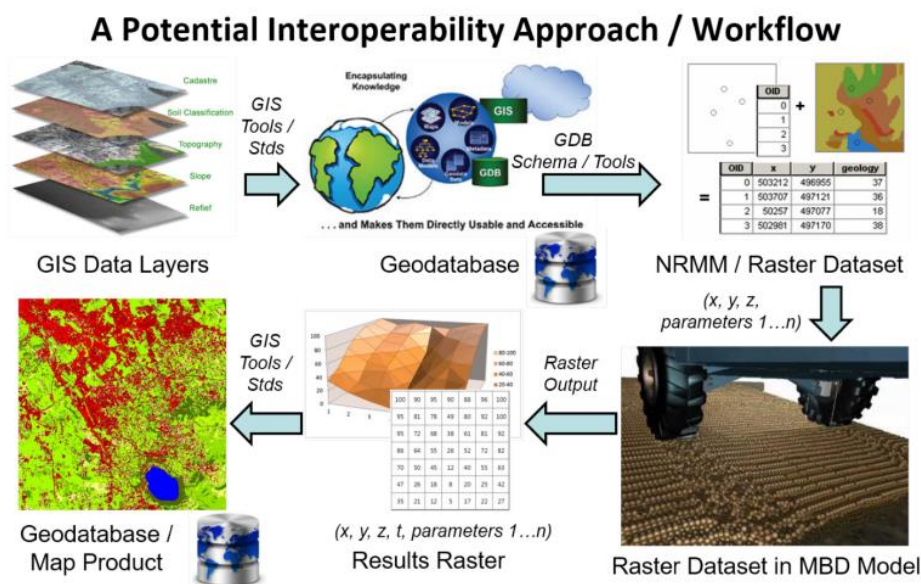
mycket mer detaljerade terräng- och markförhållanden och därmed frångå den starkt empiriskt baserade NRMM med en mer simuleringstung, prediktiv modell. Denna modell benämns Next Generation NRMM, NG-NRMM.

NG-NRMM beskriver de ingående delar som behövs för att beräkna framkomligheten, men till skillnad från den äldre NRMM så är det inte en komplett programkod. Man ska alltså se NG-NRMM som en metodbeskrivning.

NG-NRMM har flera distinkta delar:

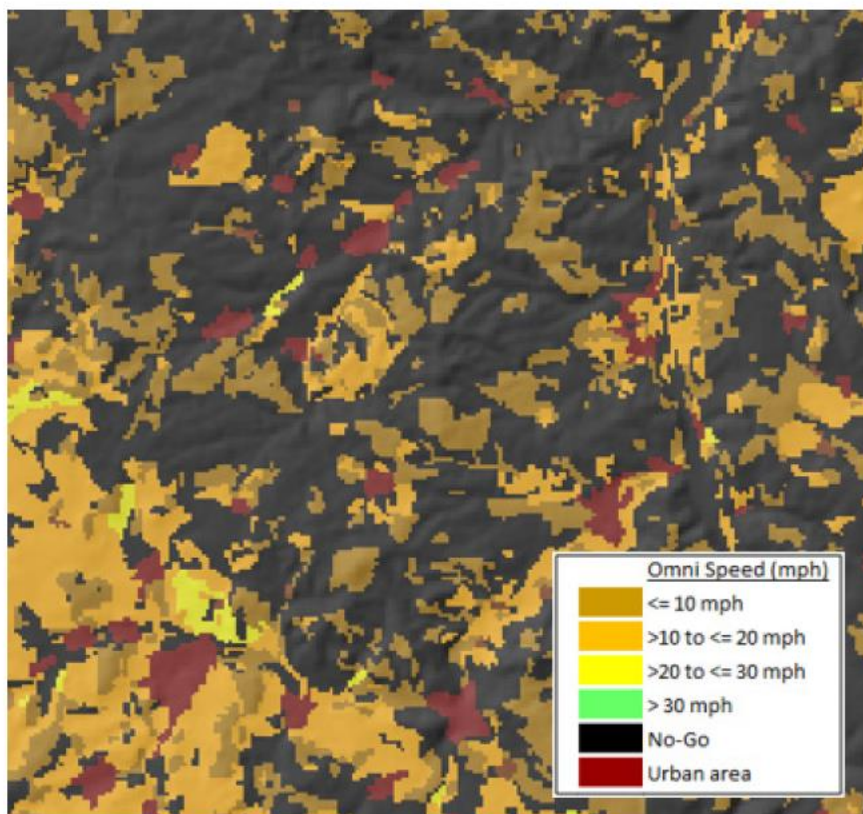
- Hantering av terräng genom omfattande geodata, där jordens fysikalitet mäts upp med hjälp av en s.k. bevameter (samma mätmetod som omnämns i [11] och [13]).
- Förenklad terramekanik, där i princip den modell som omnämns i [22] är tänkt att användas. Man kan förenklat säga att detta är en tidsupplöst 2D-modell.
- Avancerad terramekanik, vilket innebär en tidsupplöst 3D-modell.
- Hantering av autonoma fordon, osäkerhetsanalyser, m.m.

Metodiken beskrivs översiktligt i Figur 9.



Figur 9. Metodiken, och även dataflödet, i NG-NRMM. Kartografiska data kompletteras med fordonssimuleringar som utmynnar i framkomlighetskarter. Faksimil från [23].

Översiktligt kan man beskriva metoden så här: Utifrån geodata som består av ett antal lager (höjdprofil, uppmätta markförhållanden etc.) genomförs fordonssimuleringar som sedan genererar framkomlighetskarter. Dessa karter blir ytterligare ett lager geodata. Se exempel i Figur 10.



Figur 10. "Speed-made-good" beräknat utifrån NG-NRMM visualiserat över en karta. *Omni Speed* avser medelhastighet över terrängen oavsett färdriktning. Faksimil från [23].

Dessa kartor kan sedan användas för utvärdering av fordonets framkomlighet eller mer direkt i planering av operationer.

Arbetet med NG-NRMM fortsatte i AVT-327 och AVT-308 samt gav också en ingång till AVT-341 (se avsnitt 2.3.1, 2.3.2 samt 2.3.3).

2.3 Aktiviteter i NATO Science & Technology Organisation

Natos "Science and Technology Organisation" forskningsverksamhet består av sju områdespaneler där panelen "Applied Vehicle Technology" (AVT) är mest relevant för detta projekt. Detta då panelen är särskilt inriktat mot området tillämpad farkostteknik. NATO-AVT är organiserad i tre tekniska kommittéer:

- Mechanical Systems, Structures and Materials (MSM).
- Performance, Stability & Control, Fluid Physics (PSF).
- Propulsion and Power Systems (PPS).

Projekt rörande markstridsplattformar organiseras typiskt under MSM. Flera pågående projekt bedöms som relevanta för deltagande från detta projekt. Dessa projekt beskrivs kortfattat nedan.

2.3.1 AVT-327 – Standardization Recommendation (STANREC) Development for Next-Generation NATO Reference Mobility Model (NG-NRMM)

AVT-327 är ett treårigt projekt med syfte att utveckla en rekommendation för standardisering inom NATO, dvs. en *NATO standardization recommendation*

(STANREC), kring modellering och värdering av framkomlighet hos militära fordon. Särskilt inriktas samarbetet mot modellering och validering av framkomlighet för terrängkörning och snöförhållanden. Målet med verksamheten är att uppdatera den befintliga framkomlighetsmodellen NRMM som togs fram på 1970-talet.

De deltagande länderna bidrar med såväl fältförsök som avancerade beräkningsmodeller för fordonsmekanik, terramekanik och GIS-metoder för värdering av framkomlighet. Gruppen lägger stor vikt vid att standardisera metodiken för framkomlighetsvärdering hos militära fordon och framförallt USA ser det som en möjlighet att kunna kravställa och utvärdera fordon vid framtida anskaffningar. Dessutom framhålls interoperabilitet, utifrån grundidén att om flera länder ställer samma krav på fordonens framkomlighet förbättras möjligheterna till gemensamma militära övningar och insatser.

2.3.2 AVT-341 – Mobility Assessment Methods and Tools for Autonomous Military Ground Systems

Detta projekt har som avsikt att ta fram metoder för värdering av framkomlighet för autonoma fordon genom simuleringsverktyg och försök. Ett femtiotal deltagare från femton länder, främst från USA, deltar i studien och arbete utförs av många olika delgrupper och deltagare. FOI är med i projektledningen tillsammans med DEVCOM-GVSC⁵ i USA och University of Cranfield i Storbritannien.

Arbetet delas upp i tre faser. Den första fasen är en demonstration där företag som gör simuleringsverktyg för framkomlighetssimulering av autonoma system kommer att få visa sina färdigheter. Projektet kommer att förse demonstrationsdeltagarna med scenarier och miljödata och det blir sedan deltagarnas uppgift att visa hur väl deras simuleringsverktyg klarar av att simulera framkomligheten av ett autonomt markfordon i ett militärrelevant scenario. Utvärdering av resultaten ska mynna ut i metoder för värdering av framkomligheten av ett autonomt markfordon.

Efter den ovan nämnda demonstrationen planeras två separata fysiska demonstrationer, fas två respektive fas tre av projektet i vilka det kommer att genomföras framkomlighetsförsök för att samla data för validering. De simulerade fordonen i fas ett ska även användas för försök i fas två och tre. Fas ett kommer att genomföras under 2021, med fas två och tre under 2022 och 2023. Målet med projektet är att resultat och metoder för värdering av framkomlighet ska kunna utvecklas till en standard i nästkommande projekt. Så var fallet med resultaten från NG-NRMM-projekten där en rekommendation för en standard, en STANREC, för värdering av framkomlighet nu skrivs. DEVCOM-GVSC är mycket drivande i frågan och poängterar vikten av att Europa deltar. Vid ett eventuellt minskat intresse från Europa kommer USA att driva detta arbete nationellt och inte inom Natos ramverk.

2.3.3 AVT-CDT-308 – Cooperative Demonstration of Technology for Next-Generation NATO Reference Mobility Model (NG-NRMM)

AVT-CDT⁶-308 är ett demonstrationsprojekt, som kommer att arrangera en demonstration av hur man i Europa använder framkomlighetsmodellen NG-NRMM. En tidigare sådan demonstration hölls år 2018 vid Keweenaw Research Center, USA. Nu vill de deltagande nationerna sprida information samt visa nyttan av att tillämpa NG-NRMM i Europa, då användningen av modellen just nu begränsas till ett fåtal länder (USA, Storbritannien, Kanada och Rumänien). Under demonstrationen planeras fordonsdemonstration av olika terräng- och framkomlighetsutmaningar samt demonstrationer av framkomlighets- och rörlighetsmodellering.

⁵ Combat Capabilities Development Command - Ground Vehicles System Center (DEVCOM-GVSC)

⁶ Cooperative Demonstration of Technology

Projektet leds av Tyskland tillsammans med Danmark och USA. Demonstrationen kommer att ske maj 2022 vid tyska Technical Center for Land-based Vehicle Systems, Engineering and General Field Equipment, i Trier, nära Berlin. CDT:n kommer att rikta sig till militära intressenter samt inköpare av försvarsmateriel.

2.4 Aktiviteter i European Defence Agency

Sedan millennieskiftet har det genomförts ett antal studier kring elektrifiering av drivlinor i stridsfordon inom ramen för Western European Armaments Group, WEAG, men dessa aktiviteter överfördes sedermera till European Defence Agency, EDA. Huvudsyftena i den senaste studien HybriDT I har varit att ta fram en generisk systemarkitektur, identifiera teknologigap av betydelse för elektrifiering av militära landfordon, ta fram en klassificeringsmatris för olika typer av militära fordon, samt lägga grunden för utveckling av en fullskalig demonstrator i kommande delprojekt. Inom forsknings- och teknikområdet för marksystem bär denna forskning framförallt mot området systemintegration även om prestandan i drivlinan har en stor inverkan på både framkomlighet och rörlighet. Utvecklingen av hybriddrivlinor för stridsfordon bör således följas noga, även ur ett rörlighetsperspektiv.

2.5 Alternativa framdrivningskoncept

Tidigare beskrivna modeller och metoder kretsar i stor omfattning runt terrängens inverkan på framkomlighet, sannolikt präglad av att stridsfordonen har sett snarlika ut de senaste 100 åren. Dock kan det vara intressant att i detta sammanhang beröra alternativa framdrivningskoncept, i detta fall exemplifierat av det arbete som genomförs av Defense Science and Technology Laboratory, DSTL, tillsammans med QinetiQ i Storbritannien. De har genomfört ett antal studier på fordon med elektriska navmotorer, där själva hjulupphängningen har förenklats och gjorts mer flexibel än vad som normalt sett är möjligt när hänsyn måste tas till konventionella drivaxlar. Förutom den uppenbara vinsten i ökad markfrigång så uppges denna typ av hjulupphängning kombinerat med en aktiv dämpning, potentiellt även artikulerat, uppnå en signifikant ökad framkomlighet över hinder. För att realisera detta så förutsätts en helt elektrisk, alternativt hybridiserad, drivlina. Ett exempel på fordon med navmotorer och hybrid-elektrisk drivlina ses i Figur 11.



Figur 11. Hybridelektriskt fordon med navmonterade elmotorer [31].

Sammanfattningsvis pågår det idag arbete på olika elektrifierade och hybridiserade drivlinor bland flertalet stridsfordonstillverkare och det finns anledning att förvänta sig att de egenskaper som påverkas, däribland kanske framförallt accelerationsprestanda och aktiva hjulupphängningar, sannolikt kommer ha ett stort genomslag på stridsfordonens rörlighet framöver.

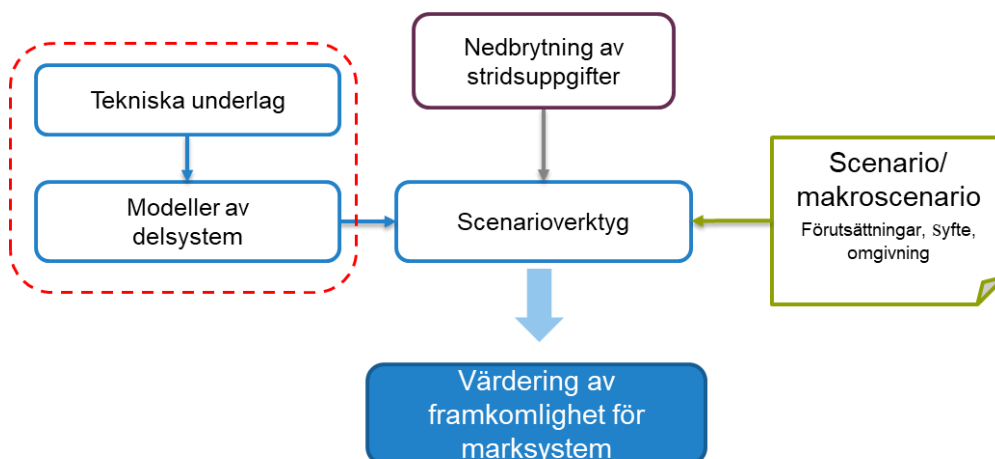
En konsekvens av utvecklingen av elektrifierade drivlinor i det civila samhället är att energiförsörjningen till försvarets stridsfordon också påverkas, framförallt när det gäller tillgången på dieselformiga bränslen. Vidare leder övergången till fossilfria bränslen även till ett antal utmaningar kring lagringsbeständighet för vilket det för Försvarmakten i dagsläget inte finns någon tydlig lösning [32]. Av denna anledning kan elektrifierade och

hybridiserade stridsfordon vara av särskilt intresse, vilket dock innebär en annan problematik kring energiförsörjning. Denna problematik är i första hand kopplad till distribution och elfordons uthållighet vilket Försvarmakten för tillfället inte heller ser som lösbara idag [32]. Således finns det ett antal centrala utmaningar rent energiförsörjningsmässigt vilka bör beaktas i samband med framtida kravställningar avseende rörlighet hos förband.

3 Metodik för värdering av rörlighet

Tidigare arbete på FOI inom rörlighet har i stor utsträckning avgränsats till operativ och strategisk rörlighet. Om framtida syften med rörlighetssimuleringar av markbundna vapensystem ska innefatta taktisk och stridsteknisk rörlighet, vilket inbegriper studier på fordonens framkomlighet och manöverförmåga, behövs detaljstudier på de ingående delsystemen. Med delsystem kan här avses hjulupphängning, hjulens placering, motorprestanda, dimensioner på bandplattor, aktiv däcktrycksjustering m.m. men även fordonets övriga system som påverkas under förflyttning, t.ex. reglering och stabilisering av eldrör och liknande.

Ett lämpligt tillvägagångssätt kan vara att utveckla detaljerade modeller för de delsystem som på ett relativt enkelt sätt kan diskretiseras. Resultat från dessa kan ge svar på direkta frågeställningar på detaljnivå som t.ex. hur träffsäkerhet påverkas av olika konfigurationer av bandaggregat eller hur accelerationsprestanda påverkar tagandet av en stridsställning. Framtagning och utvärdering av modeller på delsystems-nivå kan således användas vid specifika frågeställningar kring ett stridsfordons prestanda i ett starkt nedskalat delscenario. I dessa delscenarier utvärderas prestanda hos enskilda system, dvs. *Measures of Performance, MoP*, utifrån situationer som är lösryckta ur ett tänkt stridsförlopp. För en översikt av en sådan simuleringsmetodik, se Figur 12.

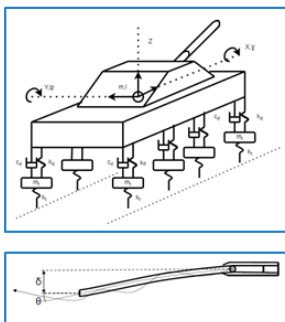


Figur 12. Anpassad metodik för värdering av framkomligheten hos ett fordon. Värderingsmetodiken är i princip identisk med den som beskrivs i Figur 2, men är mer specifik i det att delsystemsmodellering har en framträdande roll (inringat med rött) samt att det är förmågan till framkomlighet som utvärderas och inte (strids)effekten av framkomligheten. Ovanstående metodik kan däremot vid behov aggregeras för att kunna värdera stridseffekt och därmed tillämpas metodiken enligt Figur 2.

Resulterande framkomlighet, vars detaljnivå kan spänna mellan avancerade simuleringar av terramekanik till enklare empiriska tumregler kring bärighet, kan även användas för att framställa framkomlighetskartor snarlikt metodiken i NG-NRMM. Vid behov används sedan dessa framkomlighetskartor som underlag i nästa aggregeringsnivå som kan vara t.ex förbandsstrid.

Ett mer detaljerat sätt att beskriva denna metodik ges nedan, inledande med Figur 13.

Delsystemsmodeller



Exempel:

- Diskretisering av delsystem såsom hjulupphängning, torn etc.
- Simulering av "makro-scenarier" som tagande av eldställning, framryckning mellan skydd etc.

Fördelar:

- Ger djup kunskap om delsystemens påverkan på vapensystemet (t.ex. eldrörsböjning och liknande)

Nackdelar:

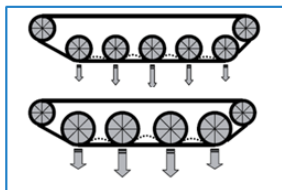
- Beräkningsintensivt om många delmodeller används samtidigt på många fordon
- Stort steg mellan modellresultat och effektivitet hos vapensystemet –ger i huvudsak svar kring manörförmåga och taktisk/stridsteknisk rörlighet
- Endast mindre förenklade scenarier

Figur 13. Delsystemsmodeller. Fördelen med modellering på denna nivå är att den ger tillgång till detaljkunskap om enskilda systems bidrag till den övergripande förmågan rörlighet. Nackdelar kan vara att det kan bli beräkningsintensivt samt att det kan vara svårt att direkt koppla till stridseffekten.

Ett alternativ till framkomlighetskartor kan vara att extrahera enskilda parametrar från delsystemssimuleringar. Ett exempel på detta kan vara tagandet av en stridsställning där delsystemmodellerna för drivlina, bandaggregat och markförhållanden sammanlagt kan ge svar på om stridsfordonet överhuvudtaget kan ta stridsställningen samt kvantifiera hur lång *tid* det tar. Beroende på hur man vill värdera framkomligheten kan den parameter som erhålls i prestandautvärderingen i det här fallet alltså vara *tiden* det tar att ta en stridsställning och i en aggregerad modell leder då parametern *tiden* (då stridsfordonet är exponerat innan möjlighet till egen verkan) till en förändrad stridseffekt. Möjligtvis kan man även tänka sig simuleringar som stödjer sig på både framkomlighetskartor och parametriserad modellering i vissa särskilda avsnitt eller situationer. Dessa två angreppssätt behöver inte stå i motsatsförhållande till varandra.

Om man fortsatt vill uppehålla sig kring värdering av rörlighet, fast i ett större perspektiv än de delscenarier som beskrivits, kan ett lämpligt mellansteg vara en samlad modell enligt Figur 14.

Samlad modell



$$SBT = \frac{1,26 \times m \times g}{2 \times n \times b \times e \sqrt{pd}}$$

Generella värden säger att ett bandtryck lägre än 0,24 kg/cm² ger hög framkomlighet på myrmark och ett bandtryck lägre än 0,40 kg/cm² ger översnöförmåga.

Exempel:

- Enklare beräkningar som kombinerat med tumregler utifrån empiri t.ex. överlagras på karta för att estimeras möjlig hastighet och go/no go –zoner

Fördelar:

- Kan relativt snabbt ge övergripande svar för att förhoppningsvis vidare kunna identifiera kritiska egenskaper hos delsystem
- Modellen kan fyllas med mera avancerade/förenklade delmodeller allt eftersom

Nackdelar:

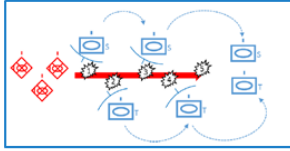
- Beroende av empiriskt data
- Osäkerheter i tumregler kan vara svåra att identifiera och/eller kvantifiera

Figur 14. Samlad rörlighetsmodell. Det kan handla om att via indata från flera delsystemmodeller, empiri, vedertagna s.k. tumregler eller via expertkunskap generera framkomlighetskartor. Fördelarna med fortsatt utvärdering av förmågan till rörlighet i denna nivå av modellering kan vara att bibehålla en stark koppling till delmodellernas fysikalitet och minska risken för att delsystemens prestanda "drunknar" i värderingar på högre stridsteknisk nivå.

Resultatet från samlade modeller, som t.ex. framkomlighetskartor, kan vara värdefulla i framtagandet av spelkort eller för att på ett mycket lättöverskådligt och intuitivt sätt beskriva vilken typ av stridstekniska för- eller nackdelar ett visst fordon har; vilka omfattningar kan man genomföra, hur snabbt en omgruppering kan ske och liknande.

För att kunna modellera och kvantifiera rörlighetens bidrag till stridseffekten så bör man genomföra simuleringar i form av dueller eller i strid på stridsteknisk eller taktisk nivå. Se Figur 15.

Förbandsmodell



Exempel:

- Implementation av framkomlighetskartor och/eller annan delsystemsprestanda i förbandsmodell

Fördelar:

- Kan eventuellt täcka alla nivåer på rörlighet
- Ger lättbegripliga resultat

Nackdelar:

- Kan finnas betydande osäkerheter kring antaganden om hur rörlighet påverkar striden utan att inkludera framkomlighetsbaserade beslut i modellerna
- Lågupplöst, kan finnas svårigheter att koppla prestanda hos delsystem till stridseffekt

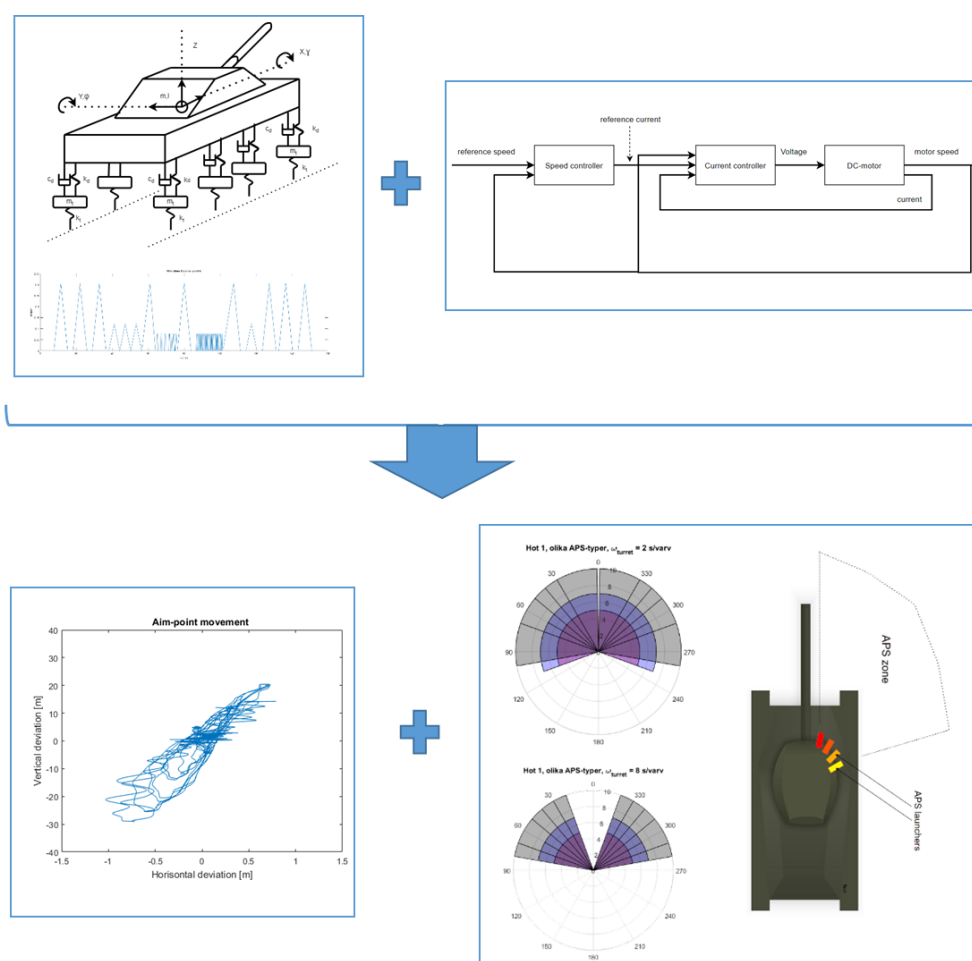
Figur 15. Förbandsmodell. Detta är en aggregering av resultat antingen direkt från delsystemmodeller alternativt samlade modeller, där förmågan till rörlighet ställs jämte alla andra egenskaper (verkan, fysiskt skydd etc.) som påverkar stridseffekten. Modellering på denna nivå kan ge lättbegripliga resultat, dock finns det också större osäkerheter framförallt beroende på hur scenarierna sätts ihop.

En av anledningarna till att modelleringen i många fall behöver ske på förbandsnivå när man ska värdera stridseffekt är att rörligheten har en stor påverkan på själva stridsförloppet. Utformningen av scenarier är således kritiskt för att förtjänsterna av en hög rörlighet ska få genomslag i simuleringsförloppet. Detta kan dock leda till svårigheter i att värdera system med olika nivåer av rörlighet där resultaten manifesteras som framryckningar med signifikant olika vägval i terrängen.

4 Pågående verksamhet

4.1 Utveckling av stridsfordonsmodeller

Under 2021 har projektet byggt vidare på den dynamiska modellen av stridsfordon som utvecklats i projektet *Värdering av kombinerade vapensystem* och tidigare använts för att värdera prestanda av en modern stridsvagn [33]. Syftet med årets arbete var att undersöka möjligheten att knyta ihop påverkan från rörlighet och markunderlaget med systemets andra förmågor så som verkan och skydd. Detta illustreras i Figur 16 som schematiskt visar att en dynamisk modell av en stridsvagn och en profil för markunderlag, tillsammans med modeller för styrning och reglering av torn och eldrör, kan beräkna hur eldrörets siktlinje kommer att variera vid körning på det givna markunderlaget. Med samma modell kan även prestandan av ett aktivt skyddssystem som är beroende av snabba tornvridningar analyseras.



Figur 16. Schematisk illustration av hur rörlighetsprestanda kan påverka förmågan till verkan och skydd.

Detta arbete har bland annat inneburit undersökningar av olika styrmetoder för att styra stridsvagnstorn och eldrör, där styrningen utvärderas baserat på respons för en referensändring, en referensstörning och osäkerheter i tornets massa och massfördelning.

Det har även tagits fram modeller för elektriska motorer som driver tornet samt elevation av eldröret på en stridsvagn. Dessa har tagits fram i syfte att studera och jämföra effekten av icke-ideala modeller av både de elektriska motorerna och de mekaniska systemen för torn- och eldrörsdrift med tidigare använda ideala modeller. De framtagna modellerna för

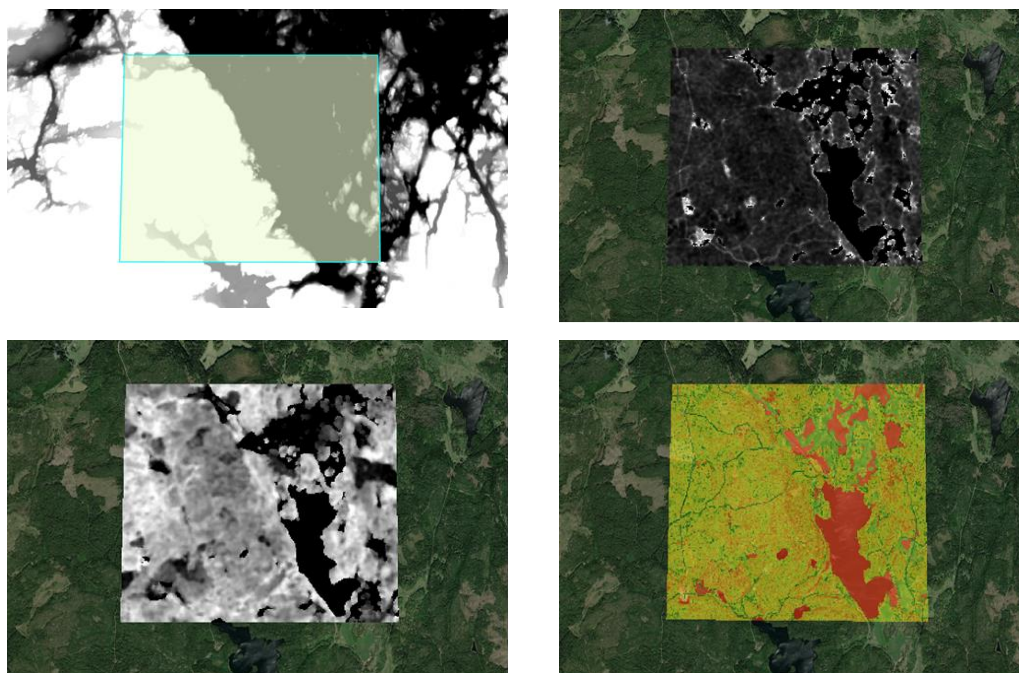
elektriska motorer har vidare kopplats till mekaniska system som representerar rotation av stridsvagnens torn och elevation av eldröret.

Även en enkel studie i modellering av stridsvagnsdynamik har genomförts för att undersöka hur framförandet i terräng påverkar precisionen i målträff. En systemmodell har utvecklats i MATLAB och SIMULINK för att simulera hur fordonet påverkas av underlagets variation och två olika former av stötdämpare har undersökts: en linjär modell samt en hydro-pneumatisk modell. Även bidraget från kanonens avfyrning har modellerats för att se hur rekylens bidrag påverkar rörelsen hos stridsvagnen. Delmålet med studien var att undersöka erforderlig detaljnivå i modellering av en systemmodell av ett fordon. Modeller med olika antal frihetsgrader har därför utvecklats för att jämföra förenklingsgraden.

4.2 Uppskattning av rörlighet utifrån geografisk information

I avsnitt 2.2 beskrivs översiktligt Natos framkomlighetsmodell för stridsfordon NG-NRMM. En väsentlig del av modellen bygger på användning av geodata. Mängden nya nationella geodata har ökat på senare tid, och deras kvalitet och detaljrikedom har följt samma trend. Det gäller särskilt geodata baserat på underlag från flyg- och satellitsensorer (såsom optiska bilder, laser, radar). Data finns idag enkelt tillgängligt i standardformat från dataansvariga myndigheter som t ex Lantmäteriet, Skogsstyrelsen och Naturvårdsverket, för användning i vanliga GIS (Geografiska informationssystem). Den här utvecklingen bäddar för möjligheten att utveckla och förbättra den del av framkomlighetsmodellerna som bygger på geodata. I detta syfte har tillgängliga nationella geodata studerats för användning i vanliga GIS som ett led i att stödja framkomlighetsanalyser, exempelvis vilka data finns idag, vilken bearbetning och anpassning behövs för att stödja framkomlighet och hur analysen bör ske.

Framryckningshastigheten hos ett fordon som framförs i terräng kan anses bero på ett antal faktorer som kan beskrivas i olika geodatalager. Exempel på faktorer är marklutning, markstruktur, bärighet, avstånd mellan trädstammar och stamdiameter. Att bestämma och validera dessa faktorer påverkan på ett fordon's framryckningshastighet är centralt för metodiken och en förhoppning är att Natos arbete med NG-NRMM kan vara en källa till information och stöd, liksom annat internationellt forsknings- och utvecklingsarbete inom området. Arbete pågår inom FOI med att förbättra och förfina uppskattningar av stridsfordons framryckningshastigheter i svenska terräng- och väderförhållanden i första hand som stöd till värderingsmodeller och simuleringar. Figur 17 visar ett exempel på GIS-baserad skattning av framryckningshastighet.



Figur 17. Exempel på GIS-baserad uppskattning av rörlighet. Uppifrån och från vänster: höjddata med intresseområde markerat, uppskattat (median)avstånd mellan trädstammar, uppskattad (median)diameter på trädstammar, samt resulterande beräkning av uppskattad maximal framryckningshastighet.

5 Slutsatser och framtida arbete

Litteraturstudien och inventeringen av FOI:s modeller inom rörlighet har tydliggjort behovet av att utveckla delsystemmodeller inom fordonsdynamik. Arbetet har även tydliggjort behovet av att utveckla metoder för att aggregera resultat från delsystemnivå till systemnivå och högre. I omvärlden syns flera trender som kommer få avgörande betydelse för utformningen av (och rörligheten hos) framtidens stridsfordon, främst utvecklingen och tillförseln av flera nya teknologier. Det framtida arbetet bedöms därför vara uppdelat i två delar, modellutveckling respektive studier av framtida teknologier:

Modellutvecklingen bör inkludera:

- Utveckling av nya delmodeller för att bygga en grundförståelse av fordons rörlighet, exempelvis modeller av framtida motorsystem eller hjulupphängning.
- Validering av modeller inklusive fel- och osäkerhetsuppskattningar.
- Hur olika delsystemmodeller kan integreras till mer kompletta fordonsmodeller.
- Hur markegenskaper bör modelleras, exempelvis via terramekanik eller empiriska modeller.
- Att utveckla aggregerade prestandamått och beslutsstödsunderlag, så som framkomlighetskartor, räckviddsberäkningar eller terrängvärderingsunderlag.
- Att utreda vilken detaljnivå på modeller och underlag som är lämplig för systemvärdering av fordonskoncept eller värdering av strid och förband.

Studier av framtida teknologier för markfordon inkluderar:

- Att utveckla effektmått (s.k. *measures of effectiveness*) och metoder kopplade till plattformdesign och begränsningarna eller kompromisserna inom ramen för en komplett fordonsdesign.
- Att studera hur rörlighet kan uppnås i autonoma fordon med modeller av fordons egenskaper samt sensordata och sensorfusion.
- Hur val av drivmedel påverkar fordons rörlighet och designen av framtida fordon.
- Hur kombinationer av drivmedel och hybridisering av elsystem påverkar fordons utformning och prestanda.
- Hur olika teknikval inom ett fordon (som valet av skyddsnivå och geometri) påverkar och påverkas av fordonets behov av rörlighet.

Det kommer att vara viktigt att prova metoder som utvecklas i fallstudier, där ett fordons delsystem modelleras upp och rörligheten värderas. Inledningsvis kan värderingen ske via mindre scenarier och i nästa steg i vidare och mer komplexa scenarier.

Inom ramen för framtida kravställningsarbete, men även för att balansera modelleringen, kan det vara lämpligt att utarbeta enklare verktyg för att kunna avväga olika kompromisser och lösningar inom ramarna för en viss design (s.k. *design space*).

För att fullt ut kunna utvärdera rörlighetens påverkan på stridseffekt så finns det ett antal utmaningar som bör adresseras på längre sikt, framförallt hur fordonens framkomlighet påverkar uppträdande på slagfältet.

6 Referenser

- [1] N. Bruzelius, "Lärobok i Militärteknik, vol. 5: Farkostteknik," Försvarshögskolan, Stockholm, 2010.
- [2] L. Ingelstam, "Skydd och rörlighet en matematisk modell," FOAA129, Försvarets Forskningsanstalt, FOA, Stockholm, 1963.
- [3] R. Skoglund, "Matematisk modell för avvägning av skydd, utspridning och rörlighet," FOAC4592-A3, Försvarets Forskningsanstalt, FOA, Stockholm, 1974.
- [4] B. Aulin, "Datormodell för simulering av fordonskolonnens marsch på väg och i terräng," FOAA2549-F7, Försvarets Forskningsanstalt, FOA, Stockholm, 1971.
- [5] P. Berling, "Ett datorsystem för simulering av fordonskolonnens marsch," FOAA2527-F7, Försvarets Forskningsanstalt, FOA, Stockholm, 1972.
- [6] G. L. Magnusson, "Some off-road mobility studies in Sweden," FOAA253697, Försvarets Forskningsanstalt, FOA, Stockholm, 1971.
- [7] B. Aulin, "Kunskapsläget rörande metoder för bestämning av fordons och förbands rörlighet," FOAC20200F8, Försvarets Forskningsanstalt, FOA, Stockholm, 1977.
- [8] DARCOM, "Engineering Design Handbook Army Weapon Systems Analysis part one," Command Department of the Army Headquarters US Army Materiel Development and Readiness, Alexandria, Virginia, 1977.
- [9] J. Hummelgren, "Eldkraft Rörlighet Skydd del 1 & 2," FOAC10268M4, Försvarets Forskningsanstalt, FOA, Stockholm, 1986.
- [10] L. Viberg, "Metodstudie –framkomlighetsinventering," FOAD30551-3_1, Försvarets Forskningsanstalt, FOA, Linköping, 1989.
- [11] K. Fridstrand, "Framkomlighet i övre Norrland -Utveckling och utvärdering av framkomlighetsmodell," FOAC208192.6, Försvarets Forskningsanstalt, FOA, Sundbyberg, 1990.
- [12] S. Abrahamson, "Framkomlighet i övre Norrland -Positionsbestämd spårdjupsmätning med ultraljudssensor och IR-avståndsmätare," FOAC208222.6, Försvarets Forskningsanstalt, FOA, Sundbyberg, 1990.
- [13] J. Wong, *Terramechanics and Off-Road Vehicles*, Ontario, Kanada: Elsevier Science Publishers B.V., 1989.
- [14] D. Rowland, "Tracked vehicle ground pressure and its effect on soft ground performance," i *Proceedings of the 4th International Conference of ISTVS, Vol 1*, Stockholm, 1972.
- [15] P. Rindstål, "Simulering av framkomlighet i terräng," FOAA100181.1, Försvarets Forskningsanstalt, FOA, Sundbyberg, 1991.
- [16] M. Arblom, "Operativ Rörlighetsmodell –programmet ORM," FOAA100271.1, Försvarets Forskningsanstalt, FOA, Sundbyberg, 1992.
- [17] M. Arblom, "A model for assessment of mobility on operational level for army units," FOAD10230, Försvarets Forskningsanstalt, FOA, Sundbyberg, 1992.

- [18] H. Andersson, "Modellering av markstrid under vinterförhållanden," FOAR9901064201, Försvarets Forskningsanstalt, FOA, Stockholm, 1999.
- [19] E. Caidahl, "Marschmodell för förband i ramverket FLAMES," FOI-R--0846, Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI, Linköping, 2003.
- [20] T. Corporation, "Ternion Corporation," Ternion Corporation, 2022. [Online]. Available: <http://ternion.com/>. [Använd 02 02 2022].
- [21] S. Berg, "Forskningsstiftelsen skogsarbetens terrängtypschema," SFM Specialnotiser nr 30, Stockholm, 1985.
- [22] J. Y. Wong, "Evaluation of the computer simulation model NTVPM for assessing military tracked vehicle cross-country mobility," *Journal of Automotive Engineering*, vol. 233, nr Issue 5, pp. 1194-1213, 2019.
- [23] J. Dasch, "Next-Generation NATO Reference Mobility Model (NG-NRMM) Development," NATO, Warren, 2020.
- [24] U. Saxin, "Framtagning av systemmodeller," FOI-R--4670, Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI, Stockholm Kista, 2018.
- [25] A. Carlstedt, "Modelling of electromechanical motors for turret and barrel control in main battle tanks," KTH Royal Institute of Technology, Department of Aeronautical and Vehicle Engineering , Stockholm, 2021.
- [26] V. Hallbeck, "System modelling and evaluation of main battle tank fire precision," KTH Royal Institute of Technology, Department of Aeronautical and Vehicle Engineering , Stockholm, 2021.
- [27] M. Lyth, "Modeling and Evaluation of Turret Control Systems for Main Battle Tanks," KTH Royal Institute of Technology, School of Electrical Engineering and Computer Science, Stockholm, 2021.
- [28] J. Rantakokko, "Gemensamma teknikbehov inom obemannade och autonoma system," FOI-R--5096, Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI, Linköping, 2020.
- [29] Y. Robinson, "AI och framtidens försvarsmedicin," FOI-R--5045, Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI, Stockholm, Kista, 2020.
- [30] P. W. Haley, "NATO Reference Mobility Model Volume I & II," Stevens Institute of Technology, Davidson Laboratory, Hoboken, 1979.
- [31] W. Suttie, "Electrification of Land Platforms UK Ministry of Defence Research and Development Activities," i *DSTL/PUB128628*, International Armoured Fighting Vehicle Conference 2021, 2021.
- [32] L. Sköldbäck, "Yttrande angående remiss av betänkandet Utfasningsutredningen (SOU 2021:48)," Försvarsmakten, Stockholm, 2021.
- [33] E. Fedina, "Teknisk värdering av moderna stridsvagnar," FOI-RH--2170, Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI, Stockholm, 2019.
- [34] T. Engineer, "Qinetiq awarded \$3m to drive future armoured fighting vehicles," *The Engineer*, 31 Augusti 2016. [Online]. Available: <https://www.theengineer.co.uk/qinetiq-awarded-3m-to-drive-future-armoured-fighting-vehicle-program/>. [Använd 8 Oktober 2021].

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Förvarsdepartementet. 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