



NIZAR CHAAR, MIKAEL LYTH,
JOHANNES ANDERSEN

Metod för analys av fordonskoncept ur ett rörlighetsperspektiv

Verktyg och metoder för framtagande och
implementation av framkomlighetskarter

Nizar Chaar, Mikael Lyth, Johannes Andersen

Metod för analys av fordonskoncept ur ett rörlighetsperspektiv

Verktyg och metoder för framtagande och implementation av
framkomlighetskartor

Titel	Metod för analys av fordonskoncept ur ett rörlighetsperspektiv – Verktyg och metoder för framtagande och implementation av framkomlighetskartor
Title	Mobility assessment of vehicle concepts – Tools and methods for establishing and implementing vehicle mobility maps
Rapportnr/Report no	FOI-R--5717--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2025
Antal sidor/Pages	57
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	Försvarsmakten
Forskningsområde	Vapen, skydd och säkerhet
FoT-område	Marksystem
Projektnr/Project no	E85115
Godkänd av/Approved by	
Ansvarig avdelning	Försvarsteknik

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

Rörlighet är en viktig förmåga hos militära fordon. I denna rapport beskrivs en metod för att värdera ett fordonets rörlighet i terräng genom att karakterisera fordonets framkomlighet i så kallade framkomlighetskarter. Framkomlighetskarter är specifika terrängavsnitt för vilka ett modellerat fordonets framkomlighet redovisas. I denna rapport har framkomlighetskarter tagits fram för ett bandfordon och ett hjulfordon. Dessa har modellerats med en terrängupplösning på 2,5 x 2,5 meter med longitudinella variationer (uppförs- och nedförsbackar) och med tre olika marktyper. Resultatet är att föreslagen metod är användbar för analys av fordonets rörlighet men att de förenklingar som gjorts med avseende på terrängupplösningen ger betydande begränsningar särskilt i djupare analys av exempelvis stridsteknisk rörlighet.

Nyckelord:

Rörlighet, framkomlighet, terramekanik, fordon, fordonsdynamik.

Summary

Mobility is a key aspect of a military vehicle. This report describes a method of how to assess the mobility of a vehicle using mobility maps. Mobility maps are specific sections of terrain in which the mobility of a vehicle is described. Mobility maps for both a wheeled and tracked vehicle were developed in this report. The vehicles have been modelled for 2,5 x 2,5 meter terrain patches with longitudinal variations and with three different ground conditions. The result show that the proposed method is useful for analysing vehicle mobility but the simplifications in the fidelity of the terrain limits the usefulness severely when the method is used for vehicle manoeuvrability.

Nyckelord:

Mobility, terramechanics, vehicles, vehicle dynamics.

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
1.1	Bakgrund.....	7
1.2	Syfte.....	7
1.3	Problemformulering	8
1.4	Begrepp och definitioner.....	8
1.5	Läsanvisningar.....	9
2	Metodöversikt för rörlighetsmodellering av stridsfordon	10
2.1	Genomgång av rörlighetsmodeller för fordon.....	10
2.2	Next Generation NATO Reference Mobility Model (NG-NRMM).....	11
2.3	Rekommendationer från Natostandard AMSP-06.....	13
2.3.1	Geografiska markdata.....	13
2.3.2	Fordonsmodellering	14
2.3.3	Terramekanik	14
3	Utvecklad metod för framtagning av framkomlighetskarter	15
3.1	Avgränsningar och antaganden.....	15
3.2	Modellbeskrivning av hjulfordon	16
3.2.1	Fordonsegenskaper	16
3.2.2	Fordonsmodell	16
3.3	Modellbeskrivning av bandfordon.....	17
3.3.1	Fordonsegenskaper	17
3.3.2	Fordonsmodell	18
3.4	Deformerbar terrängmodell	19
3.5	Beräkning av framkomlighetskarter	20
4	Resultat	21
4.1	Beräkningsresultat för Humvee-baserade fordonsmodellen.....	22
4.2	Beräkningsresultat för Marder-baserade fordonsmodellen.....	23
4.3	Diskussioner kring simuleringsresultaten	24
4.4	Höjddata från Kvarns övningsområde	26
4.5	Framkomlighetskarta för hjulfordonet HMMWV på Kvarns övningsområde	26
4.6	Framkomlighetskarta för bandfordonet Marder på Kvarns övningsområde	28
4.7	Jämförelse mellan hjul- och bandfordon	30
5	Diskussion och framtida arbete	32
6	Referenser.....	33
7	Appendix A - Genomgång av rörlighetsmodeller.....	36
7.1	Army Material Command (AMC) rörlighetsmodell.....	36
7.2	Mean Maximum Pressure (MMP).....	36
7.3	Nato reference mobility model (NRMM / NRMM II).....	36
7.4	Nepean Tracked Vehicle Performance Model (NTVPM)	37

7.5	New generation Nato reference mobility model (NG-NRMM)	37
7.6	Sammanfattning	37
8	Appendix B - Genomgång av terrängmodeller	38
8.1	Teoretiska modeller.....	38
8.2	Empiriska modeller.....	39
8.3	Semi-empiriska modeller	39
8.3.1	FEM- och DEM-modeller.....	40
9	Appendix C Fordons- och terrängmodellering i Project Chrono.....	42
10	Appendix D Modellbeskrivning av deformierbar terrängmodell i Project Chrono.....	44
11	Appendix E Fordonsparametrar hjulfordon	46
12	Appendix F Fordonsparametrar bandfordon	52

1 Inledning

Projektet *Markfordon – rörlighet och systemintegration* är en del av FoT-området *Marksystem*. Projektet består av två huvudsakliga delar: en del som syftar till att ta fram metoder och modeller för att värdera rörlighet och effekter därav, och en del för att ta fram metoder för systemdesign, inklusive analys och integration av viktiga framtida teknologier. FoT Marksysteem ska arbeta systemövergripande och ta vara på detaljkunskap och fenomenforskning som pågår i andra FoT-områden för att aggregera kunskap till en systemnivå. Målet är att kunna beskriva, analysera och värdera olika fordonskoncept på en plattform- och system-av-systemnivå, för att exempelvis kunna bidra till Försvarens förmågeutveckling.

Det finns behov av att utveckla metoder som kan användas för analys av fordons rörlighet över givna geografiska områden. Särskilt på en stridsteknisk nivå är fordonens rörlighet och framkomlighet viktiga för ett förbands förmåga att lösa uppgifter. Den övergripande och långsiktiga målsättningen med arbetet som beskrivs i denna rapport är därför att kunna besvara frågor av karaktären: ”Hur påverkar olika konfigurationer av ett fordons bandagregat framkomligheten i övre Norrland?”.

Ett av projektets mål är att höja kunskapsnivån vad gäller modellering av rörlighet samt att analysera på vilken detaljnivå rörlighet kan och bör modelleras. I denna rapport beskrivs därför metoder för att modellera rörligheten för ett hjul- respektive bandfordon och för att visualisera fordonens framkomlighet i form av framkomlighetskartor.

1.1 Bakgrund

Rörlighet är en viktig egenskap för Försvarens förband, vilket framgår av förmågeklassificeringsmallen TURVLUS¹ och Försvarens ramvillkor för typförband, RVT². Rörligheten är relevant på olika nivåer beroende på syftet [1] och bedöms normalt på strategisk, operativ, taktisk och stridsteknisk nivå, se även definitioner i avsnitt 1.4. En djupare förståelse för vad som påverkar ett fordons rörlighet är viktig för att på en grundläggande nivå förstå möjligheter och begränsningar med olika typer av fordon. Detta gäller såväl befintliga som framtida (tänkta) fordonskoncept, då sådana analyser kan behövas både i tidiga faser i materielanskaffning och vid utvärdering av olika leverantörers system.

Två exempel på projekt som är direkta avnämare av metoder för analys av rörlighet är dels *Analysmiljö mark*, ett projekt som utvecklar ett verktyg för ett digitalt spel- och förmågeutvecklingsstöd, dels projektet *Operativ värdering av markstrid, OVAM*, som också är en del av FoT Marksysteem. I det senare projektet studeras värdering av förband med hjälp av exempelvis krigsspel och genom modellutveckling på högre taktisk nivå. Motsvarande typer av analyser genomförs även i projekt *MKOK 804 – Stöd till förmågeinriktning* inom delprojektet *OASIS* som beställts av Försvarensstabens. I dessa analyser kan framkomlighetskartor utgöra ett viktigt underlag.

1.2 Syfte

Denna rapport syftar till att beskriva en metod för att utvärdera fordons rörlighet. Metoden är baserad på 3D-modellering och simulering som tar hänsyn till markegenskaper, fordonets prestanda och interaktionen mellan fordonet och marken.

¹ TURVLUS står för tillgänglighet, underrättelser, rörlighet, verkan, ledning, uthållighet och skydd. Denna klassificeringsmodell används för att klassificera och ordna förmågekrav.

² RVT står för ramvillkor för typförband och avser kraven på förbanden enligt TURVLUS-modellen.

1.3 Problemformulering

Modeller som med hög detaljnivå beskriver ett fordon framkomlighet är viktiga för att värdera olika typer av fordon i en militär kontext. Hur väl (och hur snabbt) ett fordon kan framföras i olika typer av terräng är viktig information för hur en militär operation kan genomföras och är därmed en viktig parameter i utvecklingen och designen av fordon. Det är därför viktigt att både kunna bedöma och värdera ett fordon framkomlighet samt att kunna fastställa och synliggöra fordonets förmåga.

Detaljerade modeller över fordon framkomlighetsförmåga är komplexa eftersom denna påverkas av en mängd faktorer, däribland fordonets dynamik, terrängtypen och begränsningar i hur fordonet kan eller får användas. Det finns dessutom många osäkerheter eftersom tillgänglig information om aktuella markegenskaper kan vara bristfällig eller lågupplöst. Marken är sällan homogen och kan bestå av en blandning av sand, jord, och lera tillsammans med rötter och stenar. Att beskriva framkomligheten för ett fordon på ett godtyckligt terrängsegment är därför svårt jämfört med värderingar på kontrollerade marktyper med begränsade osäkerheter. Av dessa anledningar är det svårt att enbart utifrån modeller och simuleringar förutsäga ett visst fordon framkomlighet i detalj på ett specifikt terrängavsnitt. Simuleringarna utgör snarare ett statistiskt underlag för att bedöma framkomligheten mer övergripande.

En effektiv metod för framkomlighetsbedömningar är även viktig som stöd för planering och genomförande av operationer. Därför är metoder för att visualisera ett fordon framkomlighetsförmåga utifrån aktuella terrängdata viktiga. Problemet som studeras i den här rapporten är därför inte bara hur framkomlighet ska beräknas utan även hur framkomlighetskarter kan användas för att beskriva fordon framkomlighet i terräng.

1.4 Begrepp och definitioner

Det finns olika begrepp och definitioner som används, och denna rapport gör ingen ansats att ensa dessa utan beskriver nedan hur begreppen använts i rapporten. Metoden som redovisas i rapporten resulterar i framkomlighetskarter där olika mått på rörligheten redovisas. Framkomlighetskarterna är tänkta att användas för att kunna värdera rörligheten, men själva värderingen görs inte inom ramen för detta arbete vilket gör att effektmått inte förekommer. Arbetet värderar heller inte effekten av olika framkomlighet mellan fordon exempelvis avseende värdet av hög maximal hastighet jämfört med värdet av att kunna färdas i olika riktningar.

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

- *Strategisk rörlighet* avser den rörlighet som krävs för att ta sig 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. För att värdera effekter av olika strategisk rörlighet bör effektmått användas, vilket inte görs inom ramen för detta arbete.
- *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. Framkomlighetskarter med maximal hastighet för respektive fordon kan med fördel användas till analyser av operativ rörlighet.
- *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 ett fordon har avseende manöverförmåga och framkomlighet. Framkomlighetskarter med maximal hastighet för respektive fordon kan med fördel användas till analyser av operativ rörlighet.
- *Stridsteknisk rörlighet* beskriver ett enskilt fordon rörlighet och då **i syfte att nå en position** från vilket fordonet kan avge verkan alternativt rörlighet i syfte att undgå motståndarens bekämpning. I princip samma egenskaper som

manöverförmåga. Framkomlighetskarter som normalt sett är framtagna utifrån låg upplösning i både markförhållanden och topografi lämpar sig inte för denna typ av analys.

- *Framkomlighet* är ett begrepp som omfattar fordons förmåga att ta sig genom terräng. En framkomlighetskarta för ett givet fordon redovisar detta fordons rörlighet inom området (i terrängen), exempelvis genom maximal hastighet eller antal möjliga färdriktningar.
- *Manöverförmåga* påverkar fordonets förmåga till **riktningsförändringar, hastighet och acceleration**. Endast begränsad analys av ett fordons manöverförmåga kan genomföras utifrån den metod som redovisas i denna rapport då metoden inte fångar denna typ av dynamik.

Flera av definitionerna och begreppen ovan används inte i denna rapport, men är inkluderade i syfte att klargöra vilken nivå av rörlighet metoden bär mot.

I denna rapport redovisas tre typer av framkomlighetskarter med varsitt framkomlighetsmått. Dessa framkomlighetsmått är:

- Konservativ hastighetsuppskattning, det vill säga att av de olika maximala hastigheterna i olika färdriktning så redovisas den lägsta (oavsett färdriktning).
- Normal hastighetsuppskattning, den maximala hastigheten givet en bestämd färdriktning.
- Riktningssuppskattning, det vill säga hur många av ett antal förutbestämda riktningar som är farbara. Detta är således ett mått på flexibilitet eller valmöjlighet utifrån framkomligheten.

Ett ofta använt mått för att beskriva ett fordons rörlighet är ”speed-made-good” som är en hastighet beräknad utifrån fågelavståndet mellan två punkter delat med tiden det tog för fordonet att ta sig mellan dessa två punkter *oavsett färdväg*. Detta innebär att fordon som kanske kan välja en rutt med längre verklig körsträcka mellan två punkter, men som kan hålla en hög hastighet, kan erhålla en högre speed-made-good än motsvarande med en mer direkt rutt.

Ett mått som ibland används för att förenkla beskrivningen med framkomlighetskarter är omni-speed, vilket är en snitthastighet över ett givet terrängavsnitt oavsett färdriktning.

1.5 Läsanvisningar

De fyra kapitlen som kommer efter inledningen beskrivs här avseende innehåll och inriktning.

I kapitel 2 ges en allmän presentation om rörlighetsmodeller för fordon som är utvecklade för att förutsäga fordonets rörlighet och prestanda i terräng. En detaljerad beskrivning av en fysikaliskt baserad modell presenteras. Detta kapitel är avsett för läsare som vill ha en översikt över de olika metoderna som används för att modellera fordons rörlighet och metoder för att ta fram framkomlighetskarter.

I kapitel 3 beskrivs de modeller och den framtagna metoden som använts i detta arbete. Det inkluderar 3D-modeller av ett hjul- och ett bandfordon och en semi-empirisk markmodell med markdata och höjddata. Metoden som används för att ta fram framkomlighetskarter förklaras. Detta kapitel är avsett för läsare som är intresserade av appliceringen av fordonsmodellering och simulering i syfte att ta fram framkomlighetskarter.

I kapitel 4 redovisas beräkningsresultat för hjul- och bandfordon och här beskrivs proceduren för att fram en framkomlighetskarta. Framkomlighetskarter för hjul- och bandfordon presenteras.

I kapitel 5 sammanfattas slutsatser och rekommendationer inför fortsatt arbete.

2 Metodöversikt för rörlighetsmodellering av stridsfordon

Det finns ett antal mått som beskriver prestanda gällande fordons rörlighet. Dessa mått inkluderar fordonets acceleration, dess maximala hastighet, broms- och styrningsförmåga och dess stigningsförmåga.

Högsta möjliga hastighet för en given punkt i en terräng är en av de viktigaste måtten för ett fordons rörlighet, [2]. För att beräkna den maximala hastigheten utvecklas olika fordonsrörlighets- och beräkningsmodeller. Tidigare modeller från 70- och 90-talet är baserade på empiriska metoder medan de senaste modellerna är baserade på fysikaliska grunder.

Många modeller innehåller fordons- och markmodeller som inkluderar geodata och markegenskaper. Huvudsyftet med dessa är att beräkna fordonets framkomlighet genom att beräkna den snabbaste färdvägen mellan två punkter.

2.1 Genomgång av rörlighetsmodeller för fordon

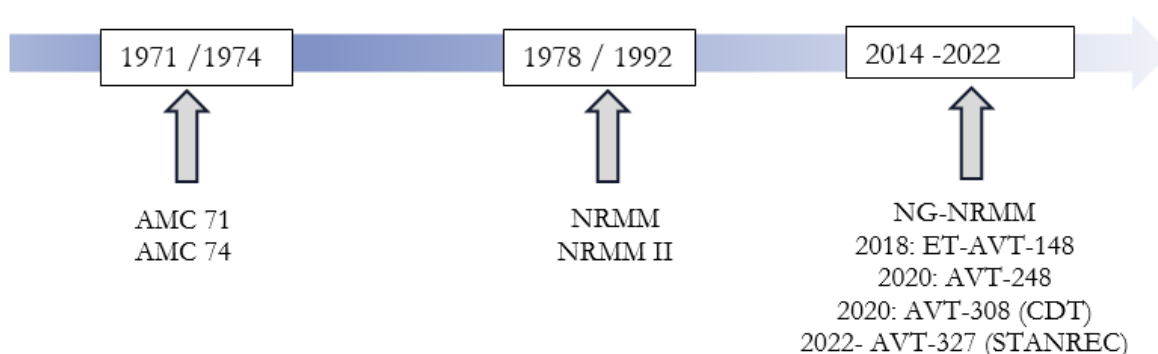
Under andra halvan av 1970-talet vidareutvecklade Nato AMC³-74 rörlighetsmodellen [3] till vad som kom att kallas Nato Reference Mobility Model NRMM [4]. Denna omfattande modell kombinerar förenklad fordonsgeometri, geometri hos hinder, klassificering av markförhållanden och empiriska ekvationer för att kunna representera terrängen likt en mosaik av olika områden där framkomligheten, exempelvis i termer av maximal hastighet, kan beräknas.

NRMM:s huvudsakliga begränsningar är att:

- Den bygger på empiriska metoder och är därför begränsad till vissa fordonstyper och prover.
- Det är svårt att kunna extrapolera från befintliga modeller till nya fordonskonstruktioner och olika körfall.
- Den tar inte hänsyn till fordonet laterala dynamiska egenskaper eller stabilitet.
- Den stödjer inte 3D-modellering och dynamiska beräkningar.

NRMM uppdaterades löpande under en längre tid, och man tog fram en mer omfattande reviderad version, NRMM II. Mot slutet av 2010-talet såg man ett behov av att på ett mer generellt sätt kunna extrapolera uppmätta fordonsprestanda i kombination med mycket mer detaljerade terräng- och markförhållanden och därmed ersätta den starkt empiriskt baserade NRMM med en mer simuleringstung, prediktiv modell. Denna modell benämns NG-NRMM. Den historiska utvecklingen av rörlighetsmodeller från 70-talet visas i figur 1.

³ United States Army Materiel Command eller AMC är en del av USA-armé med ansvar att förvalta och utreda armémateriel.



Figur 1. Historisk utveckling av rörlighetsmodeller för fordon: 70- och 90-talets modeller är baserade på empiriska metoder medan NG-NRMM är baserade på fysik och använder 3D-modellering och simulering.

2.2 Next Generation NATO Reference Mobility Model (NG-NRMM)

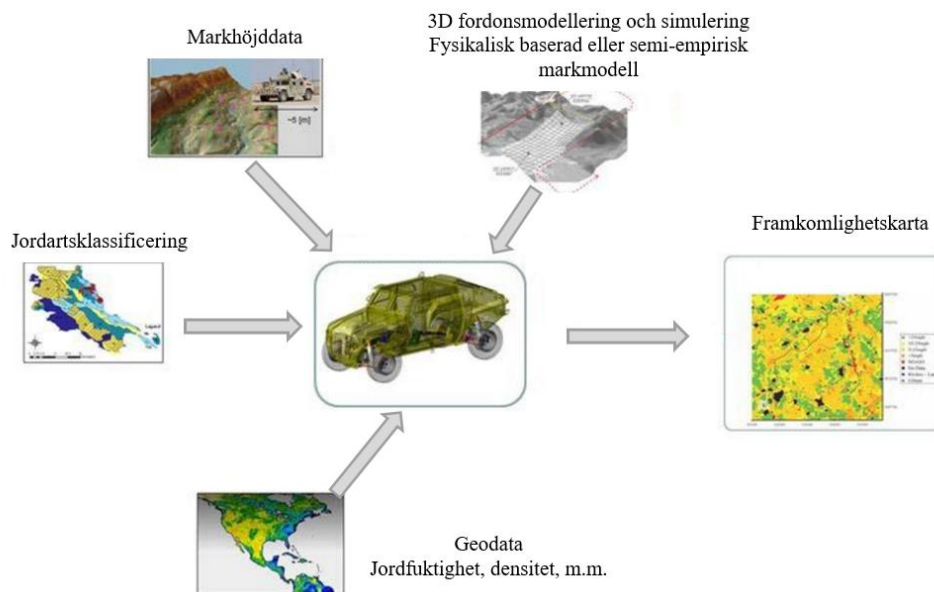
NG-NRMM är en relativt ny metod som är baserad på 3D-modellering av terräng i kombination med simulering i syfte att kunna beräkna olika fordons rörlighet.

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

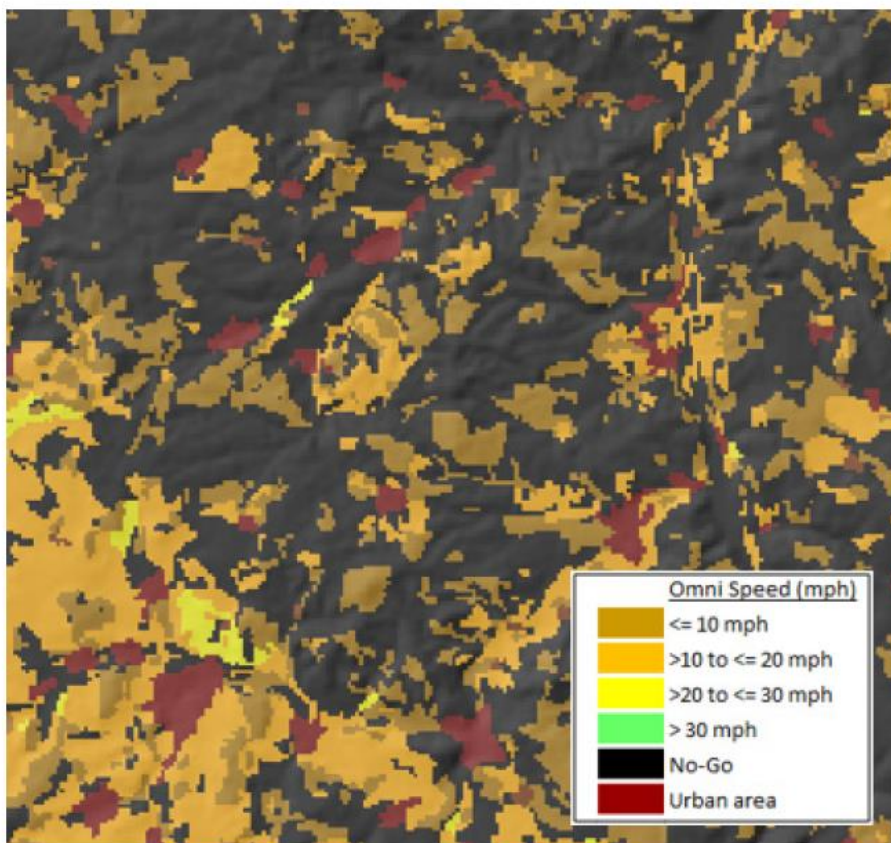
NG-NRMM har flera komponenter som utgör förbättringar:

- Hantering av terräng genom omfattande geodata som består av ett antal lager (höjdprofil, uppmätta markförhållanden och andra typer av geodata som visas i tabell 1).
- Användning av geografiska informationssystem (GIS) som möjliggör att samla, hantera och visualisera markrelaterade data.
- Utveckling av verklighetstroga 3D-fysikbaserade fordonmodeller.
- Utveckling av förenklad 2D- och avancerade 3D-terramekaniska modeller för att beskriva interaktionen mellan fordon och mark, där jordens fysikaliska egenskaper mäts upp med hjälp av en så kallad bevameter, se Appendix B, med samma mätmetod som beskrivs i [5] och [6].
- Hantering av autonoma fordon.
- Hantering av osäkerhetsanalyser.

Utifrån geodata genomförs fordonssimuleringar som sedan genererar framkomlighetskartor enligt figur 2. Dessa kartor kan sedan användas för utvärdering av fordonets framkomlighet eller mer direkt i planering av operationer. Ett exempel på framkomlighetskarta visas i figur 3. Figuren illustrerar omni-speed över ett visst område. Svartfärgade ytor utgör så kallade ”No-Go”-områden där fordonet inte kan passera.



Figur 2. Metoden, och även dataflödet, i NG-NRMM. Kartografiska data kompletteras med fordonssimuleringar vilket utmynnar i framkomlighetskartor.



Figur 3. Framkomlighetskarta med omni-speed beräknat utifrån NG-NRMM visualiserat över en karta. Omni-speed avser medelhastighet över terrängen oavsett färdriktning. Faksimil från [7].

2.3 Rekommendationer från Natostandard AMSP-06

Arbetet med NG-NRMM utmynnade i en natostandard AMSP-06 [8] som syftar till att beskriva rekommendationer och riktlinjer för produktion av framkomlighetskarter med hjälp av simuleringsverktyg. Slutmålet enligt [8] är att ta fram framkomlighetskarter med följande mått:

- 1) "Go/NoGo".
- 2) Speed-made-good.
- 3) Fordonets bränsleförbrukning.
- 4) Åkkomfort (farbart eller inte med hänsyn till personalen).

2.3.1 Geografiska markdata

Enligt [8] bör geodata innehålla information för det yttre och inre jordlagret. De relevanta egenskaperna rör bland annat jordens beskaffenhet, markanvändning och topologi. För fler detaljer, se tabell 1.

Tabell 1. Rekommenderade geodata enligt AMSP-06. Geodata bör innehålla bland annat information om jordart, temperatur och fuktighet, markanvändningen och topologi.

	Markdata	Kommentarer
Geodata	Jordartsklassificering.	Klassificering enligt "Unified Soil Classification system (USCS)" ⁴ .
	Bulkdensitet, [g/cm ³].	Måttet beskriver jordens packningsgrad.
	Jordfuktighet, [%]	
	Jordytans temperatur, [°C].	
	Djupet av det yttre jordlagret, [cm].	
	Markanvändning.	Klassificering enligt "Multinational Geospatial Co-Production Program (MGCP)" ⁵ .
Höjddata	Raster som innehåller markhöjd, lutning, lutningsriktning och yttjämnhet.	Rekommenderad upplösning är mindre än en femtedel av hjuldiametern.

Geodata bör också innehålla statistiska data som temperaturens och fuktighetens variation över tid. Högupplösta höjddata gör det möjligt att identifiera små hinder och ge bättre uppskattning av exempelvis färdkvalitet men kräver samtidigt större beräkningskapacitet. Höjddata med lägre upplösning täcker större områden och har lägre krav på beräkningskraft men saknar den detaljnivå som kan behövas för att beskriva plötsliga förändringar i marktopografi och små hinder.

I [8] rekommenderas en upplösning inom följande intervall:

$$\frac{hjuldiameter}{10} \leq \text{upplösning} \leq \frac{hjuldiameter}{5}$$

⁴ Unified Soil Classification System eller (ISCS) är ett klassificeringssystem som används för att beskriva markstrukturen och jordart baserad på kornstorleken.

⁵ Multinational Geospatial Co-Production Program eller (MGCP) är ett samarbete mellan 30 länder som syftar att få fram högupplösta topografiska vektor data såsom gränser, hydrografi, byggnader, vägar, vegetation med mera.

2.3.2 Fordonsmodellering

I NG-NRMM används 3D-modellering och beräkningar för att representera fordonet med hög detaljnivå. Fordonsmodeller bör valideras och verifieras mot standardiserade fordonstester som inkluderar:

- Accelerationstest för att validera modellen av motorn och drivlinan.
- Bromstest för att validera modellen av bromsdelssystemet.
- Vändradie och dubbel filbytesmanöver för att validera fordonsstyrsystem och – stabilitet.
- Körning över hinder för att validera modellen av fordonsfjädringen.

2.3.3 Terramekanik

I NG-NRMM är markmodeller uppdelade i ”enkla” och ”komplexa” modeller beroende på hur sofistikerad modellen är. Enkla modeller är baserade på semi-empiriska metoder. Komplexa modeller omfattar huvudsakligen modeller baserade på diskreta elementmetoden, DEM. I Appendix B ges en beskrivning av olika terrängmodeller.

Terrängmodeller kräver mätdata på olika slag beroende på modellens komplexitet. För semi-empiriska modeller utförs tryck- och skjuvprov medan komplexa modeller kräver avancerade markprov såsom triaxiella skjuvprov.

3 Utvecklad metod för framtagning av framkomlighetskartor

Syftet med detta arbete är att utveckla en metod för framtagning av framkomlighetskartor med hjälp av modellering och simuleringar. Metoden som används omfattar följande modeller och data:

- 3D-modeller av ett hjul- och ett bandfordon.
- En semi-empirisk markmodell.
- Uppmätta markdata.
- Höjddata över övningsområdet Kvarn, se 4.4.

Fordonssimulering och beräkningar utförs med hjälp av simuleringssverktyget Project Chrono [9]. Projekt Chrono innehåller förutom modeller för fordonets dynamik även modeller för mjukmark. En detaljerad beskrivning av fordons- och terrängmodellering i Project Chrono finns i Appendix D.

3.1 Avgränsningar och antaganden

Avgränsningar och antaganden sammanfattas i tabell 2 och jämförs mot riktlinjer och rekommendationer som presenteras i [8]. Dessa avgränsningar avser främst geografiska data (geodata) och validering av fordonsmodeller.

Tabell 2. Avgränsningar och antaganden som rör geodata, fordons-och markmodeller samt rörlighetsmått för fordon.

	Metod som används i arbetet	Rekommendationer enligt AMSP standarden [8].
Geodata	Inga markdata inkluderas.	Se tabell 1
Höjddata	Höjddata med lutning och lutningsriktning.	Se tabell 1
Upplösningsnivå, per cell	2,5 m x 2,5 m.	
Fordonsmodell och modelldata	3D-fordonsmodell. Modelldata hämtas från litteraturen.	Standardiserade fordonstest används för att validera modellen, se 2.3.2
Markmodeller och markegenskaper	Semi-empirisk modell. Uppmätta markdata hämtas från litteraturen.	Se 2.3.3
Rörlighetsmått för fordon	Go/No-Go ”Single pass”, det vill säga endast ett fordon. Bedömd hastighet enligt figur 4.	Se figur 4



Figur 4. Bedömd hastighet som används i stället för "speed-made-good". Bedömd hastighet motsvarar den beräknade hastigheten 20 m efter den initiala uppförlutningen.

Beräkningar görs för tre typer av mark:

- Project Chronos ”Rigid terrain” modell som representerar icke deformierbar fast mark utan ojämnheter.
- Torr finkornig jord.
- Blöt finkornig jord.

I fortsättningen används uttrycket *fast mark* för att beskriva Project Chronos ”Rigid terrain” modell.

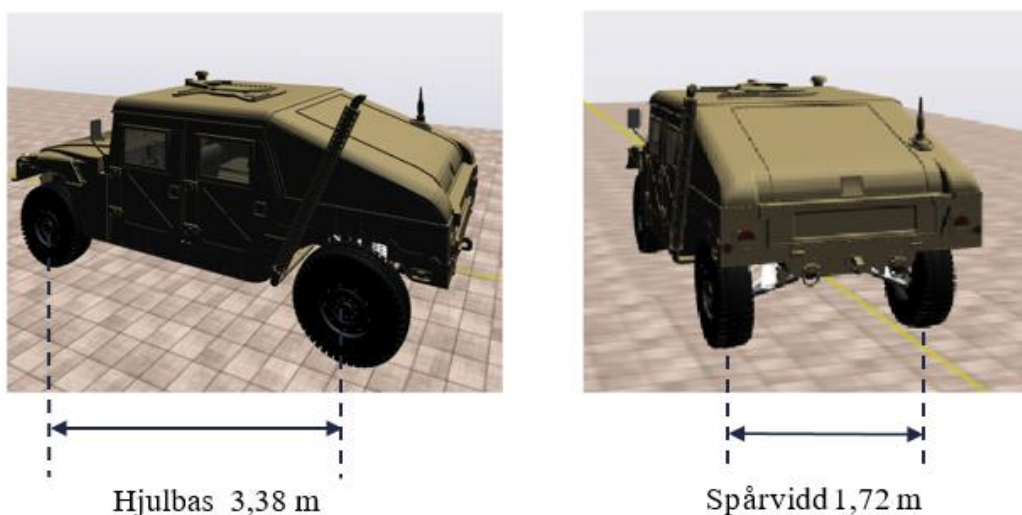
Metoden tar inte hänsyn till träd i beräkningen av framkomligheten.

3.2 Modellbeskrivning av hjulfordon

En hjulfordonsmodell baserad på en Humvee⁶ används som hjulfordon i detta arbete.

3.2.1 Fordonsegenskaper

Fordonets grundmått såsom hjulbas och spårvidd visas i figur 5. En utförlig lista över fordonsparametrarna ges i Appendix E där samtliga parametrar är hämtade från Project Chrono v.9.0.0.



Figur 5. Hjulbas och spårvidd för Humveemodellen.

3.2.2 Fordonsmodell

Fordonsmodellen består av:

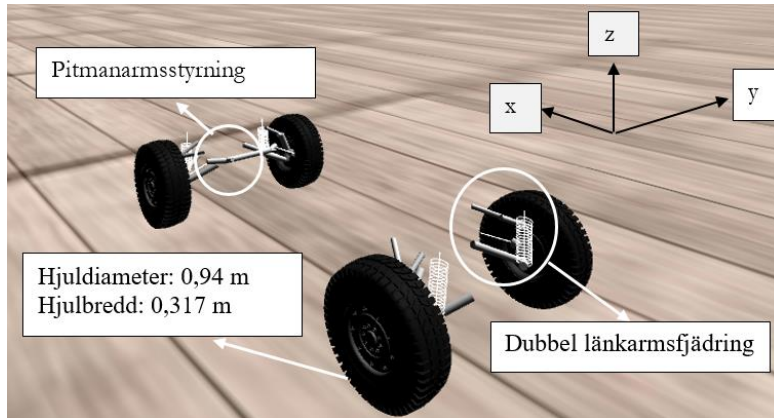
- Ett chassi som är representerat som en stel kropp med massa, tröghetsmoment och tyngdpunkt.
- En dubbel länkarmsfjädringsmodell för främre och bakre upphängning, se figur 6.
- En Pitmanarm för styrning.
- En däckmodell baserad på ”TMeasy”-modell⁷ och stel däckmodell.
- En ”enkel” bromsmodell som definieras av maximalt bromsmoment.

⁶ Humvee kommer från akronymen HMMWV, ”High Mobility Multi-Purpose Wheeled Vehicle”.

⁷ Däckmodellen TMeasy är baserad på en semi-fysikalisk metod som tar hänsyn till laterala och longitudinella krafter [9].

- En drivlina där motorn representeras med Project Chronos "Simple engine model". Motorns maximala vridmoment och effekt presenteras i tabell 3. Växellådans utväxling för respektive växel förtecknas i tabell 4.

Fordonets totala massa är 2 573 kg. Chassits massa är 2 086 kg.



Figur 6. 3D-modell och koordinatsystem. Figuren visar styrnings- och fjädringsdelssystem samt däckmodellen.

Tabell 3. Motorns maximala vridmoment och effekt.

Parameter	Värde
Vridmoment, [Nm]	730
Motoreffekt, [kW]	114

Tabell 4. Växellådans utväxling

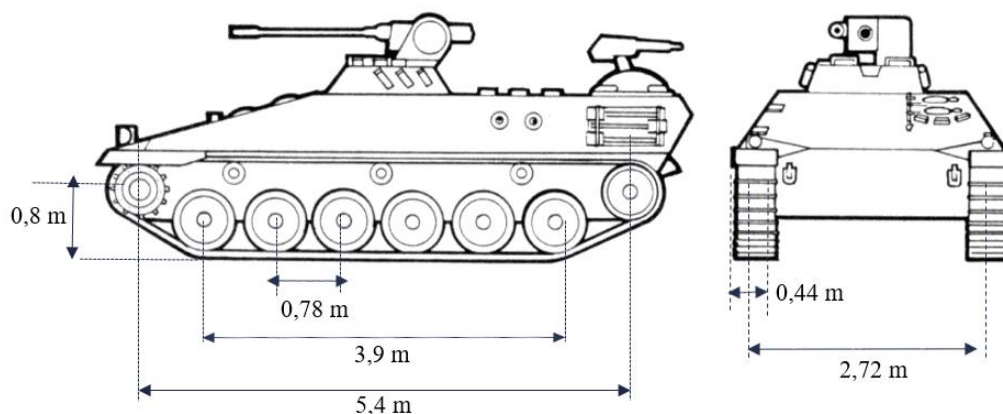
Växel 1	Växel 2	Växel 3	Växel 4	Växel 5	Växel 6
0,17	0,28	0,42	0,62	1,02	1,54

3.3 Modellbeskrivning av bandfordon

Bandfordonsmodellen är baserad på pansarskyttefordonet Marder som tillverkades av Rheinmetall Landsystem [10]. Modellen består av chassi och bandaggregat.

3.3.1 Fordonsegenskaper

Fordonets mått visas i figur 7. Chassi och bandaggregat massa förtecknas i tabell 5. En utförlig lista över fordonsparametrar ges i Appendix F.



Figur 7. Bandfordonets mått.

Tabell 5. Chassi- och bandaggregat-massa.

Fordonsdelsystem	Vikt [kg] x antal	Kommentar
Chassi (fjädrad massa)	25 000	
Drivhjulskrans	27,7 x 2	1 per sida
Bandsystem	18 x 77 x 2	77 bandplattor per sida
Spännhjul	25,7 x 2	1 per sida
Stödrulle	10 x 6	3 per sida
Bärhjul	36 x 12	6 per sida
Torsionsstav	75 x 12	6 per sida
Total massa	29 271	

3.3.2 Fordonsmodell

Fordonsmodellen består av:

- Chassi som är representerade som en stel kropp med massa, tröghetsmoment och tyngdpunkt.
- Höger och vänster bandaggregat. Bandaggregatmodellen visas i figur 8.
- Fordonsfjädringar som består av 4 stötdämpare per sida och en torsionsstav vid varje bärhjul, se figur 9.
- Drivlina där motorn representeras med Project Chronos "Simple engine model". Motorns och växellådans parametrar beskrivs i

- tabell 6 och tabell 7.

Samtliga fordonsdata är hämtade från Project Chrono v.9.0.0 med undantag för motorns maximala vridmoment. I detta arbete har det maximala vridmomentet ändrats från 2 400 Nm till 4 545 Nm för att kunna få en stigningsförmåga som bättre stämmer med Marders verkliga prestanda.

De viktigaste antagandena i fordonsmodellen är:

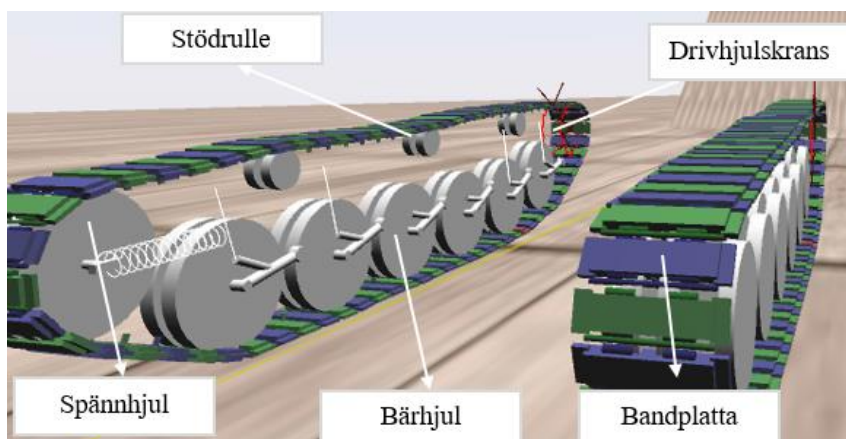
- Bandspännaren är modellerad med en longitudinell förspänd fjäder, se figur 9.
- Kontakten mellan olika delsystem i bandaggregaten definieras med Project Chronos kontaktmetod SMC, se [11].
- Bandplattorna är modellerade som stela kroppar och gummiplattor är inte inkluderade.

Tabell 6. Motorns maximala vridmoment och effekt.

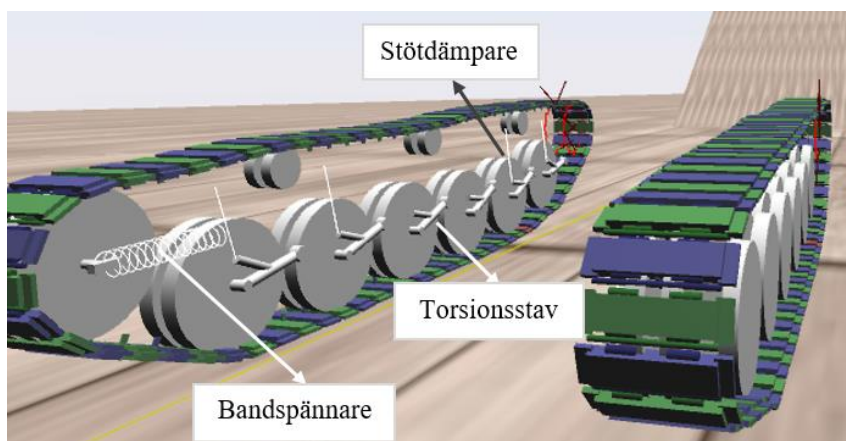
Parameter	Värde
Vridmoment, [Nm]	4 545
Motoreffekt, [kW]	500

Tabell 7. Växellådans utväxling.

Växel 1	Växel 2	Växel 3	Växel 4	Växel 5	Växel 6
0,17	0,28	0,42	0,62	1,02	1,54



Figur 8. Bandaggregatmodell som inkluderar spännhjul, stödrullar, bandplattor, bärhjul och drivhjulskrans.



Figur 9. 3D-modellen som visar fordonets fjädringssystem och bandspännare. Bandspännarna är modellerade som longitudinellt förspända fjädrar.

3.4 Deformerbar terrängmodell

Markmodellen som används i Project Chrono är baserad på den semi-empiriska ekvationen från Bekker-Wong. Modellen är anpassad för 3D-simuleringar och beskrivs i Appendix D.

I denna studie undersöks, utöver fast mark, deformerbar terräng. Den deformerbara terrängens egenskaper återfinns i Appendix D, tabell 14.

3.5 Beräkning av framkomlighetskarter

Utifrån metoden som beskrivs i [8] kan underlag för framkomlighetskarter skapas. Inom ramen för arbetet som presenteras i denna rapport studeras endast hur markens longitudinella lutning påverkar framkomligheten för ett fordon. Därför produceras ett dataunderlag bestående av markens lutning i respektive punkt samt lutningens riktning. Fordonets hastighet för olika lutningar bestäms och används för att i varje punkt, utifrån markens lutning, beskriva fordonets maximala hastighet i den punkten. Korrelationen mellan markens lutning och fordonets hastighet bestäms genom att interpolera de framtagna fordonshastigheterna för kända lutningar för respektive lutning i det studerade området. Laterala effekter och att fordon i nedförsbacke kan behöva bromsa för att behålla kontrollen bortses ifrån.

Den maximala hastigheten för fordonet är lägre om det är riktat uppför lutningen istället för vinkelrätt mot lutningen eller i nedförsbacke, det vill säga att laterala effekter och bromseffekter inte beaktas. Framkomlighetskarterna framtagna i detta arbete behöver därför visa på skillnader i riktning. I denna rapport produceras tre typer av framkomlighetskarter med hänsyn till färdriktningskänslighet.

Den första typen av karta visar framkomligheten med en konservativ hastighetsskattning. Detta görs genom att i varje punkt bestämma den lägsta hastigheten fordonet kan köra i någon av de beräknade riktningarna. Detta är en konservativ skattning eftersom det inte är säkert att fordonet behöver köra i den ”sämsta” riktningen.

För den andra typen av framkomlighetskarta bestäms en riktning som lutningen projiceras på. Detta innebär att endast lutningen som ligger i den valda riktningen kommer ha en påverkan på den bedömda hastigheten, en lutning vinkelrät mot den valda riktningen blir noll och en lutning i motsatt riktning blir en nedförsbacke. Den exakta projicerade lutningen bestäms genom ekvation

$$\alpha_{proj} = \alpha \cos(\beta)$$

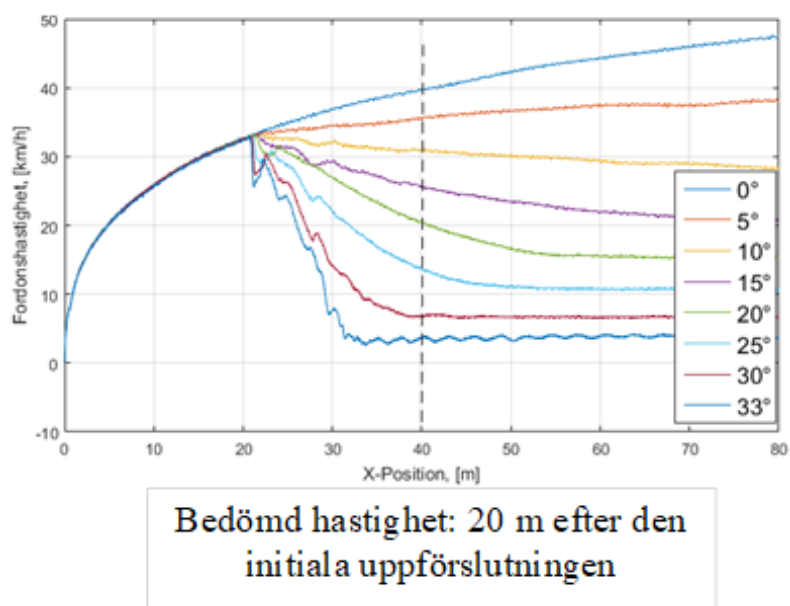
där α_{proj} är den projicerade lutningen, α är den ursprungliga lutningen och β är den riktning som lutningen projiceras på. Detta kan anses vara en normal hastighetsuppskattning.

Slutligen används en tredje typ av framkomlighetskarta för att visualisera hur många av ett antal förutbestämda riktningar som är farbara i respektive punkt. Detta är en riktningssuppskattning.

4 Resultat

I detta kapitel redovisas beräkningsresultat och tillvägagångssättet för att ta fram framkomlighetskartan beskrivs.

Syftet med beräkningarna är att tabellera fordons hastighet vid ökande longitudinell lutning (från 0° till 33°). Fordonet placeras 20 m före en lutning och accelereras med fullt gaspådrag. Bedömd hastighet, vilket är rörlighetsmättet i denna studie, definieras som hastigheten 20 meter efter påbörjad uppförslutning, se figur 10. Enligt vad som kan anses vara en rimlig förväntan så ger ökad branthet på uppförslutningen en lägre hastighet på fordonet. Resultaten visar också vanligtvis en viss oscillation i hastighet, vilket beror på att hjulet eller bandet slirar mot underlaget.



Figur 10. Definition av bedömd hastighet. Hastigheten beräknas 20 m efter den initiala uppförslutningen.

Avsnitt 4.1 till 4.3 redovisas beräkningsresultat för bandfordon och hjulfordon. Avsnitt 4.4 beskriver proceduren för att fram en framkomlighetskarta. Avsnitt 4.5 till 4.7 presenterar framkomlighetskartor för hjul- och bandfordon.

Tabell 8 presenterar simuleringsinställningarna som omfattar tidssteg, friktionskoefficient och rutnätsavstånd för deformierbar markmodell enligt figur 37.

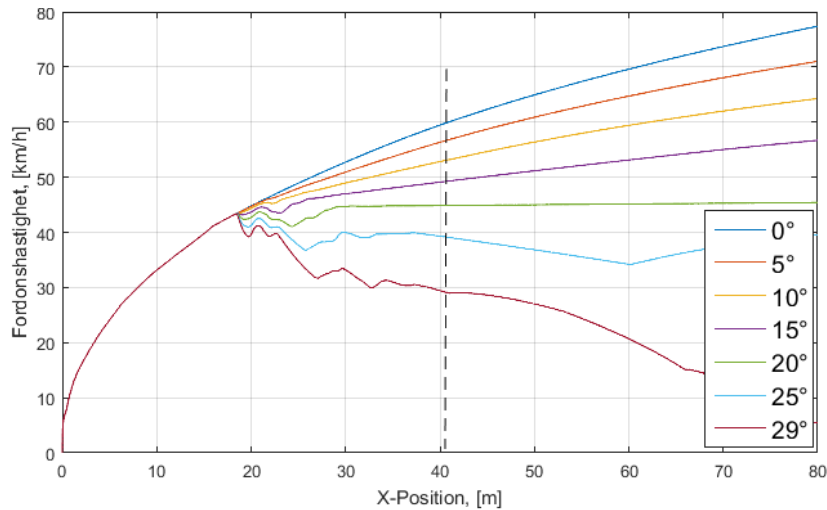
Tabell 8. Sammanfattning av simuleringsinställningar inklusive tidssteg, friktionskoefficient och rutnätsavstånd.

	Bandfordon fast mark	Bandfordon deformerbar mark	Hjulfordon fast mark	Hjulfordon deformerbar mark
Tidssteg, [s]	0,0005	0,0005	0,002	0,0008
Friktionskoefficient	0,9	--	0,9	--
Rutnätsavstånd, [m]	--	0,06	--	0,05

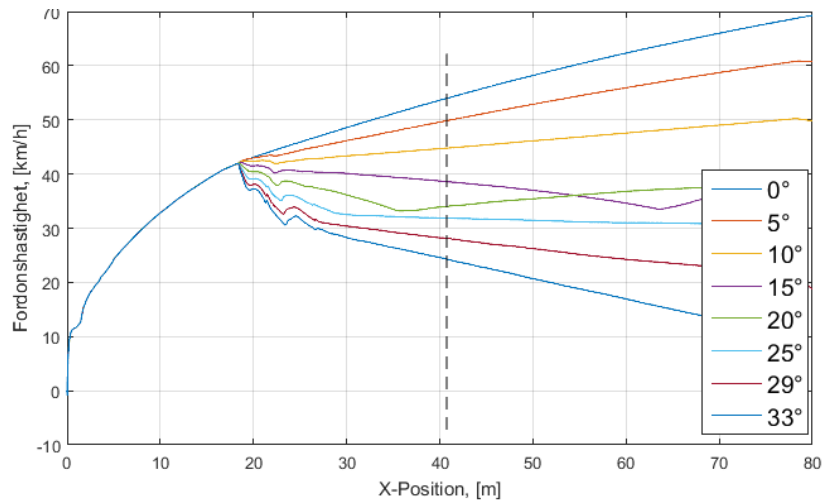
4.1 Beräkningsresultat för Humvee-baserade fordonsmodellen

Fordonshastighet som funktion av lutning visas i figur 11 till figur 13. Bedömd hastighet markeras med en streckad linje och sammanfattas i

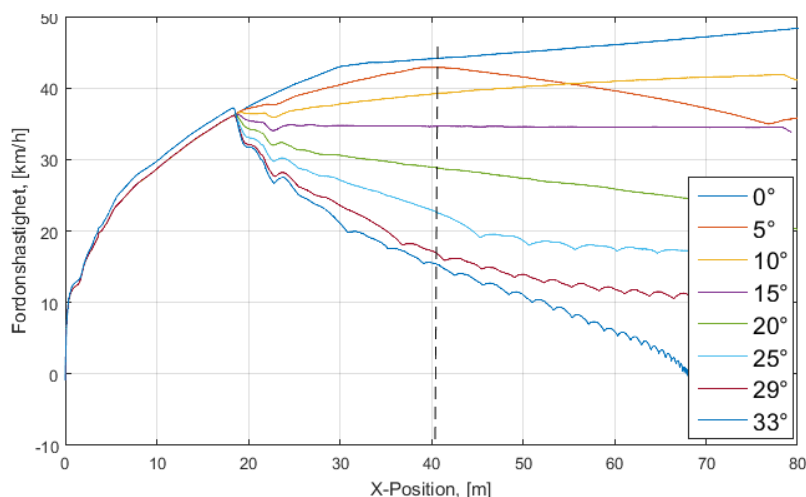
. Den fasta marken ger en överlag högre hastighet, men deformerbarheten i den finkorniga jorden medger en högre lutning. Skillnaden mellan torr och blöt finkornig jord är främst maximal hastighet.



Figur 11 Beräknad hastighet för fast mark.



Figur 12. Beräknad hastighet för torr finkornig jord.



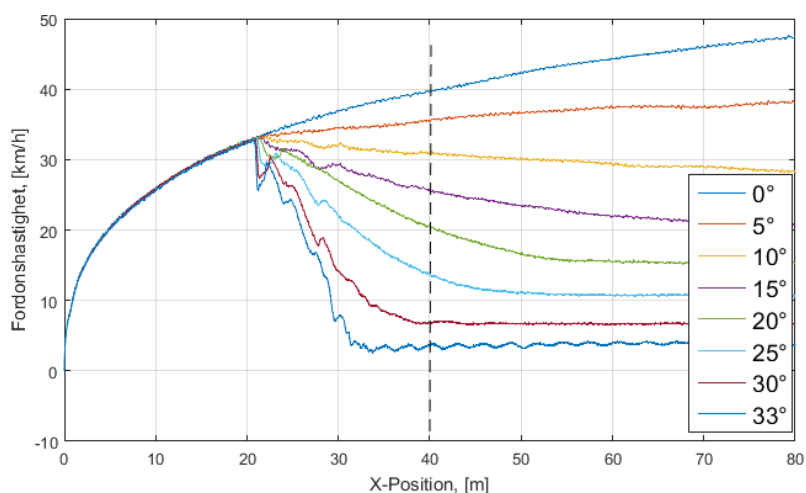
Figur 13. Beräknad hastighet för blöt finkornig jord.

Tabell 9. Bedömd hastighet i [km/h] 20 meter efter uppförlutningens start för olika lutningar och terrängar.

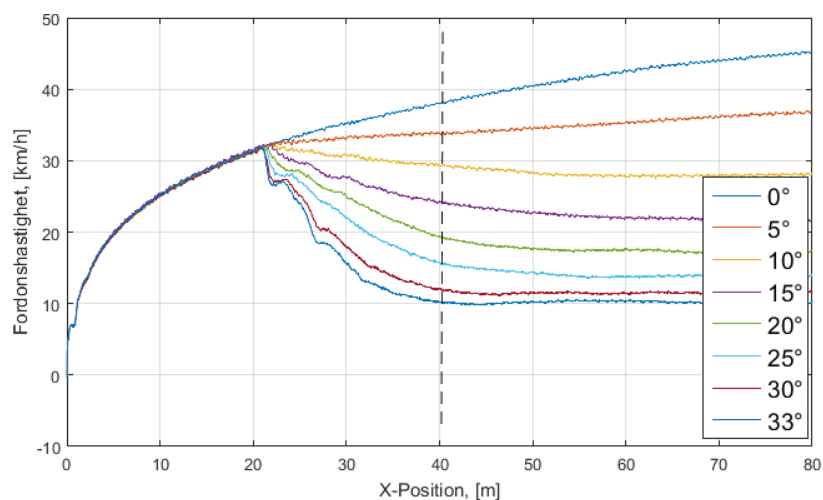
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	29°	33°
Fast mark	60	56	53	49	45	39	29	No-Go
Torr finkornig	54	50	45	39	33	32	28	24
Blött finkornig	44	43	39	35	29	23	17	16

4.2 Beräkningsresultat för Marder-baserade fordonsmodellen

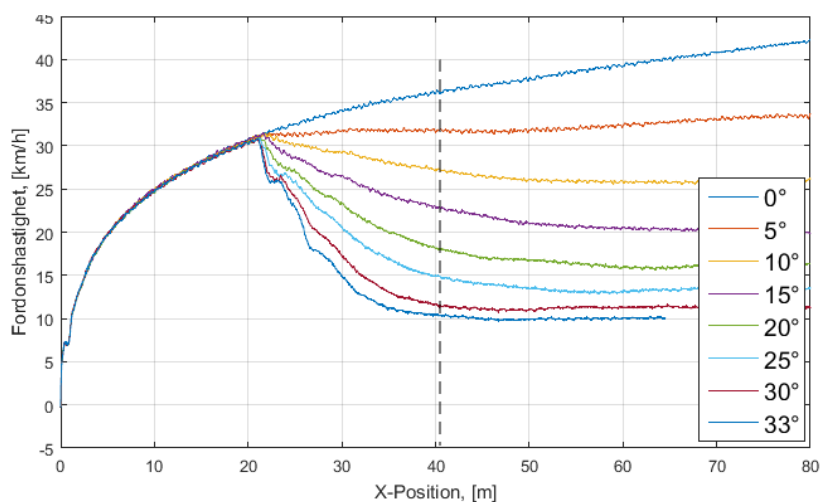
Fordonshastighet som funktion av lutning visas i figur 14 till figur 16. Bedömd hastighet markeras med en streckad linje och sammanfattas i tabell 11. Det bandförsedda fordonet Marder medger en högre hastighet vid högre lutningar i deformierbar terräng än i fast, men skillnaden i lägre lutningar och skillnaden mellan blöt och torr finkornig jord är inte lika markant.



Figur 14. Beräknad hastighet för fast mark.



Figur 15. Beräknad hastighet för torr finkornig jord.



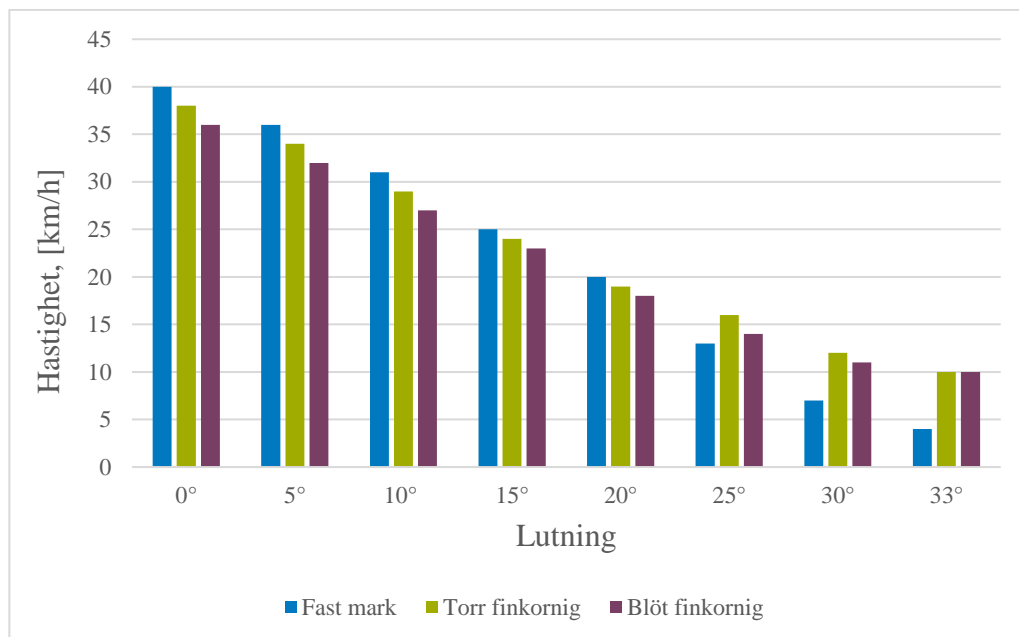
Figur 16. Beräknad hastighet för blöt finkornig jord.

Tabell 10. Bedömd hastighet i [km/h] för olika lutningar och terränger.

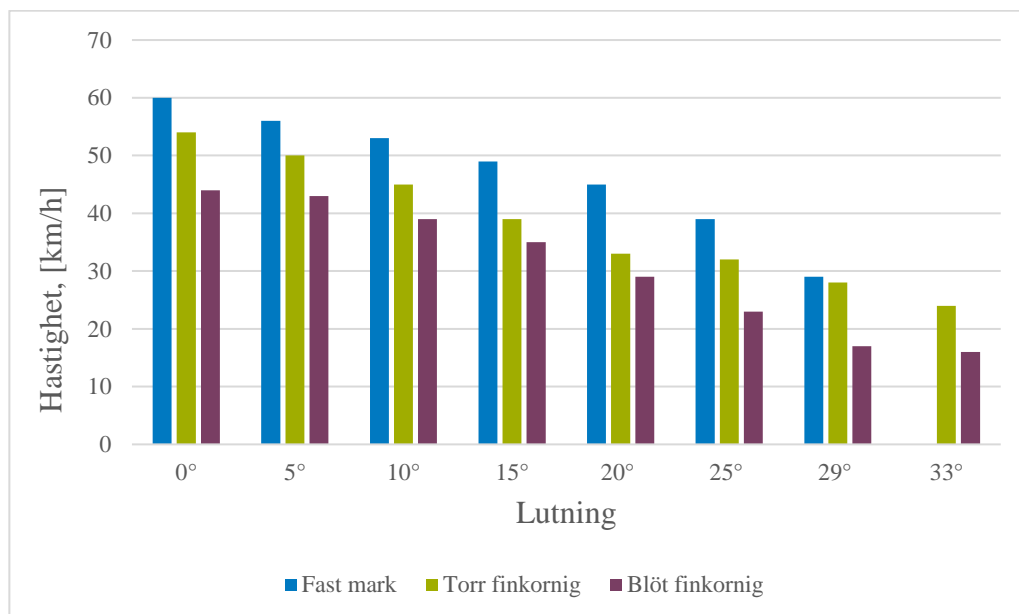
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	33°
Fast mark	40	36	31	25	20	13	7	4
Torr finkornig	38	34	29	24	19	16	12	10
Blöt finkornig	36	32	27	23	18	14	11	10

4.3 Diskussioner kring simuleringsresultaten

Den bedömda hastigheten efter 20 meters stigning för båda fordon i all tre terränger illustreras i figur 17 och figur 18.



Figur 17. Sammanställning av bedömd hastighet för bandfordon.



Figur 18. Sammanställning av bedömd hastighet för hjulfordon.

Några slutsatser kan dras från figur 17 och figur 18:

- Fordonshastigheten minskade med ökande lutningar, vilket var förväntat.
- Hastigheten minskar på torr och blöt finkornig jord jämfört med fast mark för hjulfordon men inte för bandfordon.
- Hjulfordons hastighet påverkas mer av olika terrägegenskaper jämfört med bandfordon som är mer robusta i sin rörlighet.

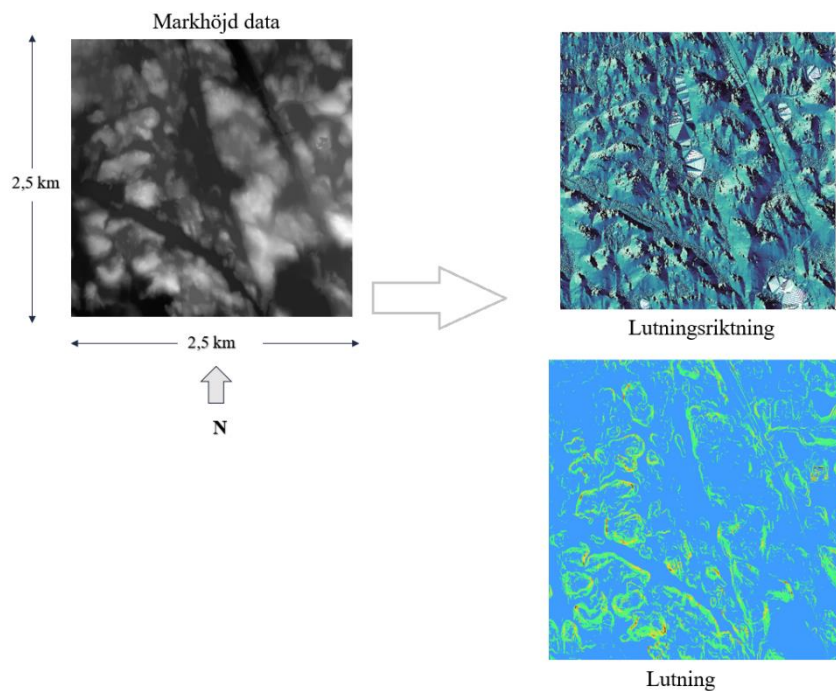
Dessa observationer bör dock inte tas som slutsatser eftersom själva modellen inte är validerad. Det kvarstår också ett antal öppna frågor angående fordonmodellering och

ingående data, som exempelvis modellering av gummikuddar i bandet eftersom detta kan ha en inverkan på fordonets hastighet och beteende på fast mark.

4.4 Höjddata från Kvarns övningsområde

I denna studie används uppmätta höjddata för en terrängyta som tillhör Kvarns övningsområde. Mätningarna har beställts av FOI. Höjddata i form av "Digital Elevation Map" med en upplösning om 2,5 m x 2,5 m visas i figur 19.

Exempel på terrängdata från ett landområde som omsatts till lutning och lutningsriktning visas i figur 19 och utförs med QGIS [12]. Dataattributen *lutning* och *lutningsriktning* exporteras sedan till en fil i CSV-format som bearbetas och visualiseras med hjälp av MATLAB se avsnitt 4.5.

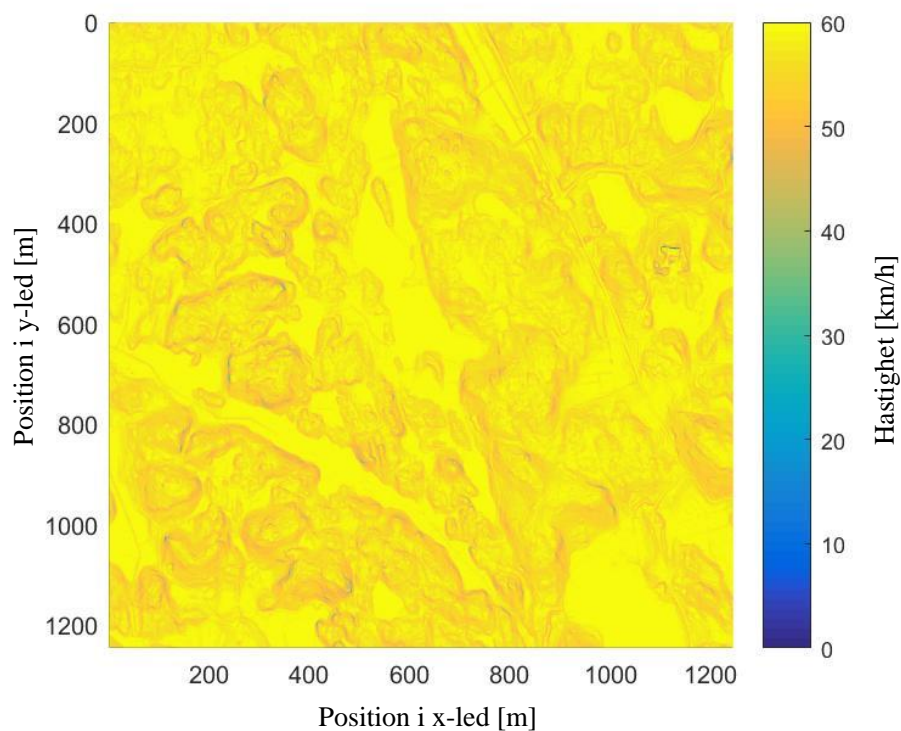


Figur 19. Metoden för att ta fram lutning och lutningsriktning med hjälp av mätt höjddata och QGIS.

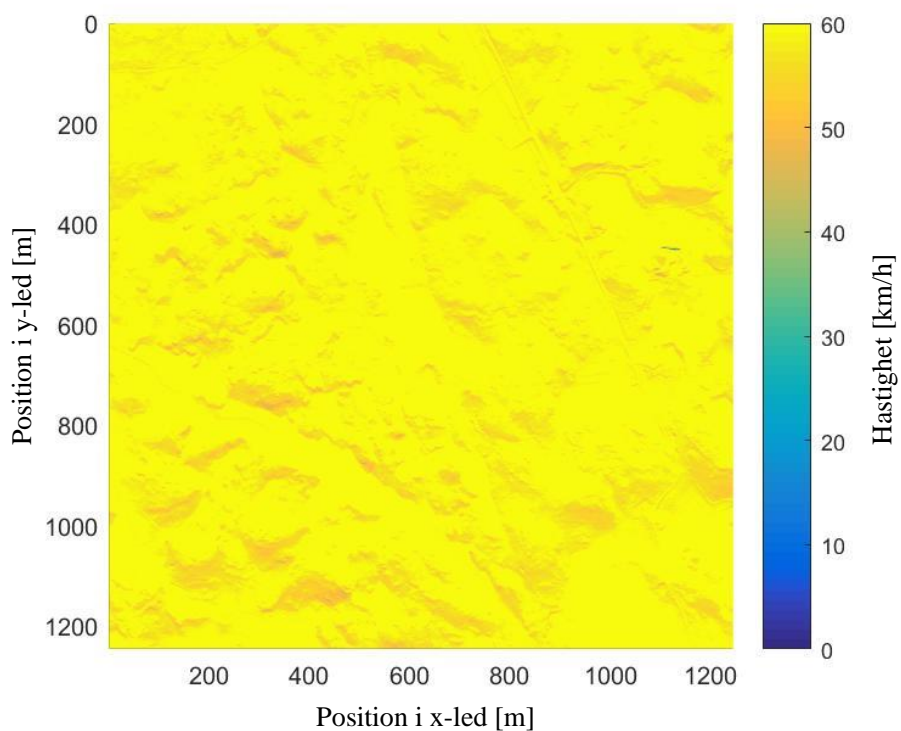
Det bör noteras att vissa plana ytor är till exempel sjöar vilka inte går att köra på förutsatt att de inte är frusna. I figur 19 visas en satellitbild över det studerade området där delar av de plana ytorna är sjöar, vilket bortses från i den beskrivna analysen.

4.5 Framkomlighetskarta för hjulfordonet HMMWV på Kvarns övningsområde

För den konservativa hastighetsbedömningen genereras kartan som visas i figur 20. Som ett resultat av den konservativa bedömningen visas fordonets minsta hastighet i respektive punkt, vilket ger en större begränsning i framkomlighet. Detta kan jämföras med kartan som visas i figur 21 där det antas att fordonet kör i nordlig riktning (uppåt på kartan). En jämförelse mellan kartorna visar tydliga skillnader i möjliga hastigheter där den konservativa bedömningen visar på begränsad framkomlighet inom flera områden jämfört med den nordliga riktningen.

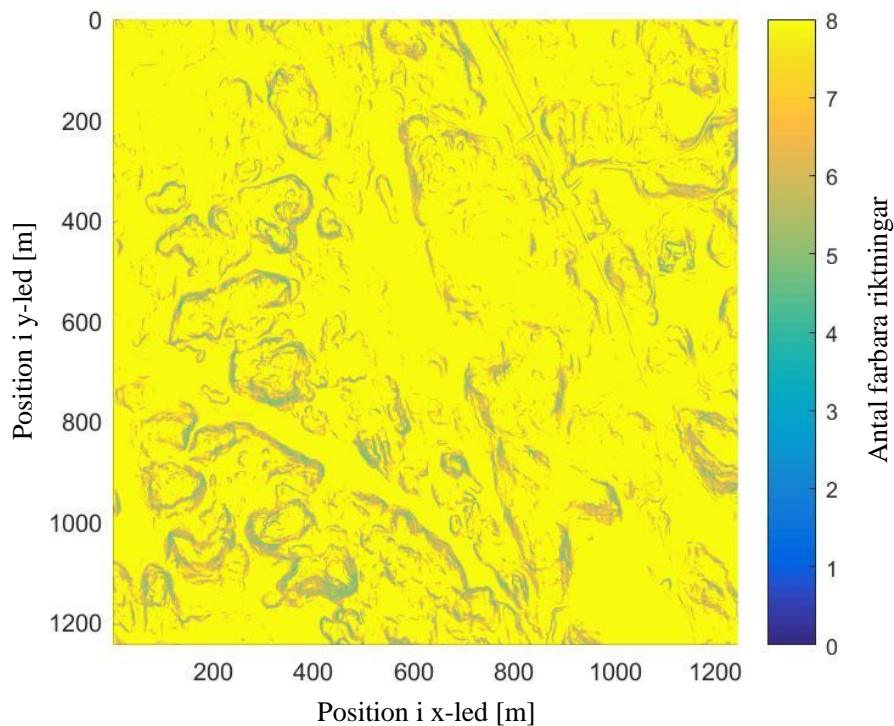


Figur 20: Framkomlighetskarta för hjulfordonsmodellen med en konservativ hastighetsbedömning på fast mark.



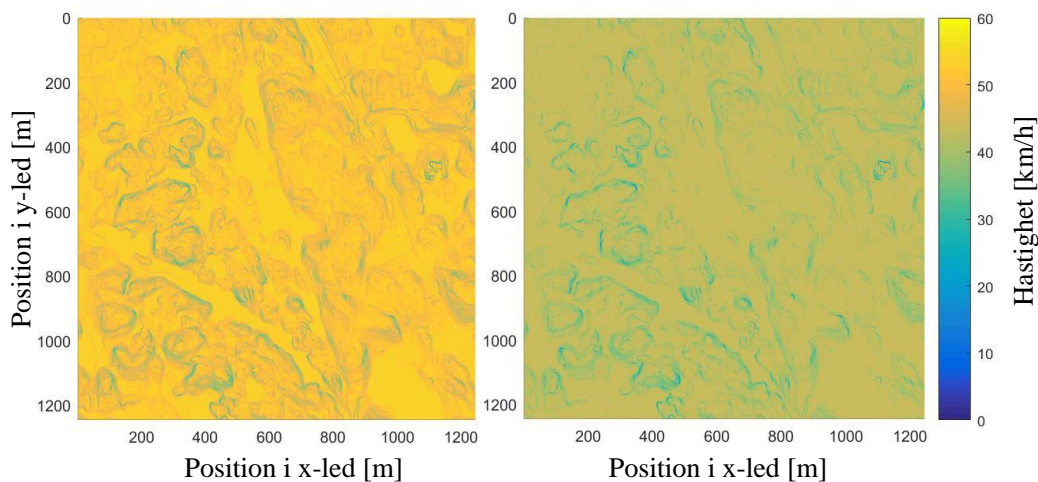
Figur 21: Framkomlighetskarta för hjulfordonsmodellen med en normal hastighetsuppskattning i nordlig riktning.

Figur 22 visar mängden riktningar (nord, nordöst, öst, sydöst, syd, sydväst, väst och nordväst) som är möjliga för ett fordon att passera med minst 55 km/h i respektive punkt.



Figur 22: Karta som beskriver hjulfordonsmodellens framkomlighet i en riktningssuppskattning med åtta jämnt fördelade passageriktningar för hastighetsgränsen 55 km/h.

Utifrån framkomlighetskartorna kan jämförelser göras mellan olika markegenskaper. I figur 23 visas framkomlighetskartorna för marktyperna "torr finkornig" sand respektive "blöt finkornig" för den konservativa hastighetsbedömningen.

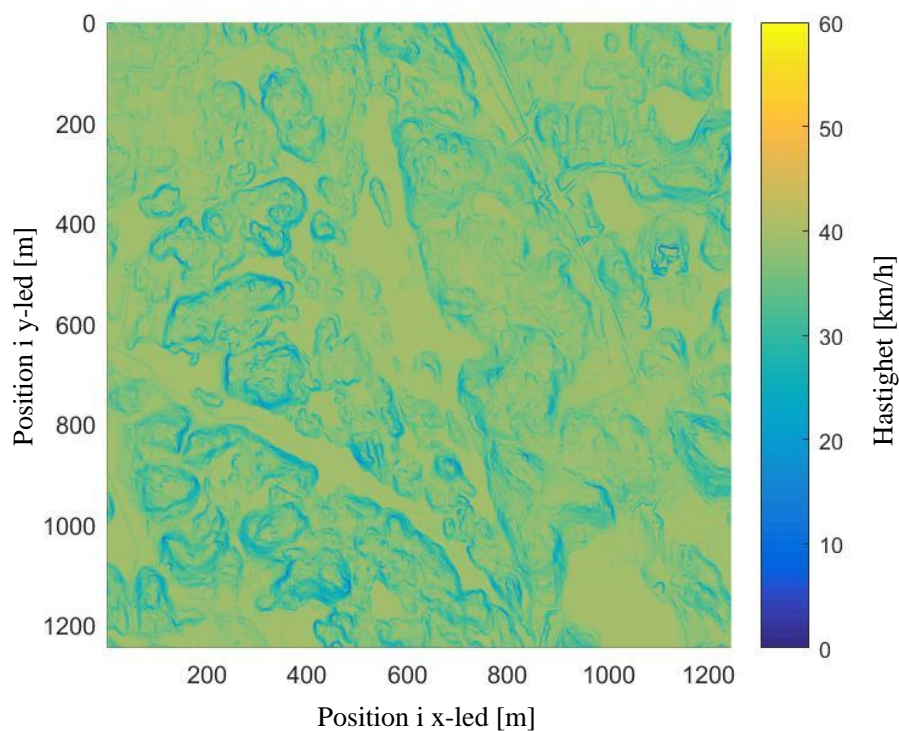


Figur 23: Till vänster visas den konservativa hastighetsbedömningen för marktypen "torr finkornig" och till höger "blöt finkornig".

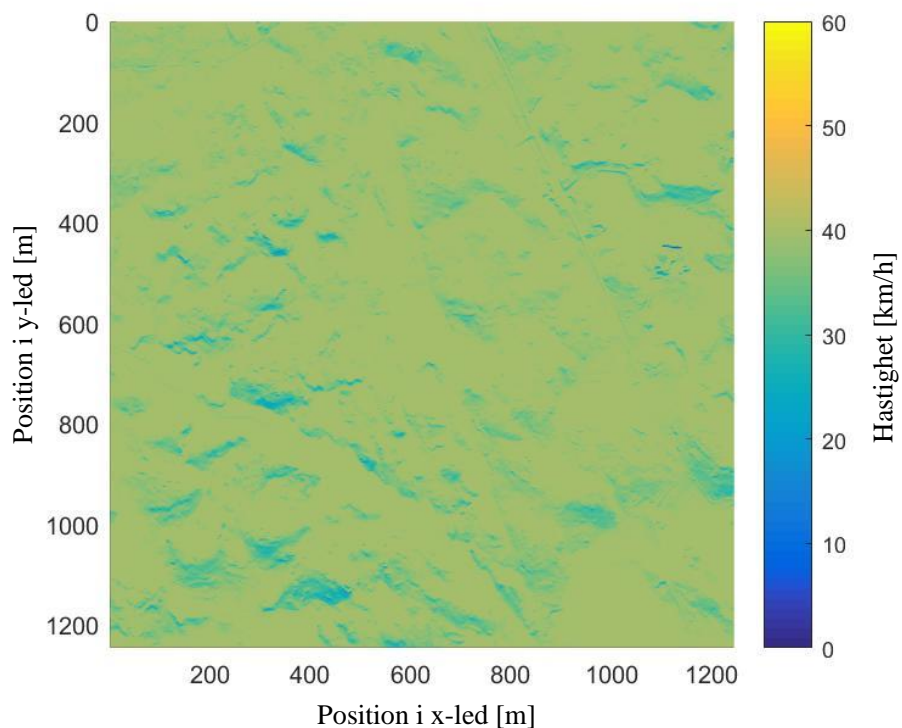
4.6 Framkomlighetskarta för bandfordonet Marder på Kvarns övningsområde

Analys av rörligheten hos det bandförsedda fordonet Marder görs utifrån likadant underlag. Den konservativa hastighetsbedömningen visas i figur 24. I figur 25 visas hastigheten när fordonet kör i nordlig riktning. En jämförelse mellan kartorna visar tydliga skillnader i

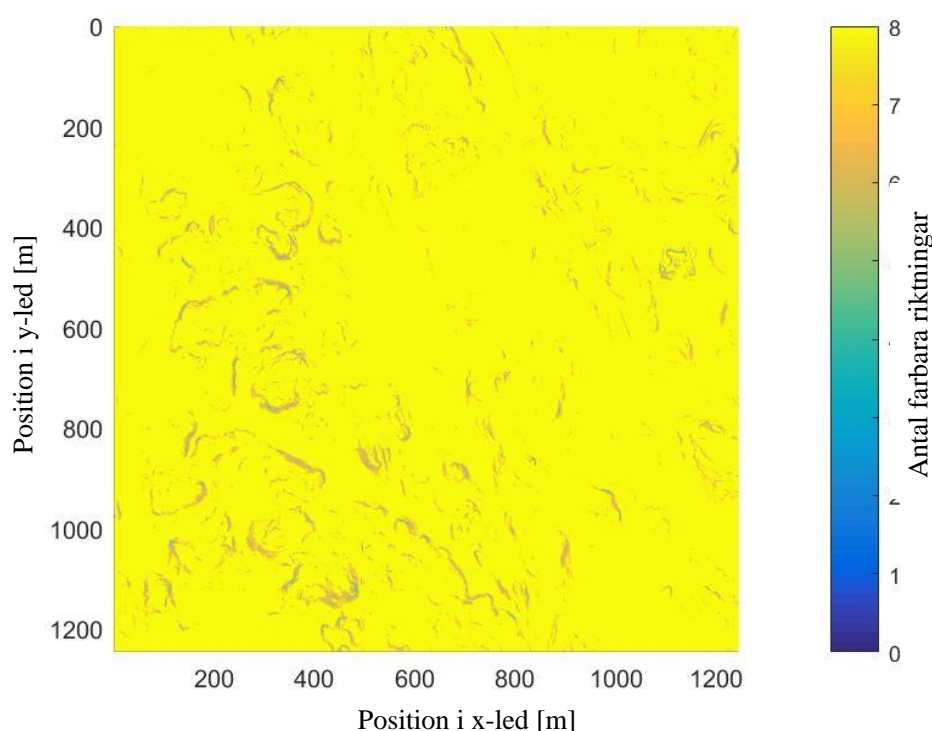
möjliga hastigheter, mest intressant är kanske genomslaget av bandfordonets högre robusthet i figur 26 jämfört med hjulfordonets i figur 22. Djupare analys av detta sker i 4.7.



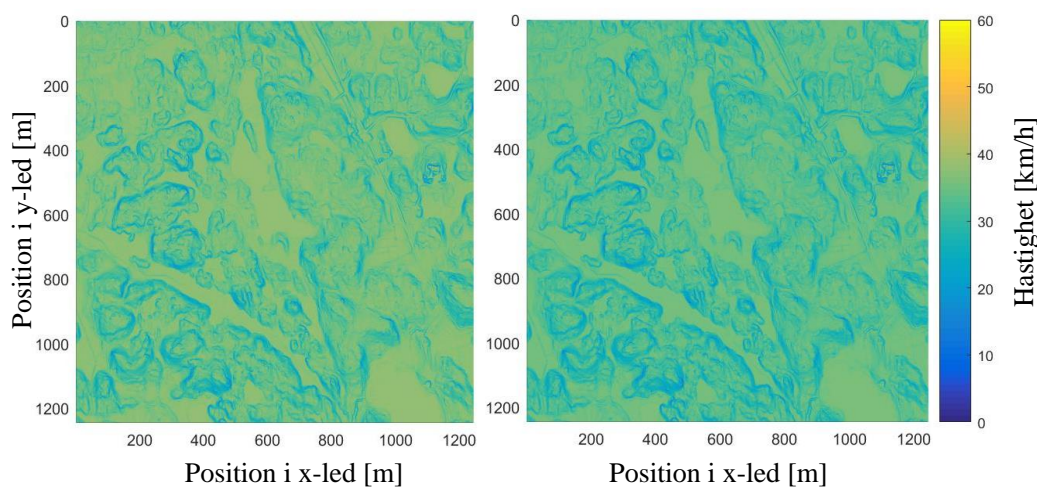
Figur 24: Framkomlighetskarta för bandgående fordon på fast mark med den konservativa hastighetsbedömningen.



Figur 25: Framkomlighetskarta med normal hastighetshastighetsuppskattning för bandfordon körandes i nordlig riktning på fast mark.



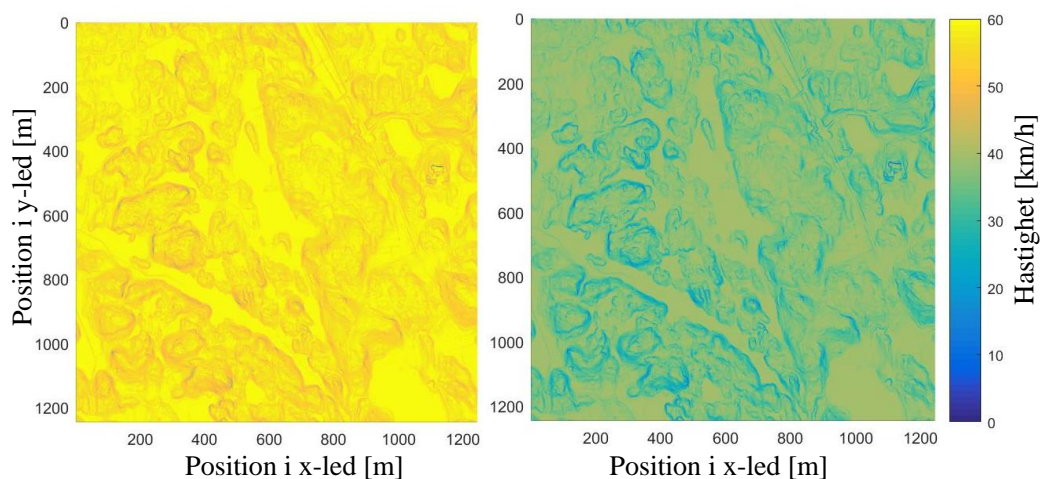
Figur 26: Karta som beskriver bandfordonsmodellens framkomlighet i en riktningssuppskattning för hastighetsgränsen 55 km/h.



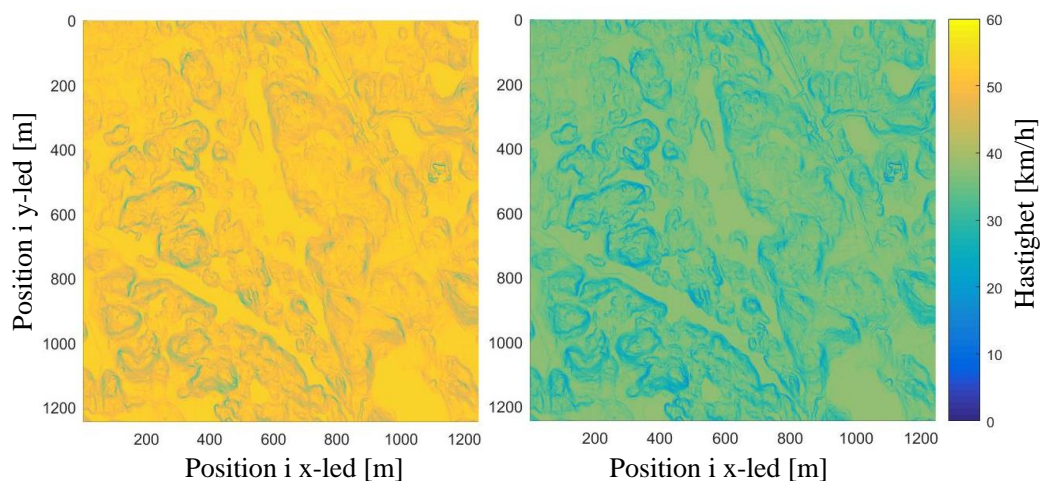
Figur 27: Till vänster visas den konservativa hastighetsbedömningen för marktypen "torr finkornig" och till höger "blöt finkornig"

4.7 Jämförelse mellan hjul- och bandfordon

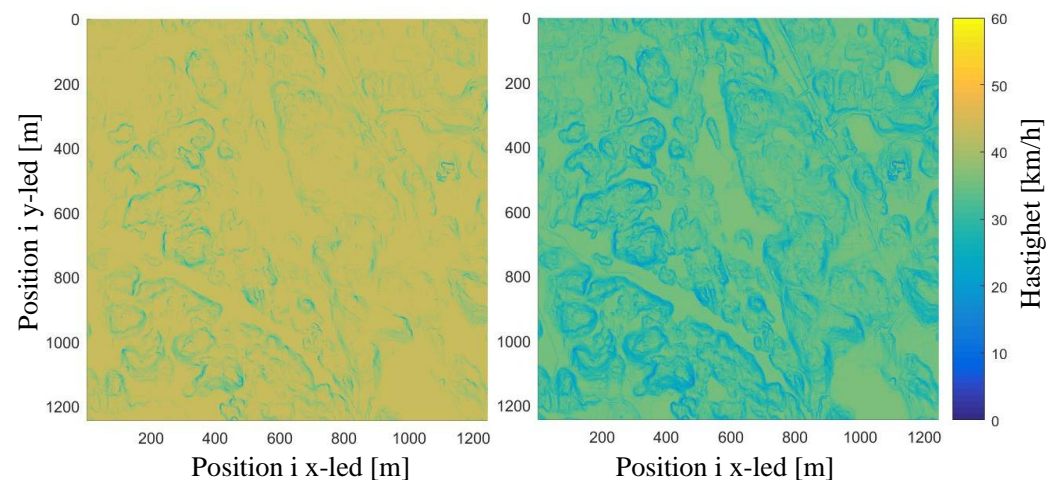
I detta kapitel jämförs rörligheten mellan band- och hjulfordon sida vid sida med hjälp av framkomlighetskartor. Rörligheten hos hjulfordonet är högre än det hos bandfordonet för de delar av kartan där framkomligheten är god, men det är tydligt att när framkomligheten minskar på grund av markförhållanden i terrängen så bibehåller bandfordonet sin hastighet bättre medan hjulfordonets hastighet minskar i större utsträckning. Ett sätt att tolka dessa resultat är att beskriva bandfordonet som mer robust i framkomlighet.



Figur 28: Till vänster visas framkomlighetskartan för hjulgående fordon på fast mark med den konservativa hastighetsbedömningen. Till höger visas motsvarande framkomlighetskarta för bandgående fordon.



Figur 29: Till vänster visas framkomlighetskartan för hjulgående fordon på marktypen "torr finkornig" med den konservativa hastighetsbedömningen. Till höger visas motsvarande framkomlighetskarta för bandgående fordon.



Figur 30: Till vänster visas framkomlighetskartan för hjulgående fordon på marktypen "blöt finkornig" med den konservativa hastighetsbedömningen. Till höger visas motsvarande framkomlighetskarta för bandgående fordon.

5 Diskussion och framtida arbete

Det finns ett flertal utmaningar med att värdera och visualisera fordons framkomlighet i form av framkomlighetskarter som kräver fortsatta studier. En central fråga är hur terrängsegmenteringen ska göras i tolkningen av fordonsprestanda. Problemet att generera framkomlighetskarter skiljer sig från det närliggande problemet att värdera en särskild rutt på grund av behovet av en mer allmän beskrivning av fordonets framkomlighet. Framkomlighetskarterna behöver till exempel inkludera effekten av att fordonets hastighet sannolikt minskar i en uppförsbacke. En minskad hastighet i ett terrängsegment kan därför medföra sämre framkomlighet i det efterföljande segmentet.

Vidareutveckling av modellen kan därför vara att inför analys av varje terrängsegment använda fordonets hastighet från föregående terrängsegment som indata. Detta innebär en väsentligt mer komplex uppslagstabell. Resultaten tar då även fordonets tröghetsmoment i beaktande, det vill säga att fordonet med fart kan traversera mindre uppförsbackar.

Även frågan hur fallet ska hanteras där fordonets olika hjul eller band befinner sig i olika terrängsegment, med olika typer av mark och med olika lutningar, behöver studeras då verklig terräng inte kan antas ha samma lutning och markförhållanden i stora ytor. Återigen är problemet annorlunda mot det fall där en rutt ska utvärderas eftersom analysen i det fallet kan göras med en anpassad terrängsegmentering som passar den utvalda ruten. En framkomlighetskarta behöver dock beskriva dynamiken mer generellt. I de fall där fordonet befinner sig mellan segment och angränsande segment har olika egenskaper behöver interaktionen hanteras.

I de presenterade framkomlighetskarterna studeras endast effekten av uppförsbackar. Även sidolutningar och utförsbackar kan begränsa ett fordons framkomlighet. Därför behöver begränsningar orsakade av andra lutningar än uppför studeras. För sido- och utförslutningar är dock inte nödvändigtvis hastigheten den faktorn som begränsar utan snarare begränsningar i kontrollerbarheten av fordonet. För sidolutningar rör det sig om risken för att fordonet lägger sig på sida eller tak medan det för utförsbackar begränsas av kontrollerbarheten utifrån slirande däck. Om fordonet i en utförsbacke genom att bromsa försöker hålla en bestämd hastighet men på grund av slirande däck misslyckas kan framkomligheten anses vara begränsad.

Utöver markens lutning finns ett flertal ytterligare parametrar som är viktiga för att beskriva ett fordons framkomlighet. Till exempel övriga markegenskaper (bärighet, att kletig mark sätter sig i däcksmönstret eller bandplattor och liknande) och mindre hinder som inte beskrivs av GIS-underlaget. En framtida modell bör även inkludera effekter från dessa parametrar för att ge en heltäckande framkomlighetskarta.

Underlag för markförhållanden från bland annat Statens geotekniska institut, kanske i kombination med underlag kring fuktighet och nederbörd från SMHI, skulle kunna användas för att ge mer träffsäkra markmodeller. För detta behövs en översättning av markklassificeringen och fuktigheten till en meningsfull parametrering i markmodellerna vilket inte finns idag.

Metoder för att hantera brister i GIS-data bör även undersökas. Oavsett om det är brister i form av lågupplösta underlag eller avsaknad av data över vissa områden behöver modellens robusthet studeras för att undersöka hur känslig modellen är för osäkerheter i terrängdata.

Slutligen bör metoder för värdering av fordon utifrån framkomlighetskarter studeras djupare. Utifrån framkomlighetskarter kan flera analyser göras, till exempel hur stor andel av området som kan passeras med en viss hastighet eller hur många möjliga rutter det finns mellan två punkter utifrån begränsningar i framkomlighet. Värderingsfrågor och värderingsmått bör studeras vidare.

6 Referenser

- [1] N. Bruzelius, "Lärobok i Militärteknik, vol. 5: Farkostteknik," Försvarshögskolan, Stockholm, 2010.
- [2] J. Y. Wong, *Theory of Ground Vehicles*, New York: Wiley, 2008.
- [3] 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.
- [4] P. W. Haley, "NATO Reference Mobility Model Volume I & II," Stevens Institute of Technology, Davidson Laboratory, Hoboken, 1979.
- [5] K. Fridstrand, "Framkomligheten i övre Norrland -Utveckling och utvärdering av framkomlighetsmodell," FOAC208192.6, Försvarets Forskningsanstalt, FOA, Sundbyberg, 1990.
- [6] J. Wong, *Terramechanics and Off-Road Vehicles*, Ontario, Kanada: Elsevier Science Publishers B.V., 1989.
- [7] J. Dasch, "Next-Generation NATO Reference Mobility Model (NG-NRMM) Development," NATO, Warren, 2020.
- [8] Nato - Allied Modelling and Simulation Publication, "AMSP-06 GUIDANCE FOR STANDARDS APPLICABLE TO THE DEVELOPMENT OF NEXT GENERATION NATO REFERENCE MOBILITY MODELS," Nato Standardization Office (NSO), 2021.
- [9] University of Wisconsin-Madison, "https://projectchrono.org/," [Online].
- [10] R. AG, "Rheinmetall," Rheinmetall AG, [Online]. Available: <https://www.rheinmetall.com/en/products/tracked-vehicles/tracked-armoured-vehicles/infantry-fighting-vehicle-marder>.
- [11] A. Tasora, A. Pazouki, S. R. och D. Melanz, "Chrono: An open source multi-physics dynamics engine," i *Lecture Notes in Computer Science*, 2016.
- [12] Q. D. Team, "QGIS," [Online]. Available: <https://www.qgis.org/>.
- [13] A. A. Rula och C. J. Nuttall, Jr., "AN ANALYSIS OF GROUND MOBILITY MODELS (ANAMOB)," Weapon Systems Analysis Directorate, Washington, D.C, 1971.
- [14] G. Mason, "Test Procedures for the Determination of One-Pass Vehicle Cone Index (VCI)," i *Proceedings of the 13th ISTVS European Conference*, Rome, 2015.
- [15] J. Wong, P. Jayakumar, E. Toma och J. Preston-Thomas, "A review of mobility metrics for next generation vehicle mobility," *Journal of Terramechanics*, vol. 87, p. 11–20, 2020.
- [16] T. T. Vong, G. A. Haas och C. L. Henry, "NATO Reference Mobility Model (NRMM) Modeling of the DEMO III Experimental Unmanned- Ground Vehicle (XUV)," Army Research Laboratory, 1999.

- [17] J. Wong, J. P., TomaE. och J. Preston-Thomas, "Comparison of simulation models NRMM and NTVPM for assessing military tracked vehicle cross-country performance," *Journal of Terramechanics*, vol. 80, pp. 31-48, 2018.
- [18] R. He, C. Sandu, A. K. Khan, A. G. Guthrie, P. S. Els och H. A. Hamersma, "Review of Terramechanics Models and Their Applicability to Real-Time Applications," *Journal of Terramechanics*, vol. 81, pp. 3-22, 2019.
- [19] Z. Jia, W. Smith och H. Peng, "Terramechanics-based wheel-terrain interaction model and its applications to off-road wheeled mobile robots," *Robotica*, vol. 30, pp. 491-503, 2012.
- [20] L. Ding, K. Nagatani, K. Sato, A. Mora, K. Yoshida, H. Gao och Z. Deng, "Terramechanics-based High-Fidelity Dynamics Simulation for Wheeled Mobile Robot on Deformable Rough Terrain," i *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Anchorage, 2010.
- [21] J. D. Priddy och W. E. Willoughby, "Clarification of vehicle cone index with reference to mean maximum pressure," *Journal of Terramechanics*, vol. 43, pp. 85-96, 2006.
- [22] P. W. Haley och P. M. Jurkat, "NATO Reference Mobility Model, Edition 1 Users Guide Volume 1," US Army Tank-Automotive Research and Development Command, 1979.
- [23] P. W. Haley, P. M. Jurkat och P. M. Brady, "NATO Reference Mobility Model, Edition 1 Users Guide Volume 2," US Army Tank-Automotive Research & Development Command, 1979.
- [24] P. W. Richmond, S. A. Shoop och G. L. Blaisdell, "Cold Regions Mobility Model," 1995.
- [25] R. Jones, D. Horner, P. Sullivan och R. Ahlvin, "A methodology for quantitatively assessing vehicular rutting on terrains," *Journal of Terramechanics*, vol. 42, pp. 245-257, 2005.
- [26] M. G. Bekker, "Mechanics of Off-The-Road Locomotion," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Automobile Division*, vol. 16, nr 1, 1962.
- [27] M. Apfelbeck, S. Ku, A. Wedler, A. Gibbesch, B. Rebele och B. Schäfer, "A Novel Terramechanics Testbed Setup for Planetary Rover Wheel-Soil Interaction," i *11th European Regional Conference of the International Society for Terrain Vehicle Systems*, Bremen, 2009.
- [28] G. Meirion-Griffith och M. Spenko, "Simulation and Experimental Validation of a Modified Terramechanics Model for Small-Wheeled Vehicles," *International Journal of Vehicle Design*, 2014.
- [29] A. Nicolini, F. Mocera och A. Somà, "Multibody simulation of a tracked vehicle with deformable ground contact model," *Journal of Multibody Dynamics*, vol. 233, pp. 152-162, 2019.
- [30] A. R. Reece, "Principles of Soil-Vehicle Mechanics," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Automobile Division*, vol. 180, nr 1, 1965.
- [31] M. Tigidemir, M. Jafarzadyeganeh, M. C. Bayrak och M. Avcar, "Numerical Modelling of Wheel on the Snow," *International Journal of Engineering & Applied Sciences*, vol. 10, pp. 64-72, 2018.

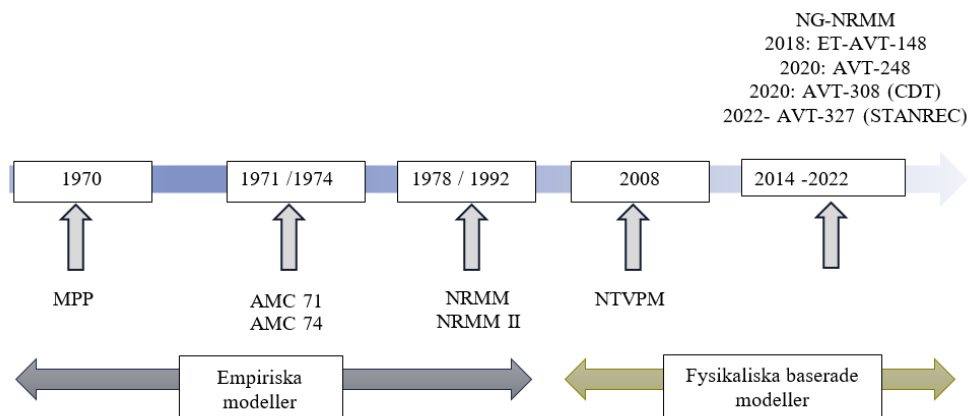
- [32] W. Smith och H. Peng, "Modeling of wheel-soil interaction over rough terrain using the discrete element method," *Journal of Terramechanics*, vol. 50, pp. 277-287, 2013.
- [33] M. Letherwood, P. Jayakumar, R. Gerth och J. Dasch, "Cooperative Demonstration of Technology (CDT) for Next-Generation NATO Reference Mobility Model (NG-NRMM)," NATO, 2020.
- [34] E. Pesheck, V. Jeganathan, T. Bromwell, A. Matange och P. R. Naidu, "MSC Software Final Report," MSC Software Corporation, 2020.
- [35] CM-Labs Simulations Inc, "CM LABS AVT-248 NG-NRMM Final Report," CM-Labs Simulations Inc, 2020.
- [36] Vehicle Systems Development Corporation, "Simulations of Wheeled Vehicle Performance by NWVPM (Phase 1)," Vehicle Systems Development Corporation, 2020.
- [37] O. Balling och M. Rydahl-Haastrup, "CDT FED Alpha Simulation Using ROAMS," Aarhus University, 2020.
- [38] T. M. Wasfy och H. M. Wasfy, "NG-NRMM Simulation Model Development and Analysis of the FED Alpha Vehicle Final Project Report," Advanced Science and Automation Corp, 2020.
- [39] A. Tasora, D. Mangoni och D. Negrut, "An Overview of the Chrono Soil Contact Model (SCM) Implementation," 2018.
- [40] G. Hirzinger och R. Krenn, "A soil contact model for Multi-body system simulations," 11th European Regional Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems, 2009.
- [41] P. D. G. Rill, "TMeasy Tire Model easy to use," [Online]. Available: <https://www.tmeasy.de/>.

7 Appendix A - Genomgång av rörlighetsmodeller

Stridsfordon ska kunna fungera i en extrem terrängmiljö som inkluderar snö, is, hård och blöt lera och sand samt kunna klara olika marktopografi. Därför är det viktigt att kunna bedöma och jämföra fordons rörlighetsprestanda.

Följande mått används för att beskriva fordons prestanda på mark: dragkraft ("draw-bar pull"), slirning av däck vid drag, rörelsemotstånd och "speed-made-good".

Historisk utveckling av fordonsrörlighetsmodeller visas i figur 31.



Figur 31. Historisk utveckling av fordonsrörlighetsmodeller: 70- och 90-talets modeller är baserade på empiriska metoder medan NTVPM och NG-NRMM är fysikaliskt baserade modeller.

7.1 Army Material Command (AMC) rörlighetsmodell

Modellen bygger på en empirisk metod som utvecklades av U.S Army Engineer Waterways Experiment (WES). WES testade en rad militärfordon i olika terräng och mätte marksättningen med hjälp av marktätetsmätare "Cone penetrometer". Metoden kallas för "Vehicle cone index" (VCI).

Ett mobilitetsindex som är baserat på empiriska ekvationer beräknas sedan. Empiriska ekvationer härleds från mätningarna, [13] och [14].

7.2 Mean Maximum Pressure (MMP)

MMP är en empiriskt baserad modell som utvecklades i Storbritannien för att bedöma fordons rörlighet. MMP definieras som medelvärdet av maximalt tryck som inträffar under hjul eller band. MMP föreslogs först som en indikator för bandfordons rörlighet. Senare utvidgades MMP-konceptet för att utvärdera rörligheten hos militära hjulfordon [15].

7.3 Nato reference mobility model (NRMM / NRMM II)

NRMM är ett beräkningsverktyg som syftar till att förutsäga fordonets rörlighetsprestanda genom att beräkna den maximala hastigheten i en terräng.

Med hjälp av simuleringar kan verktyget bedöma fordons rörlighet på alla typ av mark. NRMM använder WES metod och VCI ekvationer för att ta fram framkomlighetskarter [16].

7.4 Nepean Tracked Vehicle Performance Model (NTVPM)

NTVPM är en fysikaliskt baserad metod som är tillämpad för att förutsäga bandfordonsrörlighet på mark och snö. I NTVPM används Bekker-Wong:s semi-empiriska ekvation för att kunna modellera interaktionen med marken.

Fordonsmodellen inkluderar modeller för bandaggregat och deras respektive egenskaper som vikt och tröghet. Bandplattorna modelleras som ett flexibelt bälte [17].

7.5 New generation Nato reference mobility model (NG-NRMM)

NG-NRMM metod beskrivs i 2.3.

7.6 Sammanfattning

I Tabell 11 jämförs olika rörlighetsmodeller och sammanfattar metoder som används för fordonsmodellering och fordon-mark interaktion.

Tabell 11. Jämförelse mellan rörlighetsmodeller.

Rörlighetsmodell	Fordonsmodellering	Terramekanik modell	Rörlighetsmått
AMC / NRMM	Enkel modell som ta hänsyn om fordonet vikt, längd och bredd.	Empirisk modell från WES baserad på VCI.	Go/No-Go karta
NTVPM	Fysikalisk baserad 2D-bandfordonsmodell	Semi-empirisk Bekker-Wong	Go/No-Go karta, rörelsemotstånd, dragkraft, m.m.
NG-NRMM	3D validerad och verifierad modell Band- och hjulfordon	Semi-empirisk och avancerade DEM modeller	Go/No-Go karta, speed-made-good, bränsleförbrukning, m.m.

8 Appendix B - Genomgång av terrängmodeller

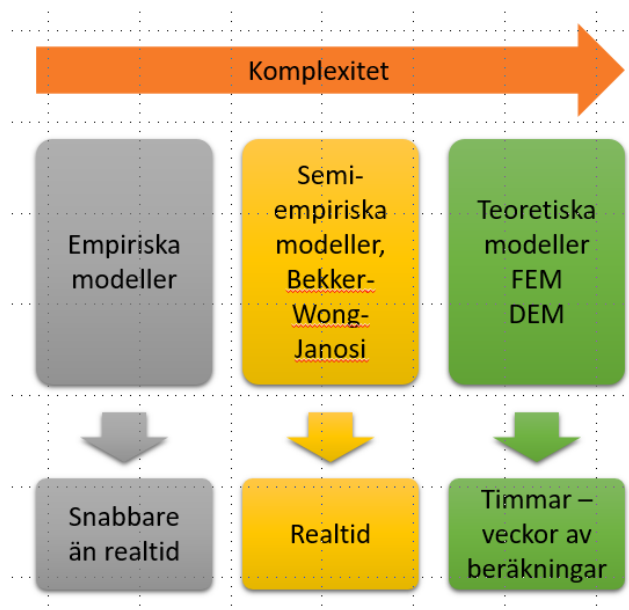
För att beskriva interaktionen mellan ett fordon och marken är det nödvändigt att modellera marken och dess egenskaper. Geologiska, topografiska och hydrologiska förhållanden utgör markegenskaper som beror på om det är berg, sand, lera, snö eller något annat underlag samt hur fuktig marken är. Andra faktorer som till exempel lutning och hinder (träd, buskar och stenar) är också relevanta för att beskriva markegenskaperna. I litteraturen beskrivs markegenskaperna och effekterna av hur ett fordon påverkar marken samlat i begreppet *terramekanik*.

En översikt av olika typer av terrängmodeller beskrivs i [18] där modellerna delas upp i:

- Teoretiska modeller, som härleds från mekanikteori. Experimentella data används för att validera modeller, se 8.1.
- Empiriska modeller som är baserade på experiment och prov se 8.2.
- Semi-empiriska modeller som är en kombination av teori och prov se 8.3.

De teoretiska modellerna kan i sin tur vara rent analytiska, alternativt baserade på finita elementmetoden (FEM) eller diskreta elementmetoden (DEM), se 8.3.1. I fortsättningen används uttrycket *teoretiska modeller* för att beskriva de rent analytiska modellerna som härleds utifrån matematiska och fysikaliska samband och FEM/DEM för att beskriva de metoder som härleds numeriskt.

En översikt över markmodeller med olika upplösningssnivå visas i figur 32. Likheten till verkligheten ökar med modellens upplösningssnivå men beräkningarna kommer att ta längre tid och behovet av snabbare datorer kommer att öka.



Figur 32. En översikt över markmodeller med olika upplösningssnivå. Markmodeller med hög upplösningssnivå visar ökad trohet och beräkningstid. Beräkningar blir därmed ineffektiva.

8.1 Teoretiska modeller

Teoretiska modeller använder samband inom mekanik och fysik för att modellera interaktionen mellan mark och fordon. Fördelar med detta är att det går att beskriva interaktionen utifrån grundläggande antaganden vilket möjliggör en mer generell användning av metoden då den inte är begränsad av enskilda experiment. Metoden möjliggör också full kontroll över resultaten och modelleringsprocessen kan analyseras på

detaljnivå. En nackdel är att det krävs avancerade beräkningar för att få tillförlitliga resultat och att det, beroende på marktyp, kan vara svårt att beskriva marken med fysikaliska samband på tillräcklig detaljnivå. Det gör att teoretiska modeller kan ge väldigt exakta svar samtidigt som det kan vara svårt och tidskrävande att härleda dem. Teoretiska metoder kan därför vara bra för att få en förståelse för marktyper på en detaljerad nivå. De behöver dock kombineras med bra valideringsmetoder för att säkerställa tillförlitliga resultat. Exempel på dessa modeller är [19, 20].

Några exempel på teoretiska markmodeller enligt [18]:

- Boussinesq modell som används för att beräkna spänning på marken som orsakas av en belastning.
- Terzaghi modell som beräknar markbärighet.

8.2 Empiriska modeller

Det finns ett flertal studier som utifrån mätningar tagit fram erfarenhetsbaserade (empiriska) matematiska samband som beskriver olika fordons rörlighet. Fördelar med dessa metoder är att sambanden ofta är relativt enkla och att de i grunden bygger på uppmätta fordonsdata. Metoderna behöver inte nödvändigtvis information om marken för att utveckla sambanden utan bygger på tester med respektive fordon. Svårigheten är att det kan krävas omfattande tester för respektive fordonstyp för att kunna göra en grundlig bedömning av dess framkomlighet i olika typer av terräng. Detta kräver tillgång till fordonet i fråga samt möjlighet att testa på de marktyper, med skilda lutningar och variation av andra faktorer, som anses intressanta. Det kan även vara svårt att använda modellerna för utveckling av nya fordonskoncept då osäkerheten ökar när resultat från kända fordon extrapoleras för prediktiv modellering och simulering av okända fordon, exempelvis fordon i designstadiet. Empiriska metoder kan därför vara bra för jämförelse mot resultat från andra metoder men bör inte användas som enda metod för att utvärdera fordon eller för konceptutveckling av nya fordon.

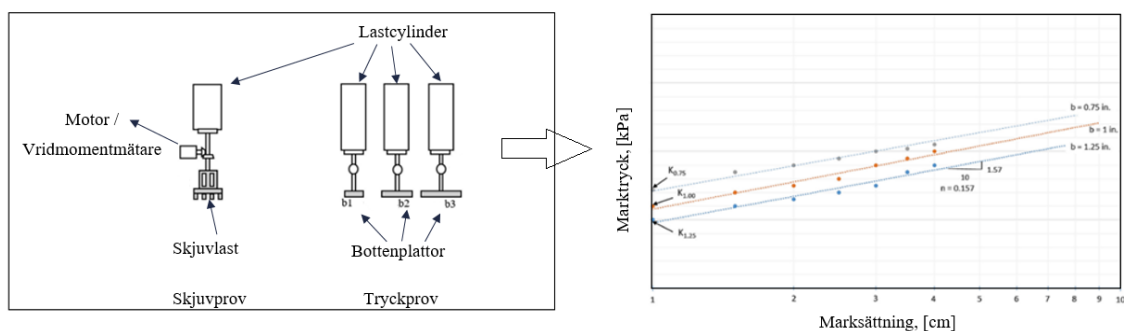
Exempel på empiriska modeller är:

- VCI ("Vehicle cone index") modell som utvecklades av "US Army Corps of Engineers Waterways Experiment station (WES)". WES testade och provade en rad terrängfordon på oorganiska fin- och grovkorniga jordar [21]. Fordonsrörlighetsparametrar som fordonsrörelsemotstånd och dragkraft beräknades med hjälp av empiriska ekvationer härledda från mätningarna.
- Nato rörlighetsmodell NRMM [22, 23] där VCI metod används också.
- MMP ("Mean maximum pressure) modell som utvecklades under och efter andra världskriget för att undersöka bandfordonsrörlighet [17].
- Modeller i [24, 25].

8.3 Semi-empiriska modeller

Ett alternativ till empiriska modeller är att göra mätningar för att bestämma markparametrar istället för att definiera samband som beskriver ett specifikt fordon. Dessa parametrar kan sedan användas för att beskriva marken och utifrån det bedöma hur ett fordon påverkas. Jämfört med empiriska metoder är resultaten inte fordonsberoende utan kan användas för att beskriva framkomligheten för flera typer av fordon. Istället för fordon som mätplattformar används i semi-empiriska modeller ofta specifika markprober.

Den mest kända är Bekkers metod som lade grunden för modern terramekanik under mitten av 1900-talet [26]. Bekker utvecklade en empirisk modell som utifrån experimentella mätningar beskriver fordonets interaktion med marken där det mest kända sambandet är förhållandet mellan tryck och deformation [27]. Bekkers modell baseras på tryck- och skjuvprov som utförs med hjälp av en bevameter som visas i figur 33. Markparametrar från bevametermätningar beskrivs i Appendix D.



Figur 33. Bevameter som används för att mäta skjuvmotstånd och tryck eller bärighet på marken. Bekkers metod använder mätdata för att beskriva relationen mellan tryck och marksättning.

Resultaten från semi-empiriska metoder är mer generella än empiriska metoder men kräver tillgång till rätt markparametrar. Semi-empiriska modeller innehåller fler steg än empiriska metoder eftersom både markegenskaper och dess korrelation med fordons framkomlighet behöver bestämmas men ger samtidigt ett mer användbart resultat då det är lättare att använda en framtagen modell för att beskriva andra typer av fordon. Exempel på semi-empiriska modeller är [28, 29].

En vidareutveckling av Bekkers arbete gjordes av Reece genom att ta hänsyn till markens kompressibilitet och därmed vidareutvecklade sambandet mellan tryck och deformation [30]. En annan utveckling av Bekkers arbete gjordes av Wong som utifrån Bekkers metod beskriver deformationen av marken från ett hjul [2].

8.3.1 FEM- och DEM-modeller

Finita och diskreta elementmetoder utgår från en detaljerad mekanisk beskrivning av kontaktytan mellan marken och fordonet. Detta möjliggör en noggrann modellering av fordonets interaktion med marken men kräver en större beräkningskraft än övriga metoder.

FEM-modelleringen baseras på beräkningar av spänningar mellan olika marksegment. Detta medger en noggrann beskrivning av påfrestningarna på marken och motståndet för fordonet. Det försvårar dock modellering av stora rörelser av ett fordon under förflyttning. På grund av den noggrannhet som krävs i modellen blir simuleringar också beräkningstunga vilket kan begränsa användningen av modellen.

DEM beskriver marktyper genom att simulera interaktionerna mellan en stor mängd partiklar. Dessa beskrivs utifrån uppmätta parametervärden. Jämfört med FEM-baserade metoder kan fordonets rörelse i större utsträckning modelleras. Dock kan användandet av metoden likt FEM fortfarande begränsas på grund av behovet av hög beräkningsprestanda.

FEM och DEM är metoder som ger detaljerade resultat men som kan vara svåra att använda för att simulera komplicerade körfall med stora modeller. Detta gör att metoderna kan behöva kombineras med andra typer av modeller för att kunna ge generella resultat. Det kan därför vara lämpligt att använda FEM eller DEM för att beräkna ingångsvärden (som annars är okända eller osäkra) till andra enklare metoder. Ett sådant förfarande kan användas både för att öka precisionen och effektiviteten hos modellerna. Ett konkret exempel kan vara att beräkna markens deformation eller markens motstånd för vissa specifika fall. Exempel på dessa metoder återfinns i ett antal publikationer [31, 32].

Tabell 12 presenterar en sammanfattning av markprov som krävs för markmodeller baserade på Bekkers metod och prov som krävs för DEM och FEM baserade modeller och listar mätdata från prov.

Tabell 12. Markprov som krävs för Bekkers semi-empiriska metod samt numeriska modeller. Mätdata som används i DEM och FEM är fysikalisk baserad medan mätdata för Bekkers modell härleds med hjälp av kurvanpassningsmetod.

Modell	Markprov	Markdata
Semi-empirisk (Bekker-Wong)	Skjuv- och tryckprov (med hjälp av Bevameter).	Uppmätta data används för att härleda Bekker parametrar som visas i tabell 13 av Appendix D. Detta görs med hjälp av kurvanpassningsmetoden. Bekkers parametrar är inte baserade på markfysikaliska egenskaper.
DEM	Avancerat markprov t.ex. triaxiellt	Fysikaliskt baserade markdata: bulkdensitet [kg/m^3], Poissons förhållande, friktionsvinkel, skjuvmodul, kohesion [Pa], [32].
FEM	skjuvprov.	Fysikaliskt baserade markdata: densitet [kg/m^3], elasticitetsmodul [Pa], flystpsänning, Poissons förhållande, friktionsvinkel och dilatans.

9 Appendix C Fordons- och terrängmodellering i Project Chrono

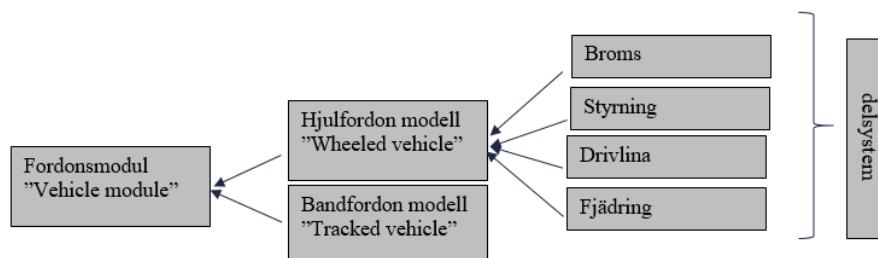
Under utvecklingen av NG-NRMM studerades flera modeller för att beskriva hela fordonsdynamiken [33]. Fordonsmodellen som användes i flera studier beskrev fordonets chassi, däck och hjul, motor, upphängning, styrning och bromssystem. Flera studier genomfördes med olika simuleringsprogram. I [34] användes simuleringsprogrammet MSC Adams, i [35] Vortex Studio, i [36] Nepean Wheeled Vehicle Performance Model, i [37] ROAMS och i [38] mjukvaran DIS.

Valet av modell och simuleringsprogram bygger dock i grunden på hur noggrant fordonet behöver modelleras för att kunna svara på den aktuella frågan.

Utöver modeller som beskriver fordonets dynamik är modeller för fordonets delsystem viktiga att studera. En översikt av ett fordons delsystem beskrivs i [2] där däck och band, upphängning, styrning och framdrivning beskrivs. Beroende på frågeställning kan särskilda modeller för dessa delsystem behövas

I denna studie utförs fordonssimulering och beräkningar med hjälp av Project Chrono [9] som är ett verktyg baserat på fysikalitet och som används, bland annat, för fordonsmodellering och dynamiska beräkningar. Project Chrono består av flera moduler. ”Fordonsmodul” (”Vehicle Module”) gör det möjligt att bygga hjul- och bandfordonsmodeller.

Fordonsmodeller inkluderar parametriserade fordonsdelssystemmallar eller ”templates” för att med stor flexibilitet kunna bygga fordonsmodeller. Ett exempel på Project Chronos fordonsmodul visas i figur 34 och [11]. Ett stort antal exempelmodeller finns tillgängliga i Project Chronos modellbibliotek.



Figur 34. Project Chronos fordonsmodul som består av parametriserade fordonsdelssystem.

Delsystem som är gemensamma för både hjul- och bandfordon:

- Chassi som representeras av massa, tröghet och tyngdpunkt.
- Bromsdelsystem.
- Terrängmodell där marken beskrivs som:
 - Fast mark (icke deformerbar).
 - Deformerbar, med modeller som är baserade på semi-empiriska eller komplexa terramekanikmodeller som DEM eller FEM.
- Motor och växellåda:
 - Project Chronos ”Simple engine model” är en enkel modell som kräver maximalt vridmoment och motoreffekt som ingångsparametrar.
 - Project Chronos ”Engine simple map model” är en detaljerad modell och kräver motorns vridmoment vid olika varvtal.

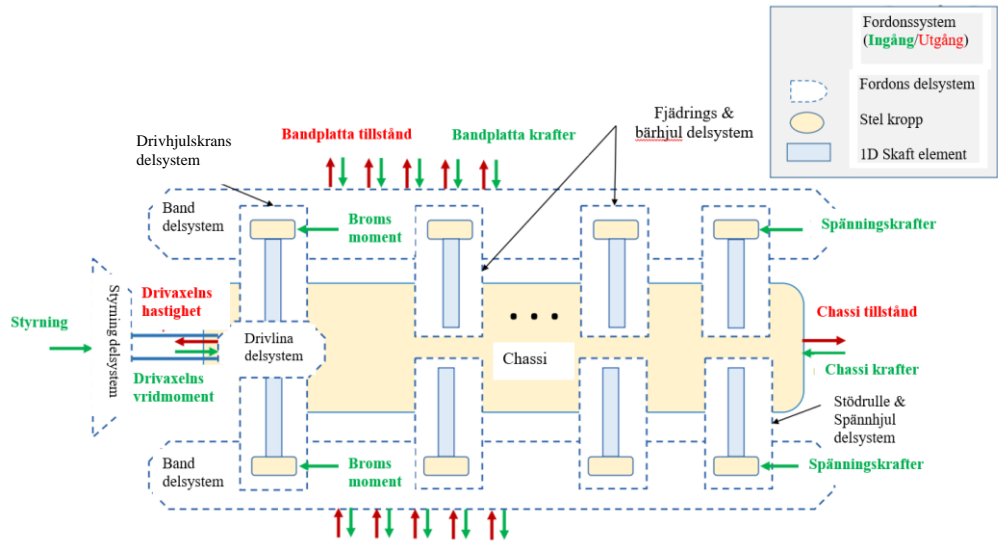
Delsystem som är specifika för hjulfordon, se figur 36:

- Drivlina: fram- och bakhjulsdrift, eller fyrhjulsdraft.
- Styrning delsystem.
- Främre och bakre hjulupphängning.

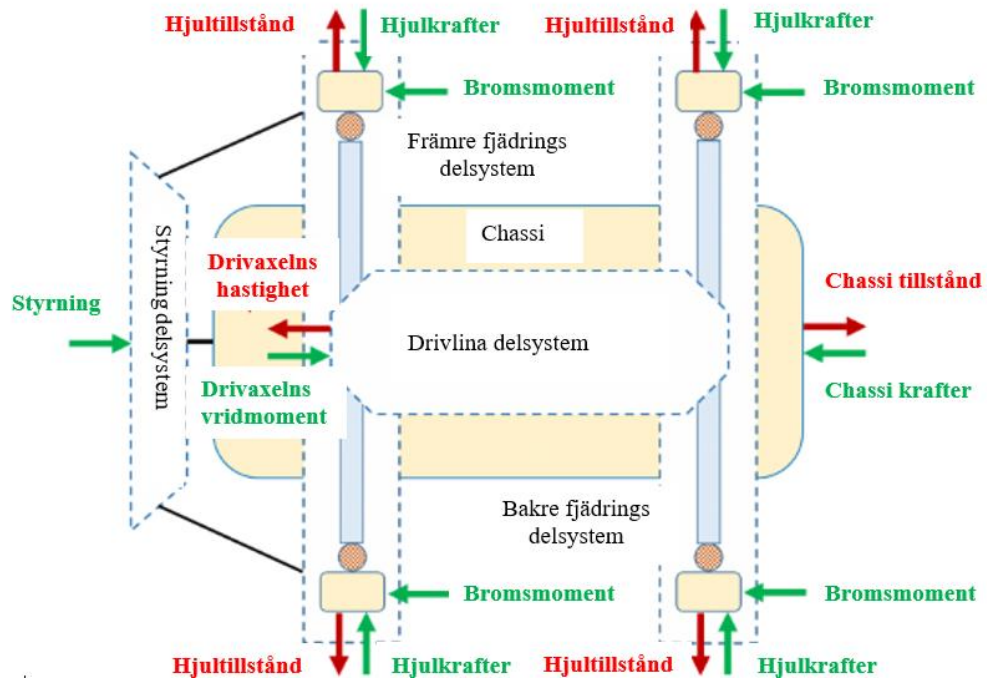
- Hjul- och däckmodeller: Däckmodeller baseras på finita element (FE), fysikaliska modeller eller stel däckmodell. Vid beräkningar på deformierbar mark används bara stela eller FE baserade däckmodeller.

Delsystem som är specifika för bandfordon, se figur 35:

- Drivlina
- Bandaggregat som omfattar spännhjul, band, fordonsfjädring, bärhjul, stödrulle och drivhjulskrans.



Figur 35. Project Chronos bandfordonsmodell som omfattar olika delsystem.



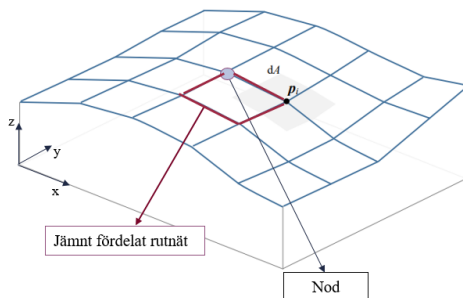
Figur 36. Project Chronos hjulfordonsmodell.

10 Appendix D Modellbeskrivning av deformierbar terrängmodell i Project Chrono

I studien används Project Chronos markmodell "Soil Contact Model" (SCM). SCM är baserad på semi-empiriska Bekker-Wong metoden och kan integreras i 3D-dynamiska beräkningar, [39] och [40]. SCM är beräkningseffektiv och gör det möjligt att:

- Beräkna kontaktkrafterna för hjul, bandplattor och andra geometriska former.
- Beräkna mark plastiska deformationer och sättning.

Markytan modelleras med ett horisontellt och jämnt fördelat rutnät, se figur 37. Varje rutnätsnod representerar en diskret del av markytan med respektive höjd. Rutnätsnoden har en frihetsgrad i vertikala riktningen för att beräkna marksättningen. Rutnätet bör ha en högupplösning för att representera markyta topologi med bra noggrannhet.



Figur 37. Modellering av markytan enligt Project Chronos "Soil contact model". Markytan modelleras med horisontellt och jämnt fördelat rutnät.

Varje rutnätsnod är associerad med markparametrar enligt Bekker-Wong och Janosi-Hanamotos metod. Bekker-Wong metoden beskriver förhållandet mellan kontaktrycket (p) och markdeformation (z) enligt formel (1).

$$p = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n \quad (1)$$

Skjuvspänningen beräknas med Janosi-Hanamotos metod enligt formel (2).

$$\tau = c + p \cdot \tan(\varphi) \left(1 - e^{-\frac{\tau}{k}} \right) \quad (2)$$

Tabell 13 presenterar och beskriver parametrarna för Bekker-Wong och Janosi-Hanamotos formler.

Tabell 13. Beskrivning av markparametrar enligt Bekker-Wong och Janosi-Hanamoto metod.

Parameter	Parameter beskrivning	Enhet
N	Marksättning exponent enligt figur 33	--
P	Marktryck	Pa
k_ϕ	Bekker faktor som omfattar jordkohesion	$\text{kN/m}^{(n+2)}$
k_c	Bekker faktor som omfattar jordfriktionsvinkel	$\text{kN/m}^{(n+1)}$
b^8	Längden på kontaktytan	m

⁸ enligt traditionell "Bekker-Wong" teori, b är längden på kortaste sidan av kontaktyta. I

SCM teori $b = 2 * \frac{\text{kontaktytan}}{\text{kontaktomkrets}}$

Z	Marksättning	m
C	Jordkohesion	Pa
Ø	Jordfriktionsvinkel	deg
J	Skjuvförskjutning	m
K	Skjuvdeformation parameter	m

Ett exempel av mätdata för torr och blöt finkornig jord presenteras i Tabell 14. Mätdata är Annex E av [8].

Tabell 14. Mätdata för torr och blöt finkornig jord, enligt Annex E, [8].

	n	k_{ϕ} [kN/m ⁿ⁺²]	k_c [kN/m ⁿ⁺¹]	c [kPa]	Ø [deg]	K [cm]
Torr finkornig	1,42	6 259	5 085	1,58	34,1	2,22
Blöt finkornig	3,3	126 639	3 216	3,45	35,2	3,05

11 Appendix E Fordonsparametrar hjulfordon

De filer som har använts för att definiera det hjulbaserade fordonet listas i tabellen nedan..

Delsystem	Filnamn
Chassi	HMMWV_Chassis.json
Främre upphängning	HMMWV_DoublewishboneFront.json
Bakre upphängning	HMMWV_DoublewishboneRear.json
Hjul	HMMWV_Wheel.json
Främre broms	HMMWV_BrakeSimple_Front.json
Bakre broms	HMMWV_BrakeSimple_Rear.json
Styrning	HMMWV_PitmanArm.json
Drivlina	HMMWV_Driveline4WD.json
Stela däck	HMMWV_RigidTire.json
TMeasy-däck	HMMWV_TMeasyTire.json
Motor	HMMWV_EngineSimple
Växellåda	HMMWV_AutomaticTransmissionSimpleMap.json

Allmänna fordonsparametrar

Parameter	Värde	Enhet	Kommentar
Position framaxel	(1,688965; 0; 0)	m	
Position bakaxel	(-1,688965; 0; 0)	m	
Position styrning	(1,24498; 0; 0,101322)	m	
Hjulbas	3,378	m	
Mínsta svängradie	7,62	m	
Maximal styrvinkel	30,23	grader	

Chassi

Parameter	Värde	Enhet	Kommentar
Position	(0,056; 0; 0,213)	m	
Massa	2 086,52	kg	
Tröghetsmoment	(1 078,52; 2 955,66; 3 570,2)	kgm ²	
Tröghetsprodukt	(0; 0; 0)	kgm ²	
Förarposition	(0,87; 0,7; 1,05)	m	

Hjul

Parameter	Värde	Enhet	Kommentar
Massa	18,8	kg	
Tröghetsmoment	(0,4634; 0,6243; 0,4634)	kgm ²	

Främre broms

Parameter	Värde	Enhet	Kommentar
Vridmoment	4 000	N	

Bakre broms

Parameter	Värde	Enhet	Kommentar
Vridmoment	4 000	N	

Drivlina

Parameter	Värde	Enhet	Kommentar
-----------	-------	-------	-----------

Motorblock – "Shaft direction"	(1; 0; 0)	-	
Axle – "Shaft direction"	(0; 1; 0)	-	
Tröghetsmoment – "Driveshaft"	0,5	kgm ²	
Tröghetsmoment – "Front driveshaft"	0,5	kgm ²	
Tröghetsmoment – "Rear driveshaft"	0,5	kgm ²	
Tröghetsmoment – "Central differential box"	0,6	kgm ²	
Tröghetsmoment – "Front differential box"	0,6	kgm ²	
Tröghetsmoment – "Rear differential box"	0,6	kgm ²	
"Gear ratio – Front conical gear"	0,2	-	
"Gear ratio – Rear conical gear"	0,2	-	
"Axle differential locking limit"	100	-	
"Central differential locking limit"	100	-	

Styrning

Parameter	Värde	Enhet	Kommentar
Styrlänk			
Position	(0,129; 0; 0)	m	
Massa	3,681	Kg	
Tröghetsmoment	(0,252; 0,00233; 0,254)	kgm ²	
Tröghetsprodukt	(0; 0; 0)	kgm ²	
Radie	0,03	m	
Pitman arm			
Position	(0,064; 0,249; 0)	m	
Massa	1,605	Kg	
Tröghetsmoment	(0,00638; 0,00756; 0,0015)	kgm ²	
Radie	0,02	m	
Revolute joint			
Position	(0; 0,249; 0)	m	
Riktning	(0; 0; 1)	-	
Maximal vinkel	30	Grader	
Universal joint			
Position	(0,129; 0,249; 0)	m	
Riktning (arm)	(0; 0; 1)	-	
Riktning (länk)	(1; 0; 0)	-	
Revolute-spherical joint			
Position (chassi)	(0; -0,325; 0)	m	
Position (länk)	(0,129, -0,325; 0)	m	
Riktning	(0; 0; 1)	-	
Tierod positioner			
Position (Pitman)	(0,195; 0,448; 0,035)	m	
Position (Idler)	(0,195; -0,448; 0,035)	m	

Främre upphängning

Parameter	Värde	Enhet	Kommentar
Camber angle	0	Grader	
Toe angle	0	Grader	
Tröghetsmoment (axel)	0,4	kgm ²	
Spindle			
Massa	14,705	kg	
Masscentrum	(-0,04; 0,91; -0,026)	m	
Tröghetsmoment	(0,04117; 0,07352; 0,04117)	kgm ²	
Radie	0,15	m	
Bredd	0,06	m	
Upright			

Massa	19,45	kg	
Masscentrum	(-0,04; 0,751; -0,026)	m	
Tröghetsmoment	(0,1656; 0,1934; 0,04367)	kgm ²	
Tröghetsprodukt	(0; 0; 0)	kgm ²	
Radie	0,04	m	
Upper control arm			
Massa	5,813	kg	
Masscentrum	(-0,106; 0,589; 0,218)	m	
Tröghetsmoment	(0,03; 0,03; 0,06276)	kgm ²	
Tröghetsprodukt	(0; 0; 0)	kgm ²	
Radie	0,02	m	
Position (chassi fram)	(-0,048; 0,446; 0,245)	m	
Position (chassi bak)	(-0,268; 0,478; 0,196)	m	
Position (upright)	(-0,053; 0,716; 0,215)	m	
Lower control arm			
Massa	23,965	kg	
Masscentrum	(0; 0,547; -0,059)	m	
Tröghetsmoment	(0,4; 0,4; 0,8938)	kgm ²	
Tröghetsprodukt	(0; 0; 0)	kgm ²	
Radie	0,03	m	
Position (chassi fram)	(0,223; 0,307; 0)	m	
Position (chassi bak)	(-0,223; 0,307; -0)	m	
Position (upright)	(-0,036; 0,787; -0,118)	m	
Tierod			
Position (chassi)	-0,25; 0,448; 0,054)	m	
Position (upright)	(-0,176; 0,821; -0,016)	m	
Fjädring			
Position (chassi)	(0,104; 0,510; 0,197)	m	
Position (arm)	(0,097; 0,543; -0,047)	m	
Minsta längd	0,15	m	
Största längd	0,3	m	
Fri längd	0,339	m	
Fjäderdata	(-0,06; -125000) (-0,05; -12500) (-0,04; -7500) (-0,03; -4500) (-0,02; -2500) (-0,01; -1000) (-0,008; -800) (-0,006; -600) (-0,004; -400) (-0,002; -200) (0; 0) (0,002; 200) (0,004; 400) (0,006; 600) (0,008; 800) (0,01; 1000) (0,02; 2500) (0,03; 4500) (0,04; 7500) (0,05; 12500) (0,06; 125000)	(m; N)	
Dämpning			
Position (chassi)	(0,104; 0,498; 0,323)	m	

Position (arm)	(0,097; 0,543; -0,047)	m	
Dämpningskoefficient	19 015,5692	Ns/m	

Bakre upphängning

Parameter	Värde	Enhet	Kommentar
Camber angle	0	Grader	
Toe angle	0	Grader	
Tröghetsmoment (axel)	0,4	kgm ²	
Spindle			
Massa	14,705	kg	
Masscentrum	(0,036; 0,91; -0,026)	m	
Tröghetsmoment	(0,04117; 0,07352; 0,04117)	kgm ²	
Radie	0,15	m	
Bredd	0,06	m	
Upright			
Massa	19,45	kg	
Masscentrum	(-0,036; 0,751; -0,026)	m	
Tröghetsmoment	(0,1656; 0,1934; 0,04367)	kgm ²	
Tröghetsprodukt	(0; 0; 0)	kgm ²	
Radie	0,04	m	
Upper control arm			
Massa	5,813	kg	
Masscentrum	(-0,124; 0,589; 0,221)	m	
Tröghetsmoment	(0,03; 0,03; 0,06276)	kgm ²	
Tröghetsprodukt	(0; 0; 0)	kgm ²	
Radie	0,02	m	
Position (chassi fram)	(0,349; 0,462; 0,228)	m	
Position (chassi bak)	(0,077; 0,462; 0,224)	m	
Position (upright)	(0,036; 0,716; 0,216)	m	
Lower control arm			
Massa	23,965	kg	
Masscentrum	(0; 0,547; -0,059)	m	
Tröghetsmoment	(0,4; 0,4; 0,8938)	kgm ²	
Tröghetsprodukt	(0; 0; 0)	kgm ²	
Radie	0,03	m	
Position (chassi fram)	(0,223; 0,307; 0)	m	
Position (chassi bak)	(-0,223; 0,307; -0)	m	
Position (upright)	(0,036; 0,787; -0,118)	m	
Tierod			
Position (chassi)	-0,223; 0,416; 0,059)	m	
Position (upright)	(-0,17; 0,821; -0,009)	m	
Fjädring			
Position (chassi)	(-0,104; 0,502; 0,256)	m	
Position (arm)	(-0,097; 0,543; -0,047)	m	
Minsta längd	0,15	m	
Största längd	0,35	m	
Fri längd	0,382	m	
Fjäderdata	(-0,2; -711719,272) (-0,18; -531468,245) (-0,16; -385663,250) (-0,14; -270476,949) (-0,12; -182082,006) (-0,1; -116651,084) (-0,08; -70356,846)	(m; N)	

	(-0,06; -39371,956) 0,04; -19869,076) (-0,02; -8020,869) (0; 0) (0,02; 8020,869) (0,04; 19869,076) (0,06; 39371,956) (0,08; 70356,846) (0,1; 116651,084) (0,12; 182082,006) (0,14; 270476,949) (0,16; 385663,250) (0,18; 531468,245) (0,2; 711719,272)	(-		
Dämpning				
Position (chassi)	(-0,104; 0,498; 0,323)		m	
Position (arm)	(-0,097; 0,544; -0,038)		m	
Dämpningskoefficient	36 725,2201		Ns/m	

Motor

Parameter	Värde	Enhet	Kommentar
Maximalt vridmoment	330		
Maximal motoreffekt	110 000		
Maximum engine speed	10 000		

Växellåda

Parameter	Värde	Enhet	Kommentar
Reverse gear ratio	-0,151	-	
Forward gear ratios	(0,1708; 0,2791; 0,4218; 6223; 1,0173; 1,5361)	-	
Shift points	(1 200; 2 226) (1 200; 2 225) (1 200; 2 210) (1 200; 2 226) (1 200; 2 225) (1 200; 2 700)	Rpm	

Stela däck

Parameter	Värde	Enhet	Kommentar
Radie	0,467	m	
Bredd	0,254	m	
Massa	37,6	kg	
Tröghetsmoment	(3,84; 6,69; 3,84)	kgm ²	
Material			
Friktskoefficient	0,9	-	
Restitution	0,1	-	
Young	2e7	Pa	
Poission	0,3	-	

Normal stiffness	2e5	N/m	
Normal damping	40		
Tangential stiffness	2e5	N/m	
Tangential damping	20		

TMeasy-däck

Parameter	Värde	Enhet	Kommentar
Unloaded radius	0,4699	m	
Massa	37,6	kg	
Tröghetsmoment	(3,84; 6,69; 3,84)	kgm ²	
Bredd	0,3175	m	
Rim radius	0,2095	m	
Friktionskoefficient	0,8		
Rolling resistance coefficient	0,015		

12 Appendix F Fordonsparametrar bandfordon

Parametrarnas enhet är enligt SI .

Chassi

"Name"	"Marder chassis"
"Type"	"Chassis"
"Template"	"RigidChassis"
"Components"	
"Centroidal Frame"	
"Location"	[-2.7958, 0, 0]
"Orientation"	[1, 0, 0, 0]
"Mass"	25000
"Moments of Inertia"	[13653.38542, 98182.70833, 101954.4271]
"Products of Inertia"	[0, 0, 0]
"Driver Position"	
"Location"	[0, 0.5, 0]
"Orientation"	[1, 0, 0, 0]

Broms

"Name"	"Marder Shafts Brake"
"Type"	"TrackBrake"
"Template"	"TrackBrakeShafts"
"Maximum Torque"	30000
"Shaft"	

Idler wheel

"Name"	"Marder Idler Left"
"Type"	"Idler"
"Template"	"TranslationalIdler"
"Carrier"	
"Mass"	10.0
"COM"	[0, -0.1, 0]
"Inertia"	[0.04, 0.04, 0.04]
"Location Wheel"	[0, 0, 0]
"Location Chassis"	[0, -0.2, 0]
"Visualization Radius"	0.02
"Pitch Angle"	0
"Tensioner"	

"Location Carrier"	[0, -0.2, 0]
"Location Chassis"	[0.5, -0.2, 0]
"Preload"	24525
"Free Length"	0.75
"Spring Coefficient"	2e6
"Damping Coefficient"	100000

Double idler wheel

"Name"	"Marder Double RoadWheel Left"
"Type"	"TrackWheel"
"Template"	"DoubleTrackWheel"
"Wheel"	
"Radius"	0.334
"Width"	0.181
"Gap"	0.051
"Mass"	25.76
"Inertia"	[0.618, 1.12, 0.618]
"Contact Material"	
"Coefficient of Friction"	0.4
"Coefficient of Restitution"	0.75
"Properties"	
"Young Modulus"	1e7
"Poisson Ratio"	0.3
"Coefficients"	
"Normal Stiffness"	2e5
"Normal Damping"	40.0
"Tangential Stiffness"	2e5
"Tangential Damping"	20

Sprocket

"Name"	"Marder SinglePin Sprocket Left"
"Type"	"Sprocket"
"Template"	"SprocketSinglePin"
"Number Teeth"	12
"Gear Mass"	27.68

"Gear Inertia"	[0.646, 0.883, 0.646]
"Axle Inertia"	0.4
"Gear Separation"	0.225
"Lateral Backlash"	0.01
"Profile"	
"Addendum Radius"	0.3
"Arc Radius"	0.07
"Arc Centers Radius"	0.328414781
"Assembly Radius"	0.275
"Contact Material"	
"Coefficient of Friction"	0.4
"Coefficient of Restitution"	0.75
"Properties"	
"Young Modulus"	1e8
"Poisson Ratio"	0.3
"Coefficients"	
"Normal Stiffness"	2e5
"Normal Damping"	40.0
"Tangential Stiffness"	2e5
"Tangential Damping"	20

Double road wheel

"Name"	"Marder Double RoadWheel Left"
"Type"	"TrackWheel"
"Template"	"DoubleTrackWheel"
"Wheel"	
"Radius"	0.350
"Width"	0.220
"Gap"	0.051
"Mass"	35.56
"Inertia"	[1.14, 2.16, 1.14]
"Contact Material"	
"Coefficient of Friction"	0.4
"Coefficient of Restitution"	0.75

"Properties"	
"Young Modulus"	1e7
"Poisson Ratio"	0.3
"Coefficients"	
"Normal Stiffness"	2e5
"Normal Damping"	40.0
"Tangential Stiffness"	2e5
"Tangential Damping"	20

Track Shoe

"Name"	"Marder SinglePin TrackShoe Left"
"Type"	"TrackShoe"
"Template"	"TrackShoeSinglePin"
"Shoe"	
"Height"	0.06
"Pitch"	0.17
"Mass"	18.02
"Inertia"	[0.22, 0.04, 0.25]
// Contact point on track shoe for detracking control	
"Guide Pin Center"	[0.045, 0, 0.0375]
"Contact"	
"Cylinder Material"	
// Material for sprocket contact surfaces	
"Coefficient of Friction"	0.8
"Coefficient of Restitution"	0.75
"Properties"	
"Young Modulus"	1e8
"Poisson Ratio"	0.3
"Coefficients"	
"Normal Stiffness"	2e5
"Normal Damping"	40.0
"Tangential Stiffness"	2e5
"Tangential Damping"	20
"Cylinder Shape"	
"Radius"	0.015

"Front Offset"	0.0535
"Rear Offset"	-0.061
"Shoe Materials"	
// Material 0	pad bottom (ground contact)
"Coefficient of Friction"	0.8
"Coefficient of Restitution"	0.75
"Properties"	
"Young Modulus"	1e7
"Poisson Ratio"	0.3
"Coefficients"	
"Normal Stiffness"	2e5
"Normal Damping"	40.0
"Tangential Stiffness"	2e5
"Tangential Damping"	20
// Material 1	pad top (wheel contact)
"Coefficient of Friction"	0.8
"Coefficient of Restitution"	0.75
"Properties"	
"Young Modulus"	1e7
"Poisson Ratio"	0.3
"Coefficients"	
"Normal Stiffness"	2e5
"Normal Damping"	40.0
"Tangential Stiffness"	2e5
"Tangential Damping"	20
// Material 2	guide pin (wheel contact)
"Coefficient of Friction"	0.8
"Coefficient of Restitution"	0.75
"Properties"	
"Young Modulus"	1e7
"Poisson Ratio"	0.3
"Coefficients"	
"Normal Stiffness"	2e5
"Normal Damping"	40.0
"Tangential Stiffness"	2e5
"Tangential Damping"	20



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

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

www.foi.se